

Publikationen der Deutschen
Gesellschaft für Photogrammetrie,
Fernerkundung und Geoinformation e.V.



Band 19

2010



**Vorträge
Dreiländertagung
30. Wissenschaftlich-Technische
Jahrestagung der DGPF**

1. – 3. Juli 2010
Wien

100 Jahre ISPRS – 100 Jahre internationale Zusammenarbeit

Publikationen
der Deutschen Gesellschaft für
Photogrammetrie, Fernerkundung
und Geoinformation e.V.



Band 19

2010

**Vorträge
Dreiländertagung
OVG, DGPF und SGPF**

30. Wissenschaftlich-Technische
Jahrestagung der DGPF

1. – 3. Juli 2010
in Wien

100 Jahre ISPRS – 100 Jahre internationale Zusammenarbeit

ISSN 0942-2870

Gerald Kohlhofer, Michael Franzen, Hrsg.

ISSN 0942-2870

Publikationen der
Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung
und Geoinformation (DGPF) e.V.
Band 19, 695 S., Wien 2010
Hrsg.: Gerald Kohlhofer, Michael Franzen

© Deutsche Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung
und Geoinformation (DGPF) e.V.

Zu beziehen durch:

Geschäftsstelle der DGPF
c/o EFTAS GmbH
Oststraße 2-18
D-48145 Münster
Tel.: (0251) 133 070, Fax: (0251) 133 0733, E-Mail: klaus.komp@eftas.com

Druck:

Buchdruckerei Ernst Becvar Ges.m.b.H.
Lichtgasse 10, A-1150 Wien
Tel.: +43-1-892 35 46, Fax: +43-1-892 35 46 22, e-mail: office@becvar.at

Vorwort

Und wieder ist es soweit: die drei nationalen Gesellschaften für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation von Deutschland, der Schweiz und Österreich freuen sich sehr, dass nach drei Jahren wieder eine Dreiländertagung stattfindet und dies im großen Rahmen der 100-Jahr-Feierlichkeiten der internationalen Dachorganisation ISPRS. Das fachliche Programm wird ausgezeichnete wissenschaftliche Beiträge bringen, die den letzten Stand der Forschung und Technik dokumentieren und Zukunftstrends aufzeigen. In mehr als 70 Vorträgen wird das breite Einsatzspektrum und die Zukunftsorientierung unseres Faches dokumentiert, zwei Festvorträge runden das Programm ab. Hier gleich ein herzliches Dankeschön an alle Autoren und Vortragenden.

Besonders erfreulich ist, dass der gemeinsame Karl-Kraus-Nachwuchsförderpreis bereits zum vierten Mal verliehen wird und dies noch dazu in Wien, der langjährigen Wirkungsstätte von Prof. Kraus.

Aber auch die soziale Komponente wird nicht zu kurz kommen – bei mehreren begleitenden Veranstaltungen wird genug Gelegenheit zum Erfahrungsaustausch und für freundschaftliche Kontakte gegeben sein.

Die Vorbereitung einer solchen Veranstaltung erfordert viele Helferinnen und Helfer aus verschiedensten Bereichen zur Erfüllung unterschiedlichster Aufgaben. An dieser Stelle bedanken wir uns herzlich bei allen, die zum Gelingen unserer Tagung beigetragen haben.

Im Namen der Vorstände der drei Partnergesellschaften freuen wir uns, Sie als Besucher der Dreiländertagung 2010 in Wien begrüßen zu dürfen.

Prof. Dr. Cornelia Gläßer
Präsidentin DGPF



Prof. Dr. Stefan Nebiker
Präsident SGPF



Dipl.-Ing. Gert Steinkellner
Präsident OVG



Inhaltsverzeichnis

DGPF-Test zur Evaluierung digitaler Luftbildkameras

Der DGPF-Test zur Evaluation digitaler Luftbildkameras – Überblick und Testdesign <i>Michael Cramer</i>	1
DGPF Projekt: Evaluierung digitaler photogrammetrischer Kamerasysteme – Themenschwerpunkt Geometrie <i>Karsten Jacobsen, Michael Cramer, Richard Ladstädter, Camillo Ressler und Volker Spreckels</i>	11
DGPF Projekt: Evaluierung digitaler photogrammetrischer Luftbildkamerasysteme – Themenschwerpunkt Höhenmodelle <i>Norbert Haala, Heidi Hastedt, Camillo Ressler und Kirsten Wolff</i>	22
DGPF Projekt: Evaluierung digitaler photogrammetrischer Kamerasysteme – Themenschwerpunkt Stereoplotting <i>Volker Spreckels und Andreas Schlienkamp</i>	32

3D-Stadtmodelle

Überlegungen zum stufenlosen Übergang zwischen verschiedenen generalisierten 3D-Stadtmodellrepräsentationen <i>Tassilo Glander und Jürgen Döllner</i>	52
3D-Stadtmodelle – Automatische Detektion, Modellierung und Qualitätskontrolle von Gebäudemodellen <i>Peter Dorninger und Reinhard Prinz</i>	61
3D-Punktwolken als vollwertige 3D-Stadtmodelle? <i>Stephan Nebiker und Susanne Bleisch</i>	71
Bestandsaktualisierung von 3D-Stadtmodellen durch Analyse von 3D-Punktwolken <i>Rico Richter und Jürgen Döllner</i>	79

Aus- und Weiterbildung

Geomatics Education in the Spirit of Bologna <i>Stephan Winter und Cliff Ogleby</i>	87
Umsetzung des Kerncurriculums Geoinformatik in der GI Ausbildung <i>Matthias Möller</i>	96
Der internationale Masterstudiengang »Geodesy and Geoinformation Science« (GIS) an der Technischen Universität Berlin – Erfahrungen nach Durchlauf der ersten Kohorte <i>Bernd Stary, Alexandra Lorenz, Gerhard König und Thomas H. Kolbe</i>	99

Auswertung von Fernerkundungsdaten

Veränderungsdetektion in Krisenregionen <i>Sascha Klonus, Daniel Tomowski, Manfred Ehlers, Peter Reinartz und Ulrich Michel</i>	109
Evaluation of the RapidEye Red Edge Channel for improving land-use classifications <i>Christian Schuster, Michael Förster und Birgit Kleinschmit</i>	119
DESECURE – Satellitengestützte Kriseninformation für Deutschland <i>Monika Gähler und Felix Stracke</i>	127
Aufbau und Aktualisierung des Objektbereichs Bodenbedeckung im Digitalen Landschaftsmodell – Status und operationelles Umsetzungskonzept <i>Christine Ressler und Wilfried Rain</i>	137
When remote sensing went alpine – the 10 international HMRSC symposia 1990-2008 <i>Manfred Buchroithner</i>	146

airAGro – Fernerkundungslösung für die Agronomie auf der Basis von Leichtflugzeugen und Minidrohnen <i>Andreas Barmettler, Stephan Nebiker, Gerhard Kemper, Christoph Koch, Martin Schmutz, Christian Stutz und Markus Peter</i>	156
Potential und Grenzen von ADS40-SH40/SH52 Luftbilddaten zur Extraktion von forstlichen Parametern <i>Lars Waser, Meinrad Küchler und Christian Ginzler</i>	165
Auswertung von Fernerkundungsdaten mit Self-Organizing Maps für die Herleitung von Kohlenstoffkarten <i>Wolfgang Stümer</i>	175
Fernerkundliche Erfassung der Makrophyten im Greifswalder Bodden auf der Grundlage digitaler Luftbilddaten <i>Görres Grenzdörffer</i>	187
Satellitengestützte Waldflächenkartierung für die deutsche Treibhausgasberichterstattung <i>Katja Oehmichen</i>	195
Sehr echtzeitnahe Auflösungsverbesserung multispektraler Fernerkundungsdaten <i>Hans-Hermann Vajen, Henrike Barkmann und Christian Krafft</i>	203
Die Anwendung von Airborne Laser Scanning auf rutschungsgefährdetem Terrain Fallbeispiel: Kliffküsten der Halbinsel Jasmund/Rügen <i>Sven Jany und Annegret Fredel</i>	208

Bildanalyse und Bildverstehen

Wissensbasierte Objekterkennung in 3D-Punktwolken und Bildern <i>Andreas Marbs, Frank Boochs, Helmi Ben Hmida und Hung Truong</i>	220
Automatische Detektion von Bombentrümmern in digitalisierten Luftbildern des 2. Weltkriegs <i>Laura Jensen, Martin Drauschke und Wolfgang Förstner</i>	228
A MDV-based approach for appearance enhancement of historical images <i>Mohammad AlFraheed, Ahmed Alamouri und Sabina Jeschke</i>	236
Vertical or Oblique Aerial Photography for Semantic Building Interpretation <i>Philipp Meixner und Franz Leberl</i>	247
Verbunduntersuchung von Glasfaserbewehrung im Beton <i>Inga Focke, Johannes Lange, Bong-Gu Kang und Wilhelm Benning</i>	257
Objekt-Orientierte Kartierung von Landbedeckungsinformationen mit hochauflösenden Fernerkundungsdaten <i>Michael Pregesbauer, Christian Weise und Gregor Willhauck</i>	265
Mythos True Orthophoto – Vom Sinn und Unsinn eines Produktes <i>Albert Wiedemann und Patrick Wicki</i>	271

Fernerkundung in der Geologie

Use of LANDSAT TM images for geological and lineament mapping, East and North East, Syria <i>Mohammad ALibrahim und Wilhelm Dominik</i>	280
Karstifizierung, Tektonik und Landnutzung in der Region Lusaka <i>Kai Hahne</i>	288
Extraktion geologisch relevanter Strukturen auf Rügen in Laserscanner-Daten <i>Joachim Niemeyer, Franz Rottensteiner, Friedrich Kühn und Uwe Sörgel</i>	298

Geoinformatik

A Framework for the Data-Driven Analysis, Interpretation, and Transformation of Geospatial Information Models <i>Andreas Krüger und Thomas H. Kolbe</i>	309
Neue Entwicklungen im Bereich Virtueller Globen am Beispiel der i3D-Technologie <i>Martin Christen und Stephan Nebiker</i>	325
Matching von 3D Gebäudemodellen mit Wärmebildern einer flugzeuggetragenen IR-Kamera <i>Dorota Iwaszczuk, Janja Avbelj und Uwe Stilla</i>	334
Untersuchung der Effizienz und Akzeptanz von 2D- und 3D-Kartenvarianten für die Innenraumnavigation <i>Alexandra Lorenz, Cornelia Thierbach, Thomas H. Kolbe und Nina Baur</i>	342
Verwaltung landesweiter Full Waveform Airborne Laser Scanning Daten <i>Gottfried Mandlbürger, Christian Briese, Johannes Otepka, Bernhard Höfle und Norbert Pfeifer</i>	356
Effiziente Verschattungsberechnung für die 3D-Solarpotenzialanalyse unter Berücksichtigung der Einstrahlungsintensität <i>Juri Engel und Jürgen Döllner</i>	366
OPALS (Orientation and Processing of Airborne Laser Scanning data) – Konzept und Anwendungsbeispiele einer wissenschaftlichen Laserscanning Software <i>Gottfried Mandlbürger, Johannes Otepka, Wilfried Karel, Bruno Wöhler, Wolfgang Wagner und Norbert Pfeifer</i>	376
Die flächendeckende ALS-Datenerfassung des Bundeslandes Steiermark <i>Rudolf L. Hütter und Oswald Mörth</i>	388

Hyperspektrale Fernerkundung

Spectral method for separating the influence of heavy metal contamination in floodplain vegetation from other stress types <i>Christian Götze, Andrés Jung, Ines Merbach, Rainer Wennrich und Cornelia Gläßer</i>	397
Flugzeuggetragene hyperspektrale Fernerkundung am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) <i>Sebastian Weide, Peter Gege, Christian Schwarz, Martin Bachmann, Stefanie Holzwarth, Martin Habermeyer, Andreas Müller, Peter Haschberger, Paul Schötz, Karim Lenhard, Erich Bogner und Thomas Schwarzmaier</i> 405	
Brandgutdifferenzierung in einem Wildland-Urban-Interface mit Hilfe von Laser Scanning und Bildspektrometrie <i>Christoph Frischknecht, Mathias Kneubühler und Felix Morsdorf</i>	414
Entwicklung, Kalibrierung und Erprobung eines neuen kosteneffizienten abbildenden Spektrometers für umweltrelevante Forschungsanwendungen <i>Tobias Hank, Wolfram Mauser und Timo Gebhardt</i>	423
White Reference Tour 2009. A round-robin test for better spectral libraries <i>Andrés Jung, Christian Götze und Cornelia Gläßer</i>	433
Einsatz von Reflexionsspektrometrie und HyMap-Daten zur Erfassung qualitativer und quantitativer geochemischer Parameter in der Bergbaufolgelandschaft bei Teutschenthal (westl. v. Halle/Saale) <i>Michael Denk, Cornelia Gläßer, Andrés Jung und Christian Götze</i>	440
Using laboratory and airborne imaging spectroscopy to determine soil organic carbon <i>Michael Vohland, Christoph Emmerling, Joachim Hill und Sören Thiele-Bruhn</i>	447

Nahbereichsphotogrammetrie

Mobiles Laser Scanning: Technologische Fortschritte bei der Datenakquisition <i>Nikolaus Studnicka, Peter Rieger, Martin Pfennigbauer, Gerald Zach und Andreas Ullrich</i>	455
-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----

Automatische projektive Bildentzerrung am Beispiel der bildgestützten Planung von Solardachanlagen <i>Thomas Luhmann und Andreas Voigt</i>	469
Digitalkameratachymeter – Einsatzmöglichkeiten für modulare und integrierte Systeme <i>Stefan Hauth und Martin Schlüter</i>	477
Neue Digitalkameras mit erhöhter Stabilität? <i>Jürgen Peipe, Heinz-Jürgen Przybilla, Heidi Hastedt und Dirk Rieke-Zapp</i>	485
Genauigkeitsaspekte bei der Oberflächenerfassung mit dem System PhotoModeler Scanner <i>Heinz-Jürgen Przybilla und Jürgen Peipe</i>	489
Dokumentation und Rekonstruktion des unvollendeten Kaiserdenkmals im Dom zu Speyer <i>Michael Moser, Albert Grimm-Pitzinger und Klaus Hanke</i>	496
Das Messverhalten Terrestrischer Laser Scanner an Steinoberflächen <i>Peter Dorninger und Clemens Nothegger</i>	504
Dokumentation des Gletscherrückgangs am Gössnitzkees (Schobergruppe, Hohe Tauern) für den Zeitraum 1988-2009 mittels terrestrischer Photogrammetrie <i>Viktor Kaufmann</i>	513
 Radarfernerkundung und Flugzeuglaserscanning	
Processing, geocoding and mosaicking of MiSAR data <i>Christophe Magnard, Max Frioud und Erich Meier</i>	524
InSAR für Kartierungsprogramme großflächiger Gebiete <i>Sowmya Gopal und Thomas Damoiseaux</i>	532
LIDAR-Datenpotenziale für hydrodynamisch-numerische Modelluntersuchungen <i>Herbert Brockmann, Andreas Haase, Gottfried Mandlbürger und Michael Schröder</i>	542
Waldlückenerfassung aus ALS Daten mittels α -shapes <i>Lothar Eysn, Markus Hollaus, Werner Mücke, Michael Vetter und Norbert Pfeifer</i>	552
Maßstabsabhängige Modellierung von Strukturlinien aus ALS-Daten <i>Christian Briese, Gottfried Mandlbürger und Werner Mücke</i>	561
 Sensoren und Plattformen	
Evaluation of Digital Surface Models by Semi-Global Matching <i>Heiko Hirschmueller und Tilman Bucher</i>	571
Vergleich von ASTER GDEM- mit SRTM-Höhenmodellen <i>Karsten Jacobsen</i>	581
Drohnenbasierte Umweltbeobachtung und Kartierung basierend auf einem Virtuellen Globus <i>Hannes Eugster, Stephan Nebiker und Kevin Flückiger</i>	589
Anforderungen an die Auswertung UAV-gestützter Fernerkundungsdaten <i>Ursula Kirchgäßner, Uwe Putze, Maria von Schönermark und Norbert Haala</i>	597
Luftgestützte Low-Cost-Aufnahmeplattform zur Unterstützung von Katastropheneinsätzen <i>Mathias Schardt, Hannes Raggam, Roland Wack, Martin Ofner, Karlheinz Gutjahr und Otto Koudelka</i> .	606
UltraCamL: Sensorkonzept und neues Stitchingverfahren <i>Richard Ladstädter und Michael Gruber</i>	616
The Quattro-DigiCAM – IGI's Versatile Aerial Camera System for Various Aerial Imaging Tasks <i>Jens Kremer</i>	623
Überlegungen zum Dynamikbereich von digitalen, flächenbasierten Luftbildkamerasystemen vom Test- flug Vaihingen/Enz <i>Otto Kölbl</i>	631

Evaluation of Vexcel Imagings digital aerial camera system UltraCam-X <i>Magdalena Linkiewicz und Michael Breuer</i>	643
Neue luftgestützte Sensoren und Plattformen für verschiedenste Aufgaben in der Fernerkundung <i>Gerhard Kemper</i>	650
Standardisierung und Qualitätssicherung	
Kalibrierung und Validierung von Fernerkundungssensoren und -daten (ISO/TS 19159) <i>Wolfgang Kresse</i>	659
Nationale Geoportale: Metadaten-Standards als Grundlage des Qualitätsmanagements – am Beispiel von AGEOportal <i>Josef Strobl, Manfred Mittlböck und Mariana Belgiu</i>	667
Immobilien- und Infrastruktur-Management in Österreichs grösstem Wirtschaftspark <i>Hanns Schubert, Peter Wondra und Theo Meusburger</i>	677
Räumliches Informationssystem auf Grundlage einer ontologiebasierten Datenstruktur für multidisziplinäre Forschung <i>Gerald Hiebel, Klaus Hanke und Ingrid Hayek</i>	685
Autorenverzeichnis	696

Der DGPF-Test zur Evaluation digitaler Luftbildkameras – Überblick und Testdesign

MICHAEL CRAMER¹

Zusammenfassung: Dieser Artikel konzentriert sich auf grundsätzliche Anmerkungen zum Test von digitalen photogrammetrischen Luftbildkamerasystemen, durchgeführt von der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation (DGPF). Der Beitrag soll einen Überblick über die Rahmenbedingungen des Tests geben, die verfügbaren Referenz- und Testdaten vorstellen und die Struktur und Organisation der Datenauswertung erläutern. Die detaillierten Ergebnisse der Auswertungen werden in separaten Beiträgen vorgestellt, die ebenfalls im Rahmen der 3-Ländertagung zur Vorstellung kommen werden. Gleichzeitig wird das Projekt auch mit dieser Veranstaltung offiziell zum Abschluss gebracht.

1 Einleitung

Die digitale Bildaufzeichnung ist Praxis in der photogrammetrischen Luftbildanwendung. Die deutschen Landesvermessungsbehörden schreiben Neubefliegungen ausschließlich als digitale Bildflüge aus. Im Jahr 2009 konnte damit die Umstellung auf digitale Befliegungen erfolgreich in allen Bundesländern umgesetzt werden (BALTRUSCH 2010). Ähnliches gilt auch für viele andere europäische Länder. Damit hat sich in deutlich weniger als 10 Jahren und somit schneller als ursprünglich erwartet die digitale Bildaufzeichnung als Standardverfahren für photogrammetrische Bildflüge etabliert. Dennoch werden vor allem von Anwenderseite unabhängige Untersuchungen zur umfassenden Qualitätsabschätzung der digitalen Aufnahmesysteme gefordert, die sowohl die aktuellsten Kameraentwicklungen berücksichtigen und diese nicht nur hinsichtlich geometrischer Qualität der 3D-Objektpunktbestimmung untersuchen, sondern sich auch mit radiometrischen Aspekten und der Genauigkeit von abgeleiteten Produkten wie die automatisch generierten Oberflächenmodelle bzw. Ergebnisse aus dem manuelle Stereoplotting auseinandersetzen. Zwar kann auf Publikationen von z.B. PASSINI & JACOBSEN (2008) oder CRAMER (2007) verwiesen werden, diese beschränken sich aber nur auf die Untersuchung der geometrischen Genauigkeiten und berücksichtigen nicht die letzten Sensorentwicklungen. Untersuchungen zum radiometrischen Potenzial und möglichen Anwendungen im Bereich der Fernerkundung finden sich in MARTÍNEZ ET AL. (2007) und HONKAVAARA ET AL. (2009). Teilweise wurden in diesen Tests hyperspektrale Aufnahmesysteme parallel zu den digitalen Kameras geflogen. Obwohl mit diesen Tests bereits das hohe Potenzial der digitalen Kamerasystem nachgewiesen wurde, hat sich die Deutsche Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation (DGPF) Ende 2007 dazu entschlossen, einen eigenen und unabhängigen Test zur Qualitätsuntersuchung digitaler photogrammetrischer Luftbildkamerasysteme durchzuführen – nicht nur um die früheren Tests zu verifizieren, sondern auch um die aktuellsten Produktentwicklungen berücksichtigen zu

¹ Michael Cramer, Institut für Photogrammetrie (ifp), Universität Stuttgart, Geschwister-Scholl-Str. 24D, 70174 Stuttgart; E-Mail: michael.cramer@ifp.uni-stuttgart.de

können und mit der Analyse von abgeleiteten Produkten auch die Prozesskette einzubeziehen. Aufgrund der stark unterschiedlichen Sensorgeometrien (z.B. Zeilenscanner bzw. Mehrkopf-Flächensysteme) sind sensorspezifische (Vor-)Verarbeitungsschritte erforderlich. Damit existiert für die digitale Bildauswertung eine deutlich engere Verknüpfung zwischen verwendetem Sensor und zugeordneter Prozesskette, als dieses für die analogen Kamerasysteme der Fall war.

Um eine spätere Vergleichbarkeit der Untersuchungsergebnisse zu garantieren, sollten die erforderlichen Testflüge in einem Testgebiet unter ähnlichen Flugbedingungen durchgeführt werden. Dazu wurde das Testfeld Vaihingen/Enz ausgewählt, welches seit 1995 von dem Institut für Photogrammetrie (ifp), Universität Stuttgart für die empirische Qualitätskontrolle von luftgestützten Sensoren eingesetzt wird (CRAMER 2005). Demzufolge wurde das ifp von der DGPF als verantwortliches Pilotzentrum mit der Leitung der Untersuchung betraut. Dieses beinhaltete auch die Aufbereitung und Auslieferung der Testdaten an die Teilnehmer aus Wissenschaft, Behörden, privaten Firmen und natürlich den Sensorherstellern selber. Für die spätere Produktgenerierung wurden vom ifp zudem für fast alle Sensoren einheitliche Referenzorientierungen bereitgestellt (CRAMER & HAALA 2009).

Auch wenn der DGPF-Test von vielen als ein direkter Vergleich verschiedener Sensorsysteme gesehen wird und dieses sicher auch eine wesentliche Motivation für den Test war, so soll doch eindrücklich darauf hingewiesen werden, dass es sich hier eher um das Herausarbeiten von sensorspezifischen Stärken und ggf. Schwachpunkten handelt. Der direkte Vergleich ist auch deswegen kaum möglich, da trotz des identischen Testgebiets die Flüge zwangsläufig an verschiedenen Tagen mit unterschiedlichen Aufnahmebedingungen erfolgen mussten. Zudem musste das eigentlich vorgesehene Befliegungsfenster von 2 Wochen letztlich wetterbedingt auf ein deutlich längeres Intervall von Juli bis September 2008 gestreckt werden. Dieses wird auch nachfolgend genauer dargestellt. Im Abschnitt 2 werden die Referenzdaten vorgestellt, anschließend folgen in Kapitel 3 die empirischen Testflüge. Sowohl Referenzdaten als auch Testflugdaten liefern die Basis für die späteren Genauigkeitsuntersuchungen. Kapitel 4 geht schließlich auf die Organisation der Auswerteteams und die beteiligten Institutionen ein.

2 Referenzdaten

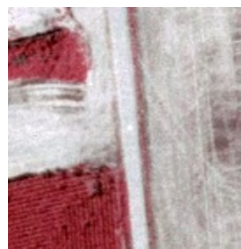
2.1 Testfeld Vaihingen/Enz

Für die Befliegungen im Rahmen des DGPF-Projekts wurden im Testfeld Vaihingen/Enz ca. 200 Punkte mit Farbmarkierungen signalisiert und mit statischen GPS-Basislinienmessungen eingemessen. Die Genauigkeit der Referenzpunkte (Koordinatenfehler, Std.Abw.) kann mit 1 cm für die horizontale und 2 cm für die vertikale Komponente angegeben werden. Diese Genauigkeiten sind bei den späteren Genauigkeitsvergleichen zu berücksichtigen. Vor allem für die hochauflösenden Befliegungen (Bodenpixelgröße (GSD) 8 cm), für die entsprechende Genauigkeiten im Sub-Pixelbereich zu erwarten sind, erscheint die obige Genauigkeit der Referenzpunkte als nicht hinreichend um wirklich als Referenz dienen zu können. Dieses ist aber ein grundsätzliches Problem, das vor allem durch den deutlichen Trend nach immer höher aufgelösten Bildflügen ($GSD \leq 10$ cm) verschärft wird. Dieses bedingt zwangsläufig auch höhere Anforderungen an die Genauigkeit der eigentlichen Referenzdaten und damit auch mehr Aufwand, was die Bestimmung von Referenzdaten für operationelle Projekte betrifft.

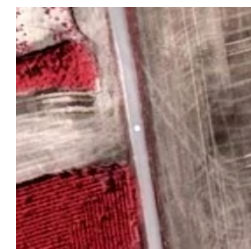
Die empirischen Testflüge wurden mit nominellen GSD-Werten von 20 cm bzw. 8 cm geplant, wobei die höherauflösenden Bildflüge nur im zentralen Bereich des Testfelds erfolgten. Die Signalisierung der Referenzpunkte erfolgte mit weißen, quadratischen 60 x 60 cm² Farbmarkierungen, die im zentralen Testfeldbereich um eine mittig angeordnete 30 x 30 cm² schwarze Markierung ergänzt wurden (Abb. 1). In dieser Abbildung sind exemplarisch auch die Ausschnitte aus den quasi zeitgleich aufgenommenen Bildern der DMC bzw. RMK-Befliegungen für die beiden realisierten Flughöhen dargestellt. Beide Kameras waren in einem Doppelkameraloch-Flugzeug installiert, damit kann auch die Bildqualität direkt miteinander verglichen werden. Für die 20 cm GSD-Flüge ist der signalisierte Punkt aufgrund der größeren Bodenpixel deutlich schlechter zu identifizieren, und das obwohl aufgrund von Überstrahlungseffekten das Signal deutlich größer als die nominell 3 x 3 pix im Bild erscheint. Rein visuell wird auch schon die bessere radiometrische Qualität der DMC und allgemein digital aufgenommener Bilder ersichtlich. Dennoch erscheint für den 8 cm GSD Flug das analog aufgenommene RMK Bild schärfer zu sein, was anhand weiterer Untersuchungen zum geometrischen Auflösungspotenzial am Siemensstern zu verifizieren ist (Abb. 2). Die korrekte Identifikation und Messung der Bildpunkte, die vor allem für die Passpunkte i.d.R. manuell zu erfolgen hat, ist mitentscheidend für die resultierende Genauigkeit der Georeferenzierung. Die Variation in manuellen Bildpunktmessungen von unterschiedlichen Operateuren unter Verwendung des gleichen Bildmaterials wird in JACOBSEN ET AL. (2010a) untersucht. Während für fast alle digitalen Bilddatensätze die Übereinstimmung der manuellen Messung im Bereich von 0,2 pix (RMS) liegt, fallen vor allem bei den RMK 20 cm GSD Bildpunktmessungen größere Differenzen zwischen 0,3 – 0,45 pix (RMS) auf. Dieses kann bereits ein Hinweis auf die unterschiedliche radiometrische Qualität der gescannten Analogbilder im Vergleich zu den digitalen Bildern sein, die natürlich auch schon die Bildpunktmessung beeinflusst.



Punkt Nr. 3006 signalisiert mit Farbmarkierung auf Feldweg im zentralen Testfeldbereich.



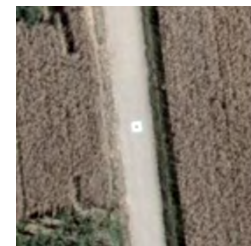
RMK 20cm GSD CIR



DMC 20cm GSD CIR



RMK 8cm GSD RGB



DMC 8cm GSD RGB

Abb. 1: Signalisierter Referenzpunkt im zentralen Bereich des Testfelds Vaihingen/Enz und die korrespondierenden Bildpunkte in den zeitgleich aufgenommenen DMC und gescannten RMK Bildern.

2.2 Weitere Referenzdaten

Neben den etwa 200 permanent signalisierten Referenzpunkten wurde das Testfeld an den Befliegungstagen um temporäre Signale ergänzt, die für die Untersuchungen zur geometrischen Auflösung und radiometrischen Qualität der Bilddaten Verwendung finden. Die Abb. 2 zeigt die verwendeten Farbtafeln und Auflösungsmuster. Der große Siemensstern hat einen Radius von 8 m, die beiden kleineren Siemenssterne sind $2 \times 2 \text{ m}^2$ groß. Diese Größe haben auch die vier Farbtafeln. Der kontinuierliche Graukeil hat eine Abmessung von $2 \times 3 \text{ m}^2$.

Parallel zu den Bildflügen wurden von den Bodenteams Spektrometermessungen auf den Farbtafeln und anderen natürlichen Oberflächen durchgeführt um die spektrale Charakteristik zu ermitteln. Mittels Sonnenphotometer wurde zeitgleich die optische Dichte der Atmosphäre bestimmt. Diese Referenzmessungen lieferten die Grundlage für die spätere radiometrische Analyse der Sensordaten (SCHÖNERMARK 2010), wobei sich letztlich die Farbtafeln aufgrund starker richtungsabhängiger Reflexion und zu geringer Größe als nicht optimal herausstellten.



Abb. 2: Vaihingen/Enz Radiometrie Testtafeln aufgenommen aus der Luft (links) und das Bodenteam bei den parallel zu den Bildflügen durchgeführten Spektrometermessungen an den Farbtafeln (rechts).

Neben den beschriebenen Bodendaten wurden weitere Referenzdaten aus der Luft erfasst (siehe Tab. 1, unterer Teil). Teile des Testgebiets wurden durch hyperspektrale Scanner überflogen. Insbesondere der AISA+ Datensatz, der parallel mit einer DMC in einem Flugzeug mit Doppelkamerainstallation aufgezeichnet wurde, ermöglicht eine radiometrische inter-sensorale Kalibrierung. Diese Untersuchungen werden in JUNG ET AL. (2010) vorgestellt. Für die Erstellung eines Referenzhöhenmodells wurde eine Laserscannerbefliegung mit dem ALS 50 System durchgeführt. Der Flug beschränkte sich ebenfalls auf den zentralen Testfeldbereich. Die Punkte wurden mit einer Dichte von $\geq 5 \text{ Punkte/m}^2$ erfasst. Obwohl die Prozessierung der ALS 50 Daten vom Hersteller direkt vorgenommen wurde, haben die Auswertungen der TU Wien gezeigt, dass noch ein gewisses Potenzial zur Verbesserung der Georeferenzierung vorhanden war. Dieses wird auch in HAALA ET AL. (2010a) diskutiert.

3 Bildflüge

Die Bildflüge wurden an 6 verschiedenen Flugtagen in einem Zeitraum von 10 Wochen erfasst (siehe Tab. 1). Das ursprünglich geplante Zeitfenster von 2 Wochen konnte aufgrund ungünstiger Witterungsverhältnisse nicht eingehalten werden. Damit mussten signifikante Änderungen der Beleuchtungsbedingungen (durch Variation Sonnenhöchststand) als auch in der Vegetation (Reflexionsverhalten Objekt Oberfläche) in Kauf genommen werden. Dieses sollte aufgrund der angestrebten vergleichbaren Aufnahmebedingungen eigentlich vermieden werden. Durch die Vegetationsänderungen wurden wiederholte Feldbegehungen erforderlich (WASER ET AL. 2010).

Tab. 1: Zusammenstellung der beteiligten Kamerasysteme, Firmen und realisierte Flugtage

System	Systemanbieter/ Hersteller	Flugfirma	Flugtag(e)	Anmerkungen
DMC	Intergraph/ZI	RWE Power	24.07.2008 & 06.08.2008	Paralleler Flug mit RMK-Top15 8 cm GSD mit p=60%
ADS40, SH52	Leica Geosystems	Leica Geosystems	06.08.2008	
JAS-150	Jenaoptronik	RWE Power	09.09.2008	
Ultracam-X	Vexcel Imaging Graz	bsf Swissphoto	11.09.2008	
RMK-Top15	Intergraph/ZI	RWE Power	24.07.2008 & 06.08.2008	Paralleler Flug mit DMC 8 cm GSD mit p=60%
Quattro DigiCAM	IGI	Geoplana	06.08.2008	
AIC-x1	Trimble/ Rolleimetric	Alpha Luftbild	11.09.2008	nur 8 cm GSD, keine Querstreifen
AIC-x4	Trimble/ Rolleimetric	Vulcan Air	19.09.2008	Daten nicht im Projekt verfügbar
DLR 3K- camera	DLR München	DLR München	15.07.2008	nur 20 cm GSD, keine Querstreifen
AISA+ hyper-spektral	specim FH Anhalt	RWE Power	02.07.2008	Paralleler Flug mit DMC
ROSIS hyper-spektral	DLR München	DLR München	15.07.2008	
ALS 50 Laserscanning	Leica Geosystems	Leica Geosystems	21.08.2008	

Wie bereits erwähnt wurden die Bilddaten mit GSD Werten von 20 cm bzw. 8 cm erfasst, wobei die 20 cm GSD Flüge das gesamte Testfeld abdecken, die 8 cm GSD Flüge sich nur auf den inneren Bereich beschränkten. Die 20 cm GSD Bildverbände wurden mit 60/60 Überdeckungsverhältnissen geflogen, für die 8 cm GSD Blöcke wurde eine 80% Längsüberdeckung angestrebt, für beide Flughöhen jeweils mit zwei Querstreifen am Blockanfang bzw. -ende. Aufgrund der unterschiedlichen Sensorgeometrien und der festgelegten Ausdehnung des Testfelds Vaihingen/Enz musste die Querüberdeckung sensorspezifisch auf die realisierte Bildabdeckung im Gelände angepasst werden, was sich auf die Blockgeometrie und damit auch die spätere Vergleichbarkeit auswirkt. Hinzu kommt, dass nicht alle Testflüge gemäß den Vorgaben ausgeführt werden konnten (siehe Anmerkungen in Tab. 1) und Befliegungen z.T. nur in einer Flughöhe bzw. ohne Querstreifen durchgeführt wurden. Wettertechnische Veränderungen während der Befliegung bzw. zwischen den unterschiedlichen Bildflugtagen sind ebenfalls zu berücksichtigen.

Die erfliegenen Sensordaten wurden i.d.R. von den Systemherstellern direkt an das Pilotzentrum übergeben. Alle Hersteller hatten dafür Zugriff auf die Koordinaten von 19 Passpunkten, um die auszulieferenden Datensätze auf Konsistenz und Vergleichbarkeit mit anderen Projekten zu prüfen. Einige der Sensorhersteller haben diese Informationen aber offensichtlich auch zur tiefergehenden Analyse ihrer Datensätze genutzt. Daher muss unter Umständen davon ausgegangen werden, dass die hier analysierten Testdaten ggf. eine andere Qualität haben, wie die ansonsten in operationellen Projektbefliegungen zur Verfügung stehenden Daten. Die Aussagen der im Rahmen des DGPF-Projekts entstandenen Beiträge beziehen sich immer nur auf diese empirischen Testdaten. Dieses muss beachtet werden, sollten Schlussfolgerungen aus diesem Test auf die spätere operationelle Anwendung übertragen werden.

4 Projektorganisation und Auswerteteams

Das DGPF-Kameraevaluierungsprojekt wurde offiziell im Frühjahr 2008 während der DGPF-Jahrestagung in Oldenburg präsentiert. Über 100 Experten überwiegend aus dem deutschsprachigen Raum bekundeten daraufhin ihr Interesse an diesem Projekt und haben sich auf dem Projektverteiler eingetragen. Über 30 Institutionen haben sich letztlich aktiv an den Auswertungen beteiligt, die offizielle Projektvereinbarungserklärung unterschrieben und damit konkrete Datensätze zur Analyse angefordert. In Abb. 3 sind diese aktiven Teilnehmer nach Schwerpunkten gruppiert. Wie zu erwarten war, stammen knapp 50% aus dem wissenschaftlichen Umfeld. Weitere 40% der Teilnehmer repräsentieren kommerzielle Firmen, darunter auch die Herstellerfirmen. Etwa 15% stammen aus dem behördlichen Vermessungswesen, im Wesentlichen den Landesvermessungsämtern, einem der Hauptanwender von Daten digitaler Kamerasysteme. Eine Liste aller Projektteilnehmer findet sich in CRAMER (2009) bzw. auf der Projektinternetpräsenz (DGPF 2010).

In der Projektvereinbarung mussten die erforderlichen Daten, Arbeitsschwerpunkte und ein grober Arbeitsplan spezifiziert werden. Das Pilotzentrum hat ab Spätherbst 2008 die Datensätze an die aktiven Institutionen ausgeliefert. Wie aus Abb. 3 ersichtlich wurden 110-mal Datensätze ausgeliefert. Schwerpunkt lag ganz klar auf den flächenbasiert arbeitenden Mehrkopfkamerasystemen DMC, Ultracam und DigiCAM, deren Daten 60% der Datenanfragen

ausmachten. Demgegenüber wurden die ADS und JAS Zeilenkameradaten nur in 18% der Auslieferungen angefragt. Diese Verteilung reflektiert die aktuelle Situation (zumindest hier im deutsch-sprachigen Raum), dass flächenhaft aufzeichnende Digitalkameras momentan auch in aktuellen Projektbefliegungen einen deutlich größeren Anteil haben als die zeilenhaft aufzeichnenden Systeme. Die gescannten RMK-Bilder wurden 15-mal zu Vergleichszwecken ausgeliefert. Die Daten der mit kleineren Bildformaten arbeitenden 3K-Kamera und des AIC-x1 Systems wurden nur in unter 10% der Anfragen berücksichtigt.

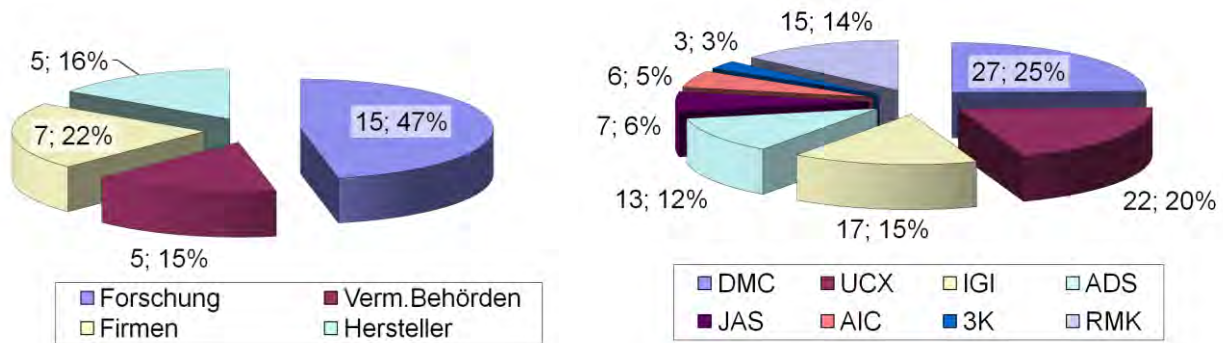


Abb. 3: Beteiligte Institutionen (links) und vom Pilotzentrum ausgelieferte Datensätze (rechts), Stand 1. Oktober 2009.

Je nach Schwerpunkt der geplanten Arbeiten wurden die aktiven Institutionen einzelnen Auswerteteams zugeordnet, auch um die Arbeiten zu koordinieren und interne Diskussionen schon während der Datenprozessierung zu fördern. Vier Auswerteteams mit je einem Themenschwerpunkt wurden definiert, die jeweils von einem ausgewiesenen Experten geleitet wurden: Karsten Jacobsen, Leibniz Universität Hannover (Auswerteteam Geometrie), Maria von Schönermark, DLR Oberpfaffenhofen (Auswerteteam Radiometrie), Norbert Haala, Universität Stuttgart (Auswerteteam Höhenmodelle) und Volker Spreckels, RAG Deutsche Steinkohle (Auswerteteam Stereoplotting). Da viele der aktiven Teilnehmer eher aus dem photogrammetrischen Umfeld stammen, wurden die Themen Geometrie und Höhenmodelle detaillierter untersucht. Die ursprüngliche Absicht, in allen Bereichen redundante Auswertungen verschiedener Institutionen miteinander vergleichen zu können, konnte vor allem für die Auswertungen des Radiometrieteils nicht erfüllt werden. Hinzu kommt, dass nicht alle der ausgelieferten Datensätze von den Teilnehmern auch prozessiert wurden bzw. deren Ergebnisse an die Auswerteteams oder das Pilotzentrum berichtet wurden. Die Gründe dafür waren Zeitmangel und kurzfristig verschobene Prioritäten. Deutlich mehr als $\frac{3}{4}$ der Firmen, die ursprünglich Daten angefragt und geliefert bekommen hatten, haben letztlich keine Ergebnisse zurückgeliefert. Bei den beteiligten Personen und Institutionen aus Wissenschaft und Behörden waren es 40% bzw. 20%, die trotz Datenlieferung keinen Beitrag zu den Ergebnissen liefern konnten.

Damit kann auch mit Projektabschluss im Rahmen der 3-Ländertagung in Wien noch nicht für alle Aspekte des DGPF-Kameraevaluierungsprojekts eine umfassende Auswertung präsentiert werden. Dennoch liefern die im Rahmen dieser Tagung präsentierten Fachvorträge und Berichte

einen umfassenden Einblick in das Potenzial der aktuellen digitalen Kamerasysteme und der vorhandenen Prozessierungsketten. Im Einzelnen ist auf die Beiträge von JACOBSEN ET AL. (2010b), HAALA ET AL. (2010b), SPRECKELS & SCHLIENKAMP (2010), JUNG ET AL. (2010), HIRSCHMÜLLER & BUCHER (2010) und KÖLBL (2010) zu verweisen. Einige dieser Beiträge sind bereits in z.T. ausführlicherer Fassung und englischer Sprache in der Zeitschrift PFG, Heft 2, 2010 publiziert worden. Das trifft auch für den hier vorliegenden Beitrag zu. Darüber hinaus muss auf die Veröffentlichungen im Rahmen der letztjährigen DGPF-Jahrestagung in Jena (März 2009) verwiesen werden. Alle bisherigen im Projekt entstandenen Publikationen sind auch über die Projektinternetpräsenz verlinkt (DGPF 2010).

5 Zusammenfassung

Das DGPF-Kameraevaluierungsprojekt ist zweifellos einer der wichtigen Beiträge zur Untersuchung des Potenzials der digitalen Kameratechnologien im photogrammetrischen Anwendungsfeld. Obwohl der Test lt. Titel eigentlich nur die Qualität der jeweiligen Kamerasysteme untersuchen und deren Eignung für spätere Anwendungen darstellen sollte, wurde im Rahmen der Auswertungen deutlich, dass es nicht nur der Sensor selber sondern vor allem auch die anschließende Prozessierungskette ist, die wesentlichen Einfluss auf die zu erzielende Genauigkeit hat. Es ist daher nur logisch, dass im Nachgang des DGPF-Projekts die Qualität der aktuellen Prozessierungssoftware weiter zu untersuchen ist. Ein erstes internationales Projekt zum Vergleich von verschiedenen Programmen zur automatischen Generierung von digitalen Oberflächenmodellen aus digitalen Bildern wird gerade vom IGN Paris im Rahmen der EuroSDR (European Spatial Data Reserach, www.eurosd.net) initiiert (IGN 2010). Es beruht direkt auf den Erfahrungen des DGPF-Projekts. Derartige Untersuchungen werden die bisherigen Ergebnisse des DGPF-Tests daher zukünftig wirkungsvoll ergänzen.

Die im Rahmen des DGPF-Projekts erfassten empirischen Datensätze sind wissenschaftlich wertvoll und wie bereits angedeutet für weitere, tiefere Untersuchungen prädestiniert (z.B. auch im Rahmen der Arbeiten von Arbeitsgruppen der ISPRS oder sonstiger wissenschaftlicher Organisationen). Eine Weiterverwendung der Daten in diesem Sinne wird auch vom DGPF-Vorstand unterstützt und gefördert. Konkrete Anfragen sind an den DGPF-Vorstand zu richten. Es bleibt zu hoffen, dass sich dieser Datensatz als ein möglicher Referenzdatensatz für die nächsten Jahre etabliert.

Auch wenn es letztlich nicht möglich war in der gut 2-jährigen Projektlaufzeit alle Aspekte in der ursprünglich geplanten Breite und Tiefe zu untersuchen, so konnten die erzielten Ergebnisse dennoch das hohe Potenzial der digitalen Bildaufzeichnung und anschließenden Auswertung nachhaltig untermauern und damit frühere Untersuchungen ergänzen. Die kontinuierliche Verbesserung der Aufnahmesysteme und auch der zugeordneten Software wird das Potenzial dieser Systeme zukünftig noch weiter verbessern.

6 Danksagung

Mit der 3-Ländertagung in Wien im Juli 2010 findet das DGPF-Kameraevaluierungsprojekt nun seinen offiziellen Abschluss. Daher gilt es Dank zu sagen an alle diejenigen, die dieses Projekt ermöglicht, fortwährend getragen und durch vielfache Beiträge jeglicher Art unterstützt haben, vor allem vor dem Hintergrund, dass alle diese Arbeiten ohne finanzielle Vergütungen durchgeführt wurden. Namentlich sollen erwähnt werden Frau Cornelia Gläßer und Herr Herbert Krauß für die Unterstützung im DGPF-Vorstand, Frau Maria von Schönermark und die Herren Karsten Jacobsen, Norbert Haala und Volker Spreckels als Leiter der Auswerteteams und insbesondere Herr Werner Schneider, der für die Koordinierung der Arbeiten im Testfeld Vaihingen/Enz und die Aufbereitung und Verteilung der Testdaten an die Teilnehmer verantwortlich war. Allen diesen Personen gilt ausdrücklicher Dank für ihr unermüdliches Engagement im Sinne des Projekts!

7 Literaturverzeichnis

- BALTRUSCH, S., 2010: Niederschrift über den 3. AdV Workshop „Digitaler Bildflug“ am 16. und 17. März 2010 am LGN Niedersachsen, Hannover, Vorbericht zur 23. Tagung AK Geotopographie in Schwerin, AK GT Unterlage 945, 7 Seiten.
- CRAMER, M. & HAALA, N., 2009: DGPF project: Evaluation of digital photogrammetric aerial based imaging systems – overview and results from the Pilot Centre, in Proceedings ISPRS Workshop High Resolution Earth Imaging for Geospatial Information, Leibniz Universität Hannover, June 2-5, 2009, digital auf CD, 8 Seiten.
- CRAMER, M., 2009: Digital Airborne Camera Performance – The DGPF Test, in Fritsch (ed.): Photogrammetric Week '09, Wichmann, Heidelberg, S. 51–68.
- CRAMER, M., 2007: The EuroSDR performance test for digital aerial camera systems, in Fritsch (ed.): Photogrammetric Week '07, Wichmann, Heidelberg, S. 89–106.
- CRAMER, M., 2005: 10 Years ifp Test Site Vaihingen/Enz: An Independent Performance Study, in Fritsch, D. (Ed.): Photogrammetric Week '05, Wichmann Verlag, Heidelberg, S. 79–92.
- DGPF, 2010: Projekt-Internetpräsenz, www.ifp.uni-stuttgart.de/dgpf/, letzter Zugriff 8. Juni 2010.
- HAALA, N., HASTEDT, H., WOLFF, K., RESSL, C. & BALTRUSCH, S., 2010a: Digital photogrammetric camera evaluation - generation of digital elevation models, *Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation (PFG)*, 02/2010, S. 99–116.
- HAALA, N., HASTEDT, H., RESSL, C. & WOLFF, K., 2010b: DGPF Projekt: Evaluierung digitaler photogrammetrischer Luftbildkamarasysteme – Themenschwerpunkt Höhenmodelle, In Proceedings 3-Ländertagung Wien, Juli 2010, diese Ausgabe.
- HIRSCHMÜLLER, H. & BUCHER, T., 2010: Evaluation of Digital Surface Models by Semi-Global Matching, In Proceedings 3-Ländertagung Wien, Juli 2010, diese Ausgabe.

- HONKAVAARA, E., ARBIOL, R., MARKELIN, L., MARTINEZ, L., CRAMER, M., BOVET, S., CHANDELIER, L., ILVES, R., KLONUS, S., MARSHAL, P., SCHLÄPFER, D., TABOR, M., THOM, C. & VEJE, N., 2009: Digital airborne photogrammetry – A new tool for quantitative remote sensing? – A state-of-the-art review on radiometric aspects of digital photogrammetric images, *Remote Sens.* 2009, 1(3), 577-605, verfügbar unter <http://www.mdpi.com/2072-4292/1/3/577/>, 29 Seiten, letzter Zugriff 10. Dezember, 2009.
- IGN 2010: Projekt-Internetpräsenz, <http://euosdrbenchmarkofimagematching.ign.fr/>, letzter Zugriff 8. Juni 2010.
- JACOBSEN, K., CRAMER, M., LADSTÄDTER, R., RESSL, C. & SPRECKELS, V., 2010a: DGPF project: Evaluation of digital photogrammetric camera systems – geometric performance, *Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation (PFG)*, 02/2010, S. 85–98.
- JACOBSEN, K., CRAMER, M., LADSTÄDTER, R., RESSL, C. & SPRECKELS, V. 2010b: DGPF Projekt: Evaluierung digitaler photogrammetrischer Kamerasysteme – Themenschwerpunkt Geometrie, In Proceedings 3-Ländertagung Wien, Juli 2010, diese Ausgabe.
- JUNG, A., BANNEHR, L., GLÄBER, C., GOETZE, C. & KLONUS, S., 2010: Vergleichbarkeit von zeitlich, radiometrisch und spektral unterschiedlich abbildenden Kamerasystemen, In Proceedings 3-Ländertagung Wien, Juli 2010, diese Ausgabe.
- KÖLBL, O., 2010: Überlegungen zum Dynamikbereich von digitalen, flächenbasierten Luftbildkamarasystemen vom Testflug Vaihingen/Enz, In Proceedings 3-Ländertagung Wien, Juli 2010, diese Ausgabe.
- PASSINI, R. & JACOBSEN, K., 2008: Accuracy analysis of large size digital aerial cameras, in Proceedings ISPRS Congress Beijing 2008, Volume XXXVII, Part B1, Commission I, WG I/4, S. 507–513.
- MARTÍNEZ, L., ARBIOL, R., PALÀ, V. & PÉREZ, F., 2007: Digital Metric Camera radiometric and colorimetric calibration with simultaneous CASI imagery to a CIE Standard Observer based colour space. In Proceedings of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Barcelona, Spain, 23.-28. Juli.
- SCHÖNERMARK VON, M., 2010: Status report about the evaluation of the radiometric properties of digital photogrammetric airborne cameras, *Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation (PFG)*, 02/2010, S. 131–140.
- SPRECKELS, V. & SCHLIENKAMP, A., 2010: DGPF Projekt: Evaluierung digitaler photogrammetrischer Kamerasysteme – Themenschwerpunkt Stereoplotting, In Proceedings 3-Ländertagung Wien, Juli 2010, diese Ausgabe.
- WASER, L. T., KLONUS, S., EHLERS, M. KÜCHLER, M. & JUNG, A., 2010: Potential of digital sensors for land cover and tree species classifications - a case study in the framework of the DGPF-project, *Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation (PFG)*, 02/2010, S. 141–152.

DGPF Projekt: Evaluierung digitaler photogrammetrischer Kamerasysteme – Themenschwerpunkt Geometrie

KARSTEN JACOBSEN¹, MICHAEL CRAMER², RICHARD LADSTÄDTER³, CAMILLO RESSL⁴, VOLKER SPRECKELS⁵

Zusammenfassung: Das geometrische Potential digitaler Luftbildkameras, auch unter Berücksichtigung der direkten Sensororientierung, wurde im Rahmen eines Tests der DGPF untersucht. Dieser Test schließt folgende Kameras ein: die großformatigen Kameras Z/I Imaging DMC, Vexcel Imaging UltraCamX und die Zeilenkameras Leica Geosystems ADS40 (2. Generation) und Jena Optronik JAS-150, sowie die Mittelformatkamera Rolleimetric AIC-x1 und die Kombination von vier Mittelformatkameras IGI Quattro-DigiCAM.

Die hier präsentierten Ergebnisse wurden von einer Gruppe wissenschaftlicher Mitarbeiter verschiedener Universitäten mit unterschiedlichen Datenerfassungsprogrammen, unterschiedlichen Blockausgleichsprogrammen, unterschiedlichen Konfigurationen der Ausgleichungen (mit/ohne Verwendung von Projektionszentrumskordinaten bzw. Winkelinformation) und unterschiedlicher Passpunktconfiguration erzeugt. Diese Ergebnisse geben daher einen Überblick über die Variation der Lösungen und Genauigkeiten, die auch in operationeller Anwendung gegeben ist. Bei den einzelnen Bündelblockvarianten ist die erreichte Lagegenauigkeit durchweg besser als die Objektpixelgröße. Selbst die Höhengenaugigkeit bleibt meist unter diesem Wert. Diese hohen Genauigkeiten sind in der Bündelblockausgleichung möglich, da dort jeder Punkt über eine Vielzahl von Bildern bestimmt wird.

1 Einleitung

Digitale Luftbildkameras haben analoge Kameras bereits weitgehend ersetzt. Die ersten eingeführten Kameras, die Zeilenkamera Leica Geosystems ADS40 und die großformatigen Flächenkameras Z/I Imaging DMC und Vexcel Imaging UltraCam wurden bereits modifiziert. Als weitere Mehrfachzeilenkamera kam die Jena Optronik JAS-150 hinzu. Digitale Mittelformatkameras als Einzelkopf- oder Mehrkopfsysteme, wie die Rolleimetric AIC-x1 (Einkopfsystem) oder die IGI Quattro-DigiCAM (4-Kopfsystem), haben bereits einen Marktanteil erobert. Das geometrische Potential dieser Kameras wurde im Rahmen des Kameratests der DGPF (Cramer 2010) durch Bündelblockausgleichung untersucht, wobei die ganze Bandbreite der Praxisanwendungen eingesetzt wurde, wie nur auf Passpunkten basierend, mit Kombination von Koordinaten der Projektionszentren oder auch mit Kombination von

1)Dr.-Ing. KARSTEN JACOBSEN, Leibniz Universität Hannover, Institut für Photogrammetrie und Geoinformation, D-30167 Hannover, Nienburger Str. 1, e-mail: jacobsen@ipi.uni-hannover.de

2)Dr.-Ing. MICHAEL CRAMER, Universität Stuttgart, Institut für Photogrammetrie (ifp), D-70174 Stuttgart, Geschwister-Scholl-Straße 24 D, e-mail: michael.cramer@ifp.uni-stuttgart.de

3)Dr.-techn. RICHARD LADSTÄDTER, Vexcel Imaging GmbH / Microsoft Photogrammetry, Anzengruebergasse 8/4, A-8010 Graz, e-mail: rladstae@microsoft.com

4)Dr.-techn. CAMILLO RESSL, Technische Universität Wien, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, A-1040 Wien, Gußhausstraße 27-29, e-mail: car@ipf.tuwien.ac.at

5)VOLKER SPRECKELS, RAG Deutsche Steinkohle, BG G2 Geodatenmanagement, D-44623 Herne Shamrockring 1, e-mail: volker.spreckels@rag.de

Winkeln und Projektionszentren, bestimmt durch relative kinematische GPS-Positionierung und integrierte Sensororientierung.

Bislang wurde eine Reihe von Untersuchungen der geometrischen Leistung der digitalen Kameras durchgeführt und publiziert. Es gibt aber nur wenige Untersuchungen, die das Genauigkeitspotential verschiedener Kameras vergleichen, wie Passini & Jacobsen 2008, die die DMC, UltraCamD, UltraCamX, ADS40 und RC30 Bilddaten mit einer Objektpixelgröße von etwa 5cm untersuchen. Der Test der DGPF umfasst auch die JAS-150, eine Mittelformatkamera (AIC-x1) und eine Kombination von Mittelformatkameras (Quattro-DigiCAM). Für alle Systeme liegen Bilddaten mit nominellen Objektpixelgrößen von 8cm und mit Ausnahme der AIC-x1 auch 20cm vor.

Es werden hier nur die durch Blockausgleichung und kombinierte Blockausgleichung ermittelten Objektkoordinaten mittels unabhängiger Vergleichspunkte untersucht. Sie basieren auf einer Vielzahl von Bildern und dürfen damit nicht mit der Objektpunktgenauigkeit einer Modellmessung, die jeweils nur auf zwei Bilder beruht, verwechselt werden.

2 Aerotriangulation - Datenerfassung

Im Rahmen des DGPF-Projekts wurden die Verknüpfungspunkte mittels verschiedener Programme der automatischen Aerotriangulation bestimmt und die Bildkoordinaten der Pass- und Vergleichspunkte unabhängig manuell gemessen. Die Kamerahersteller hatten Zugriff auf 19 Passpunkte um ihre Datensätze zu kontrollieren, bevor die Daten an die Teilnehmer des Tests weitergegeben wurden. Damit war eine Optimierung der Nachbearbeitung der Sensordaten und der virtuellen Bilder durch die Kamerahersteller möglich. Dieses ist normalerweise für kommerzielle Projekte nicht der Fall und sollte bei der Bewertung der Ergebnisse berücksichtigt werden.

2.1 Teilnehmende Institutionen und untersuchte Datensätze

Kamerasystem	Universität Hannover (UH)	Universität Stuttgart (US)	TU Graz (TUG)	TU Wien (TUW)	RAG Herne (RAG)
RMK	X	X	X	X	
DMC	X	X		X	
UltraCamX	X	X		X	
Quattro-DigiCAM	X	X	X		
ADS40	X	X			
JAS-150					X
AIC-x1	X	X			

Tab. 1: Von den teilnehmenden Institutionen untersuchte Datensätze

Die vorgestellten Ergebnisse wurden durch die Leibniz Universität Hannover (UH), Universität Stuttgart (US), Technische Universität Graz (TUG), Technische Universität Wien (TUW) und die RAG Deutsche Steinkohle (RAG) in Herne (JAS-150 Bündelblockausgleichung) untersucht. Das schließt Datensätze ein, die durch die Universität Düsseldorf (Uni D), die Bayerische

Vermessungsverwaltung LVG München (LVG M) und die Firma C+B Technik Markgröningen erfasst wurden.

2.2 Manuelle Bildkoordinatenmessung

Die Bildkoordinaten der Pass- und Vergleichspunkte wurden unabhängig von verschiedenen Teilnehmern gemessen. Ihre Genauigkeit ist von der Erfahrung des Operateurs abhängig und bestimmt wesentlich die durch Ausgleichung erzielten Ergebnisse. Abbildung 1 zeigt die Quadratmittel der Widersprüche der Bildkoordinaten ermittelt durch jeweils 2 verschiedene Teilnehmer, die durch 1.414 dividiert wurden um auf die Standardabweichung der Einzelmessung zu kommen. Da einige Datensätze häufiger unabhängig voneinander gemessen wurden, ergeben sich für einige Kameras mehrere Werte. Im Wesentlichen wird die Punkteinstellgenauigkeit von der Bildqualität und der Erfahrung des Auswerter, aber auch der Kenntnis des Testfeldes bestimmt. Die Punktidentifizierung in den RMK-Bildern, besonders mit 20cm Objektpixelgröße, ist schwieriger als in den digitalen Bildern. Die geringfügig höheren Werte für die DigiCam konzentrieren sich auf einen Auswerter, während die Erklärung der Messungsergebnisse für die UltraCamX schwierig ist – der gleiche Auswerter erzielte mit anderen Kameras bessere Ergebnisse, es kann sich aber auch um einen Lernprozess handeln. Diese Variationen der Bildkoordinatenmessungen beeinflussen auch die durch Blockausgleichung erzielten Ergebnisse.

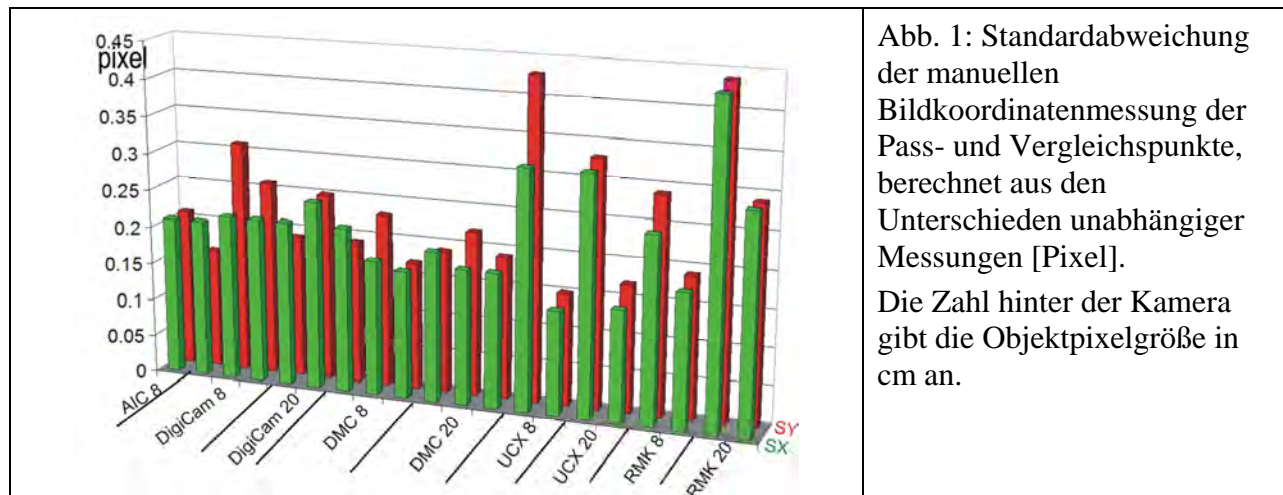


Abb. 1: Standardabweichung der manuellen Bildkoordinatenmessung der Pass- und Vergleichspunkte, berechnet aus den Unterschieden unabhängiger Messungen [Pixel].

Die Zahl hinter der Kamera gibt die Objektpixelgröße in cm an.

3 Selbstkalibrierung, systematische Bildfehler

Das mathematische Modell der Bündelblockausgleichung basiert auf perspektiven Bildern. Die tatsächliche Bildgeometrie weicht davon geringfügig ab. Die geometrischen Abweichungen werden üblicherweise durch Selbstkalibrierung mit zusätzlichen Parametern bestimmt. Das setzt voraus, dass die benutzten zusätzlichen Parameter in der Lage sind, die geometrischen Abweichungen ausreichend genau zu modellieren. Die stark verknüpften Testblöcke erlauben die

Abschätzung der systematischen Bildfehler oder der verbliebenen Beträge aus der Überlagerung und lokalen Mittelung der Residuen der Bildkoordinaten einer Bündelblockausgleichung.

Es wurden verschiedene Sätze zusätzlicher Parameter verwendet. Diese können rein mathematisch gerechtfertigt werden, wie die 12 Ebner-Parameter (EBNER 1976), die systematische Bildfehler in einem Gitter von 3 x 3 Bildpunkten beseitigen und die 44 Grün-Parameter (GRÜN 1976), die den Ansatz auf 5x5 Bildpunkte erweitern oder physikalisch begründet sein. Die Ebner-Parameter haben sich für digitale Bilder als nicht ausreichend erwiesen (WU 2007). Die Grün-Parameter führen zu besseren Ergebnissen, haben aber eine recht hohe Anzahl von Unbekannten. Die TU Wien erweiterte den Ebner-Ansatz um 2 radialsymmetrische und 2 tangentielle zusätzliche Parameter, die im Folgenden mit Ebner+4 bezeichnet sind. Brown führte 1971 physikalisch begründete Parameter ein (BROWN 1971), sie wurden 1976 durch Jacobsen im Programmsystem BLUH erweitert (JACOBSEN 2007). Physikalisch begründete Parameter sind auch in den Programmen DGAP (Universität Stuttgart), Orient (TU Wien) und PhoBA (TU Graz) vorhanden. Eine Erweiterung der zusätzlichen Parameter für Systemkameras, wie die DMC und UltraCam und zusätzlich auch für großflächige CCDs erfolgte in BLUH (JACOBSEN et al. 2010).

Anstelle von zusätzlichen Parametern können auch Korrekturgitter verwendet werden, die auf überlagerten und in Teilflächen gemittelten Residuen einer vorangegangenen Bündelblockausgleichung beruhen. Diese Korrekturgitter sollten gefiltert werden um den Einfluss individueller Fehler zu vermeiden. Diese Vorgehensweise ist mit BLUH und der Intergraph Software (DÖRSTEL 2007) möglich. Die Methode eignet sich gut zur Untersuchung von Bildern unbekannter Geometrie, ist aber wegen der hohen Anzahl von Unbekannten für den praktischen Einsatz nicht unproblematisch.

Die Stabilität der Bildgeometrie innerhalb eines Blockes lässt sich durch Aufteilung der Bilder in zwei nach der Aufnahmezeit sortierten Gruppen untersuchen, für die die Selbstkalibrierung mit zwei Gruppen zusätzlicher Parameter berechnet wird. Es zeigten sich innerhalb der untersuchten Datensätze keine signifikanten Unterschiede, womit von unveränderten systematischen Bildfehlern innerhalb der Datensätze ausgegangen werden kann (JACOBSEN U.A. 2010).

4 Bündelblockausgleichungen

Die Tabellen 2 und 3 geben einen Überblick über die von den Teilnehmern benutzten Auswertestrategien. Für die verschiedenen Kamerasysteme wurden verschiedene Sätze zusätzlicher Parameter und unterschiedliche Passpunktkonfigurationen benutzt, wie auch Blockausgleichungen ohne Zusatzinformationen, mit Koordinaten der Projektionszentren und auch integrierte Bündelblockausgleichungen mit der vollständigen Information der Sensororientierungen. Die Ergebnisse dieser Varianten sind in Kurzform den graphischen Darstellungen (Abb. 2 – 7) beigelegt.

Die Leibniz Universität Hannover führte die Blockausgleichungen ohne Zusatzinformationen durch um die Einflüsse der Bildgeometrie nicht mit den Einflüssen der direkten Sensororientierung zu vermischen. Die Zeilenscanneraufnahmen müssen allerdings immer unter Verwendung der GPS/inertial Daten ausgewertet werden. Dieses bringt auch große Vorteile für die nicht zu einem virtuellen Bild vereinigten Teilkameras der Quattro-DigiCAM.

Kamera-system	Institution	Datenerfassung	Bündelprogramm	zusätzliche Parameter	GPS / ISO	#PP 8cm/20cm	#VP 8cm/20cm
DMC	UH	Match-AT (LVG M)	BLUH	12	nein	9/9	45/95
	US	Match-AT	Match-AT	44 (Grün)	ISO	4/4	113/180
	TUW	Match-AT	Orient	Ebner+4	GPS	8/8	52/99
UCX	UH	Match-AT (LVG M)	BLUH	12	nein	9/9	99/99
	US	Match-AT	PAT-B DGAP	44 (Grün)	ISO	4/4	111/180
	TUW	Match-AT	Orient	Ebner+4	GPS	8/8	52/99
RMK-Top15	UH	Match-AT (LVG M)	BLUH	1: 0 2: 12	nein	14/14	40/82
	US	Match-AT	Match-AT	1: 0 2: 12 (Eb.) 3: 44 (Gr.)	nein	14/14	107/172
	TUW	Match-AT	Orient	Ebner+4	GPS	8/8	49/93
	TUG	ISAT	PhoBA	5 (Brown subset)	1+2: GPS 3: nein	59/82 5/5 5/5	56/67 110/77 110/77
Quattro-Digi-CAM	UH	ERDAS	BLUH	1: 4x12 2: 4x20	nein	10/15	28/91
	US	Match-AT	Match-AT	4x12 (Ebner)	ISO	4/4	114/161
	TUG	Match-AT (IGI)	PhoBA	5 (Brown subset)	1+2: ISO 3: nein	57/10 4 5/5 5/5	56/69 108/168 108/168
AICx1	UH	Uni Düsseldorf	BLUH	1: 0 2: 12 3: 20	nicht vorhanden	47/-	10/-
	US	Match-AT	Match-AT	44 (Grün)		60/-	50/-

Tab. 2: Konfigurationen der Bündelblockausgleichungen der Flächenkameras; #PP=Anzahl der Passpunkte, #VP=Anzahl der unabhängigen Vergleichspunkte, Eb.=Ebner Parameter, Gr.=Grün Parameter, ISO=integrierte Sensororientierung

Die TU Wien bevorzugte die kombinierte Blockausgleichung mit Koordinaten der Projektionszentren, dieses hatte Vorteile gegenüber der integrierten Sensororientierung (mit Koordinaten der Projektionszentren und der Winkel bestimmt durch GPS und inertielle Meßsysteme (IMU)) der Universität Stuttgart und der TU Graz. Die Blöcke haben eine große Bildüberdeckung, sind so stark verknüpft und nicht groß genug, damit eine Verbesserung durch Einbeziehung der Winkel eintritt. Es sollte berücksichtigt werden, dass die verschiedenen Kamerasysteme auch unterschiedliche GPS-Empfänger und unterschiedliche IMU verwendeten, was die Ergebnisse beeinflusst. Die Universität Stuttgart führte im Gegensatz zu den anderen

Teilnehmern Blockausgleichungen ohne Querstreifen durch, was Anwendungsszenarien entspricht, bei denen keine Querstreifen vorhanden sind.

Der Vorteil der integrierten Sensororientierung ist für die untersuchten Testblöcke, die eine starke Überdeckung und eine eingeschränkte Größe haben, eingeschränkt. Dieses kann für große Blöcke anders sein.

Kamera-system	Institution	Daten-erfassung	Programm	Zusätzliche Parameter	#PP 8cm/20cm	#VP 8cm/20cm
ADS40	UH	GPRo	ORIMA	0	9/-	52/-
	US	GPRo	ORIMA	6	4/4	121/182
JAS-150	RAG	Jena Optronik Software	BINGO	12	1: 0/0 2: 4/4 3: 19/19	75/105 71/101 56/85

Tab. 3: Konfigurationen der Bündelblockausgleichungen der Zeilenkameras

p60 / p80	60% / 80% Längsüberdeckung	apE12	12 zusätzliche Parameter (Ebner)
q20	20% Querüberdeckung	apE16	12 Ebner + 2 radial + 2 tang.
cr0 / cr2	0 / 2 kreuzende Streifen	apG44	44 zusätzliche Parameter (Grün)
nDS	keine direkte Sensororientierung	apB12	12 zusätzliche Parameter (BLUH)
GPS	Kombinierte Ausgleichung mit GPS	apB20	(BLUH) apB12+Parameter 81–88
ISO	Integrierte Sensororientierung	apBN12	12 zus. Parameter (BINGO)
Oap	Keine Selbstkalibrierung	apBRs	Brown subset mit 5 Parametern

Tab. 4: Abkürzungen zur Erläuterung der Auswertungen

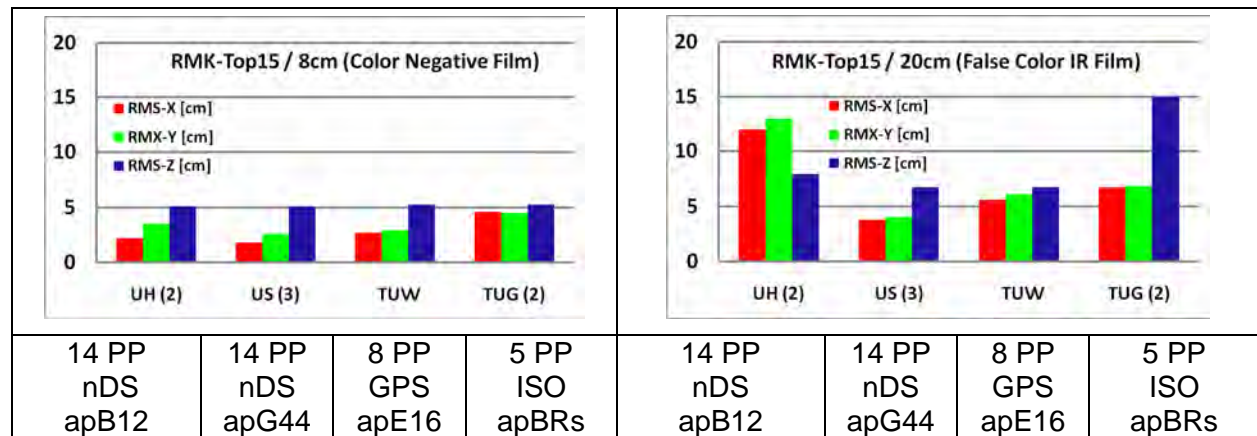


Abb. 2: Quadratmittel der Widersprüche an Vergleichspunkten RMK-Top15 (p60, q60, cr2) Angabe vor / nach der Kamerabezeichnung in Abb. 2 – 7 = Objektpixelgröße

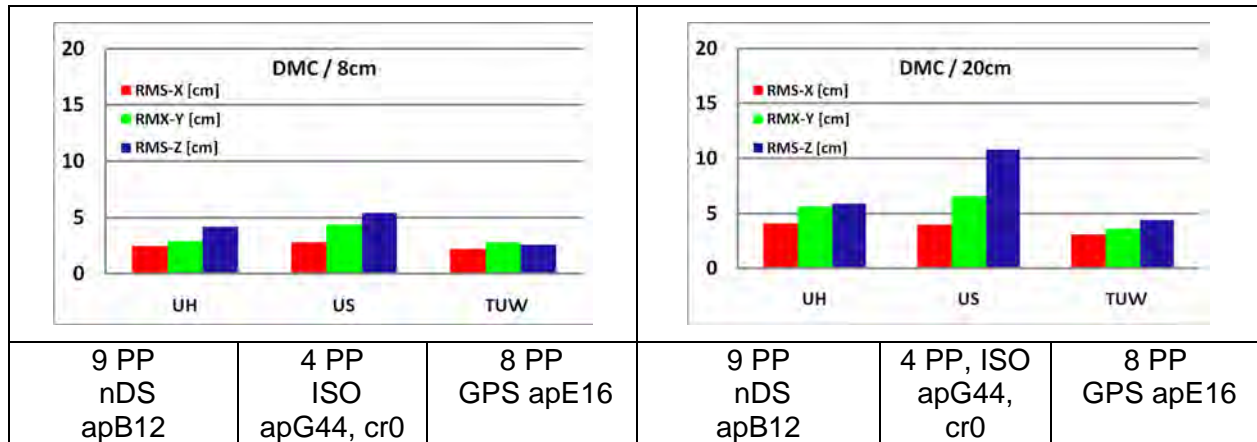


Abb. 3: Quadratmittel der Widersprüche an Vergleichspunkten DMC (p60, q60, cr2)

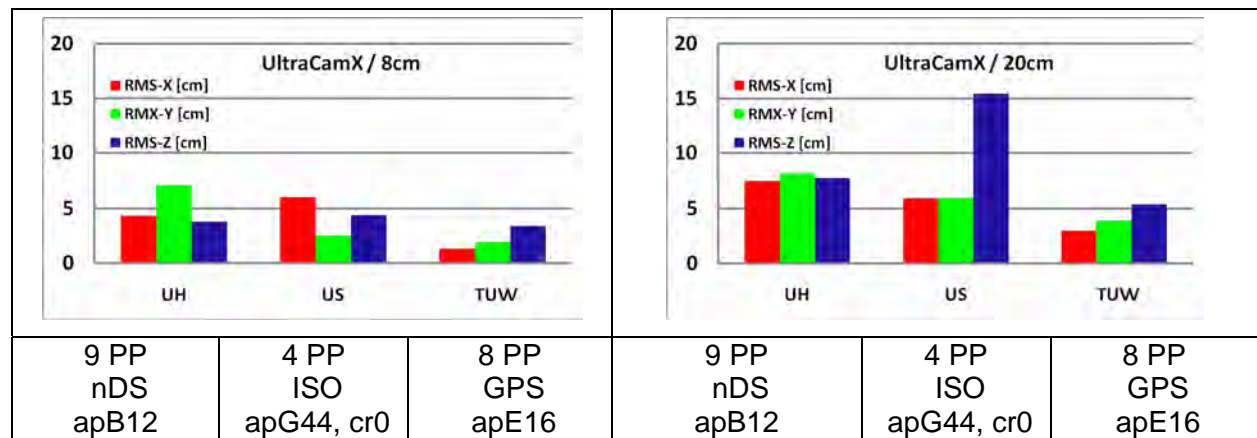


Abb. 4: Quadratmittel der Widersprüche an Vergleichspunkten UltraCamX (p80, q60, cr2)

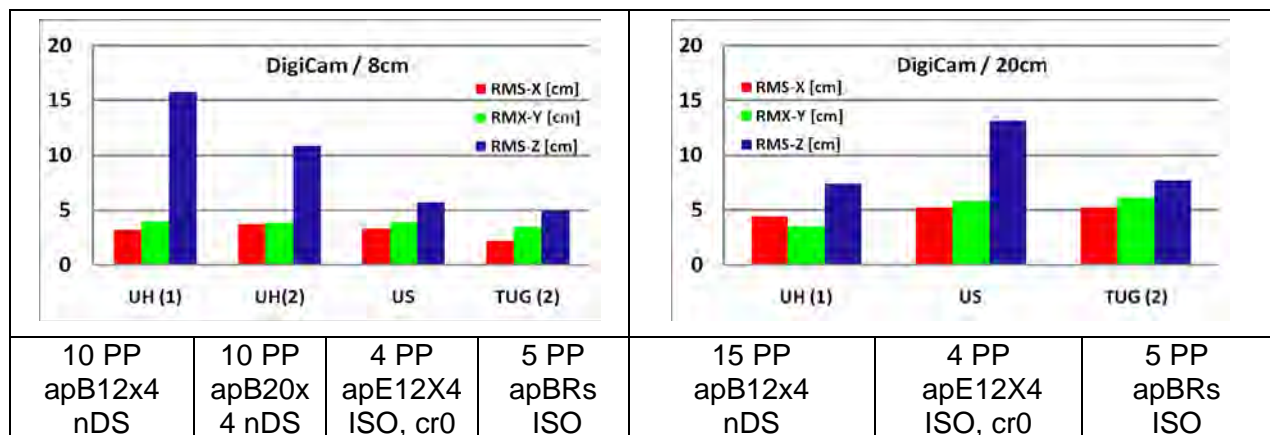


Abb. 5: Quadratmittel der Widersprüche an Vergleichspunkten Quattro-DigiCAM (p60, q60)

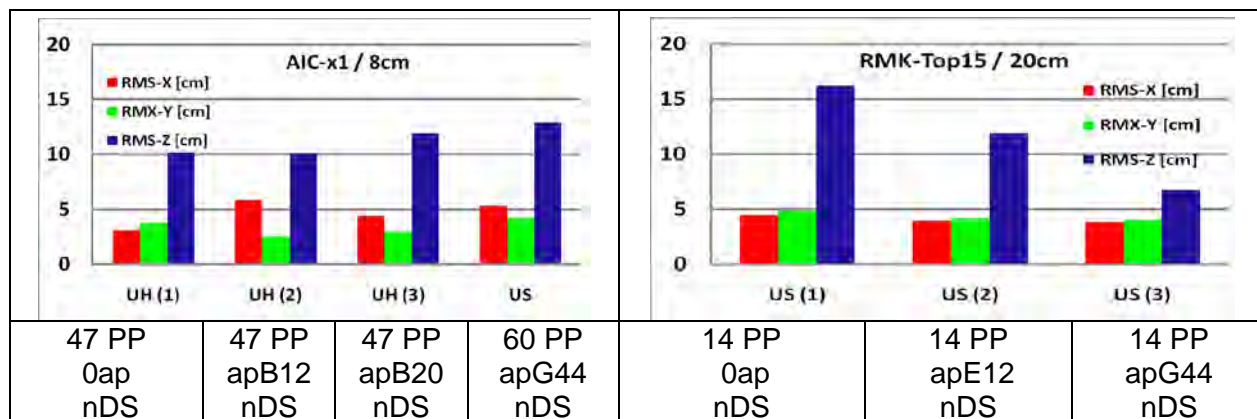


Abb. 6: Quadratmittel der Widersprüche an Vergleichspunkten AIC-x1 (links, cr0) and RMK-Top15 (mit unterschiedlichen zusätzlichen Parametern)

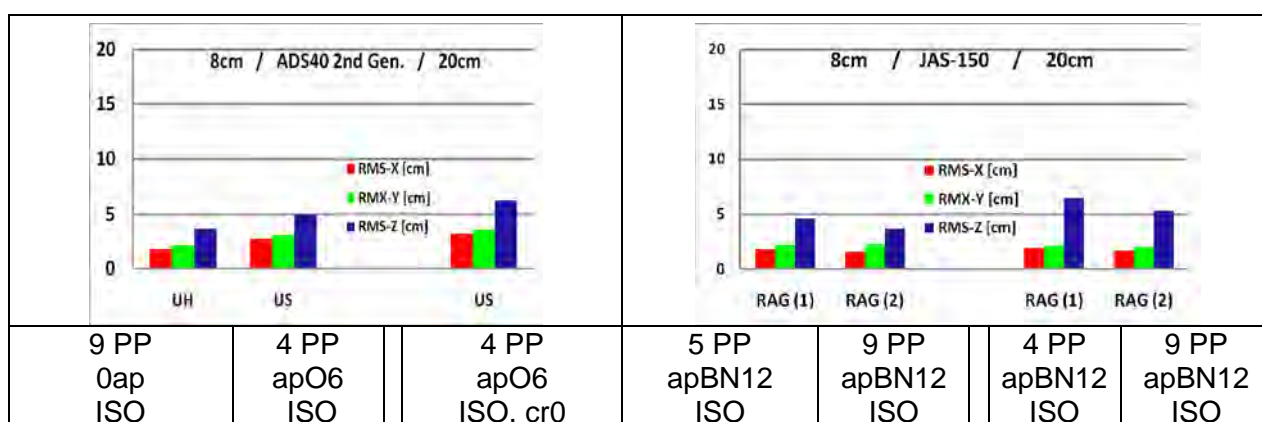


Abb. 7: Quadratmittel der Widersprüche an Vergleichspunkten ADS40 (links) und JAS-150 (rechts) apBN12 = 12 zusätzliche Parameter Programm BINGO

Der Einfluss der zusätzlichen Parameter auf die Blockausgleichung von RMK-Top 15-Aufnahmen ist in Abb. 6 rechts klar erkennbar. Für die digitalen Kameras trifft das auch, allerdings nicht immer ganz so stark, zu. Besonders die Höhe wird durch nicht erfasste radialsymmetrische Bildfehler beeinflusst, die durch die Ebner-Parameter nicht ausreichend kompensiert werden. Mit den 44 Grün-Parametern ist das möglich und führt zu deutlich verbesserten Ergebnissen. Die oben gezeigten Ergebnisse der Universität Stuttgart sind, mit Ausnahme der Quattro-DigiCAM, mit den Grün-Parametern berechnet. Die TU Wien erweiterte die Ebner-Parameter um zwei radialsymmetrische und zwei tangentielle Parameter. Diese Parameter sind im Programm BLUH bereits im Standardsatz der zusätzlichen Parameter enthalten, womit keine entsprechenden Probleme auftreten. Die TU Graz konnte bereits mit 5 Brown-Parametern die Bildgeometrie ausreichend beschreiben. Bei der DigiCAM (Abb. 5 links) ließen sich die Ergebnisse durch spezielle zusätzliche Parameter, die die Geometrie der Bildecken erfassen (JACOBSEN ET AL. 2010), deutlich verbessern.

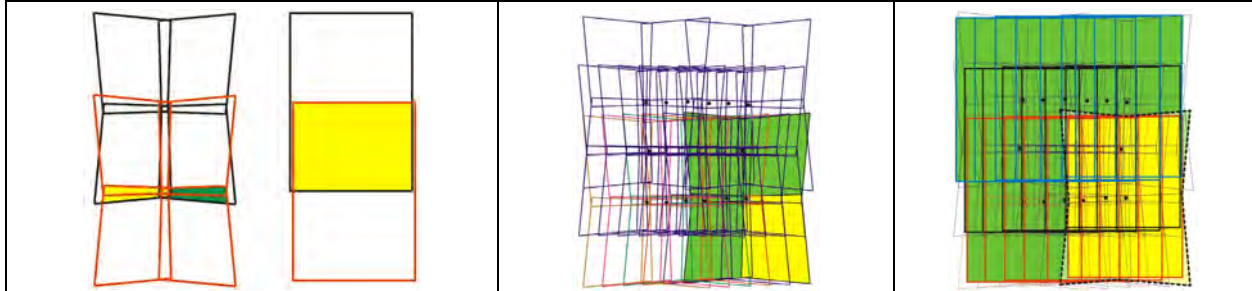


Abb. 8: Überlappung und Bildverknüpfung einer Vierfach-Bildkombination; Links: Verknüpfung einer Vierfach-Bildkombination und von virtuellen Bildern mit 60% System-Querüberdeckung; Mitte: Verknüpfung einer Vierfach-Bildkombination mit 60% Längs- und 60% Querüberdeckung des Kamerasystems; Rechts: Verknüpfung von virtuellen Bildern mit 60% Längs- und 60% Querüberdeckung des Kamerasystems

Der Einfluss der Sensororientierungsparameter ist stark von der Blockkonfiguration und der Anzahl der Passpunkte abhängig. Die simultan aufgenommenen Teilbilder der Quattro-DigiCAM sind nicht zu virtuellen Bildern vereinigt, sondern werden als Einzelbilder gehandhabt. Wie Abb. 8 zeigt, wirkt 60% Querüberdeckung des Kamerasystems nur wie 20% Querüberdeckung der Einzelbilder. Diese Vierfach-Bildkombination ist deswegen auf die Verwendung der GPS/inertial Daten angewiesen, wenn nur eine normale Anzahl von Passpunkten vorhanden ist.

Die Standardabweichung der in Abb. 1 gezeigten manuellen Messung der Pass- und Vergleichspunkte demonstriert den starken Einfluss der Punktidentifizierung in den Bildern, was sich direkt auf die Ergebnisse der Blockausgleichungen auswirkt. Besonders in den RMK Top15-Bilder mit 20cm Objektpixelgröße ist die genaue Identifizierung der Punkte in den Bildern schwierig – hier hatte der Auswerter der Universität Stuttgart den Vorteil der Lagekenntnis. Aus den anderen Datensätzen mussten einige Bildpunkte wegen grober Fehler entfernt werden.

Wegen schlechter Wetterbedingungen konnten mit der Rolleimetric AIC-x1 (jetzt umbenannt in Trimble Aerial Camera) nur Bilder mit 8cm Objektpixelgröße und 60% Querüberdeckung aufgenommen werden. Die vorgesehenen Querstreifen entfielen ebenfalls. Die Aufnahmebedingungen entsprachen gezielt einer Niedrig-Kosten-Version mit einem kleinen Flugzeug ohne Kamerastabilisierung und ohne zusätzliche GPS / IMU-Komponente. Dieses führte zu starken Variationen der Orientierungselemente von ± 4 gon für Phi, ± 11 gon für Omega und ± 5 gon für Kappa. So wurde für den nördlichsten Flugstreifen nur eine Querüberdeckung von 40% anstelle der vorgesehenen 60% erreicht. Wegen der fehlenden Querstreifen und nicht vorhandener Sensororientierung waren viele Passpunkte erforderlich. Die großen systematischen Bildfehler beeinflussen die Blockausgleichung nicht, sondern nur die anschließende Modellauswertung, wenn die systematischen Bildfehler nicht berücksichtigt werden. Für die nicht optimalen Rahmenbedingungen sind die in Abb. 6 dargestellten Ergebnisse zufriedenstellend, sie können aber nicht direkt mit den Resultaten der anderen Kameras verglichen werden. Für einen operationellen Einsatz ist eine bessere Einhaltung des

vorgesehenen Bildfluges und Sensororientierungsparameter – zumindest Koordinaten der Projektionszentren – empfehlenswert.

Die Objektpunktbestimmungen mit den Mehrfachzeilenscannern ADS40 und JAS150 ergaben ein sehr gutes Genauigkeitsniveau. Mit beiden Systemen wurden sehr ähnliche Genauigkeiten erzielt (Abb. 7), die auf dem gleichen, teilweise einem höheren, Genauigkeitsniveau liegen wie die großformatigen digitalen Flächenkameras. Mit der JAS-150 und der ADS40 wurden sowohl für die Aufnahmen mit 8cm, als auch 20cm Objektpixelgröße ähnliche Genauigkeiten an unabhängigen Vergleichspunkten erzielt, was so nicht erwartet wurde. Ähnlich wie für die anderen Datensätze, sollten die erzielten Ergebnisse noch durch weitere Testflüge bestätigt werden.

5 Schlussfolgerungen

Es gibt keinen Grund analoge anstelle von original digitalen Luftbildern zu verwenden. Selbst mit der Weitwinkelkamera RMK Top 15 wurde unter vergleichbaren Bedingungen nicht die gleiche Objektpunkthöhen Genauigkeit erreicht, wie mit den großformatigen digitalen Kameras. Zusätzlich bereitete die schlechtere Bildqualität der gescannten analogen Bilder mit 20cm Objektpixelgröße Probleme bei der Identifizierung von Pass- und Vergleichspunkten. Dies ist auch für eine folgende Erstellung von digitalen Höhenmodellen und für Modellauswertungen von Bedeutung.

Die Mehrfachzeilenkameras ADS40 und JAS-150 führten zu guten Ergebnissen. Die Handhabung der Datenerfassung und der Bildorientierung von Zeilenscannerkameras erfordert spezielle Programme, die nicht überall vorhanden sind.

Die großformatigen digitalen Flächenkameras DMC und UltraCamX bestätigten ihr Potential. Die Bildgeometrie ist im Fall der kombinierten oder integrierten Blockausgleichung mit der Qualität der benutzten Sensororientierungen vermischt. Das ist aber auch realistisch für den praktischen Einsatz in großen Blöcken. Die Kombination von Mittelformatkameras in der Quattro-DigiCAM erfordert GPS/inertial Daten, da die Verknüpfung der Einzelbilder im Fall von 60% Querüberdeckung des Kamerasystems nicht ausreichend ist. Auch die Mittelformatkamera AIC-x1 ist für spezielle Anwendungen von Bedeutung; die Auswertung ihrer Bilder ist allerdings zeitaufwändiger als die Auswertung mit größeren Bildformaten.

Allgemein wurde eine Objektkoordinatengenauigkeit kleiner als die Objektpixelgröße erreicht, besonders für die Lagekomponenten, aber auch in den meisten Fällen für die Höhe. Dieses sollte nicht mit der Auswertegenauigkeit im photogrammetrischen Einzelmodell verwechselt werden da für die Blockausgleichung sehr viel mehr Bilder für die Bestimmung eines Objektpunktes benutzt werden. Die Anzahl der Bilder je Punkt variiert zwischen durchschnittlich 3.2 für die AIC-x1 und 10.6 für die UltraCamX, die mit 80% Längsüberdeckung eingesetzt wurde. Zusätzlich sind nicht alle Auswerteprogramme in der Lage die systematischen Bildfehler für die Modellauswertung zu benutzen, was sich besonders auf die Objekthöhen auswirkt.

6 Literaturverzeichnis

- BROWN, D.C., 1971: Close-range camera calibration, *Photogrammetric Engineering* 37(8), pp 855-866.
- CRAMER, M., 2010: Der DGPF-Test zur Evaluation digitaler Luftbildkameras – Überblick und Testdesign, 3-Ländertagung 2010 der DGPF, OVG und SGPBF in Wien
- DÖRSTEL, C., 2007: DMC – (r)evolution on geometric accuracy, in Fritsch, D. (ed.): *Photogrammetric Week '07*, Wichmann Verlag, pp. 81-88.
- EBNER, H., 1976: Self Calibration Block Adjustment, *BuL* 1976, pp. 128-139.
- GRÜN, A., 1976: Die simultane Kompensation systematischer Fehler mit dem Münchener Bündelprogramm MBOP, Presented Paper ISP Congress Helsinki 1976.
- JACOBSEN, K., 2007: Geometric handling of large size digital airborne frame camera images, *Optical 3D Measurement Techniques VIII*, Zürich 2007, pp. 164 – 171.
- JACOBSEN, K., CRAMER, M. LADSTÄDTER, R., RESSL, C., SPRECKELS, V., 2010 DGPF-Project: Evaluation of Digital Photogrammetric Camera Systems - Geometric Performance, PFG 02/2010
- PASSINI, R., JACOBSEN, K., 2008: Accuracy analysis of large size digital aerial cameras, *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXVII, Part B1 (WG I/4) pp 507-51
- WU, DUN, (2007): Geometric aspects of large size digital frame cameras and their use for photogrammetric data acquisition, Diplomarbeit, Leibniz Universität Hannover, <http://www.ipi.uni-hannover.de> (letzter Zugriff: Mai 2010)

DGPF Projekt: Evaluierung digitaler photogrammetrischer Luftbildkamarasysteme - Themenschwerpunkt Höhenmodelle

NORBERT HAALA¹, HEIDI HASTEDT², CAMILLO RESSL³, KIRSTEN WOLF⁴,

Zusammenfassung: Ein zentraler Punkt des DGPF-Projektes zur Evaluierung digitaler photogrammetrischer Luftbildkamarasysteme war die Qualitätsanalyse der photogrammetrischen 3D Erfassung mittels automatischer Bildzuordnung. Die Bewertung der Genauigkeit und Zuverlässigkeit der aus den Bilddaten des Projektes generierten 3D Daten erfolgte durch Vergleich zu terrestrischen Referenzmessungen und flugzeuggestützt erfassten LiDAR Daten. Zusätzlich wurde die Nutzbarkeit der Höhendaten für Anwendungen beispielsweise im Kontext der 3D Stadtmodellierung und Forstwirtschaft untersucht. Der eingereichte Beitrag fasst die Ergebnisse der Arbeitsgruppe Genauigkeit der Höhenmodellgenerierung zusammen und dokumentiert so den aktuellen Stand der Entwicklungen im Hard- und Softwarebereich.

1 Einleitung

Großer Dynamikbereich und gutes Signal-Rauschverhalten im Vergleich zu gescannten analogen Luftbildern sind bekannte Vorteile digitaler photogrammetrischer Luftbildkamaras. Diese Eigenschaften digitaler Bilder sind entscheidend für die erreichbare Genauigkeit und Zuverlässigkeit automatischer Bildzuordnungsverfahren. Die Qualität von aus Bildzuordnung erzeugten photogrammetrischen Produkten wie digitale Höhenmodelle kann somit in erheblichem Maß vom Einsatz digitaler Kamerasysteme profitieren. Dies sollte anhand des umfangreichen Datenmaterials des DGPF Projektes untersucht werden. Hierfür wurde innerhalb des Projektes zur *Evaluierung digitaler photogrammetrischer Luftbildkamarasysteme* eine Arbeitsgruppe *Höhenmodelle* etabliert, deren Ergebnisse die Grundlage dieses Artikels bilden und zusammenfassend dargestellt werden.

Für die vorgestellten Untersuchungen wurden die kommerziellen Auswertepakete Next Generation Automatic Terrain Extraction (NGATE) von BAE Systems [DEVENECIA, ET. AL, 2007], MATCH-T DSM der INPHO GmbH [LEMAIRE, 2008] und SATellite image Precision Processing (SAT-PP) der ETH Zürich [ZHANG & GRUEN, 2004] verwendet. Solche Programmsysteme zur bildbasierten Generierung von Höhenmodellen sind teilweise schon mehr als zwei Jahrzehnten auf dem Markt, wurden in der letzten Zeit jedoch erheblich weiterentwickelt, um neben der traditionellen Stereobildzuordnung eine hochredundante Mehrfachbildzuordnung für eine dichte Erzeugung von 3D Daten zu nutzen. Dadurch lassen sich insbesondere stark überlappende Bildverbände, wie sie durch digitale Kamerasysteme erfasst werden, effektiv auswerten.

¹ Norbert Haala, Institut für Photogrammetrie, Universität Stuttgart, Geschwister-Scholl-Str. 24D, 70174 Stuttgart; E-Mail: Norbert.Haala@ifp.uni-stuttgart.de

² Heidi Hastedt, Fachhochschule Wilhelmshaven/Oldenburg/Elsfleth, Institut für Angewandte Photogrammetrie und Geoinformatik, Ofener Str. 16/19, D-26121 Oldenburg, heidi.hastedt@jade-hs.de

³ Camillo Ressler, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, Technische Universität Wien, 1040 Wien, Gußhausstraße 27 - 29, car@ipf.tuwien.ac.at

⁴ Kirsten Wolf swisstopo, Seftigenstrasse 264, CH-3084 Wabern, kirsten.wolff@swisstopo.ch

Der Einfluss der Bildqualität auf das Ergebnis der Höhenmodellgenerierung war ein Schwerpunkt der Untersuchung des DGPF Projektes. Wichtig in diesem Zusammenhang ist die Genauigkeit der rekonstruierten Aufnahmegeometrie, die wiederum abhängt von der Bildblockkonfiguration, der Stabilität der Kamerageometrie und der Zuverlässigkeit des mathematischen Kameramodells. Die ebenfalls wichtige radiometrische Bildqualität ergibt sich vor allem aus dem Signal-Rauschverhältnis des digitalisierten Bildsignals. Diese wird sowohl von der Qualität des Sensorsystems als auch von der Beleuchtung und Textur der abgebildeten Oberflächen beeinflusst. Neben der in Kapitel 3 beschriebenen vergleichenden Analyse von bildbasierten Höhenmessungen ist deren Nutzbarkeit für verschieden Anwendungen von großem praktischen Interesse. Dies wird in Abschnitt 4 für Anwendungsbeispiele wie die Erzeugung von 3D Stadtmodellen und forstwirtschaftliche Anwendungen diskutiert, wobei im folgenden Abschnitt 2 zunächst die innerhalb des DGPF Projektes verfügbaren Test- und Referenzdaten vorgestellt werden. Eine umfangreiche Darstellung der in diesem Projekt durchgeführten Untersuchungen und Ergebnisse enthält [HAALA ET.AL., 2010].

2 Testzenarium und verfügbare Referenzdaten

Die bildbasierte Erfassung von Höhendaten wird potentiell durch unterschiedliche Bodenauflösungen (ground sample distance [GSD]) und Überdeckungen beeinflusst. Zur Untersuchung solcher Effekte wurden hierfür sowohl Bildblöcke mit nominell 20cm GSD und 60% Längs- und Querüberdeckung als auch Flüge mit GSD 8cm und 80% Längs- und 60% Querüberdeckung in unterschiedlichen Flughöhen erfasst. Aufgrund der unterschiedlichen Kamerageometrie und Zwangsbedingungen durch die verfügbaren Paßpunkte ergaben sich geringfügige Abweichungen von der vorgegebenen Konfiguration. Die Parameter der untersuchten Kamerasysteme und die Konfigurationen der Bildflüge sind in [CRAMER, 2010] ausführlich dokumentiert.

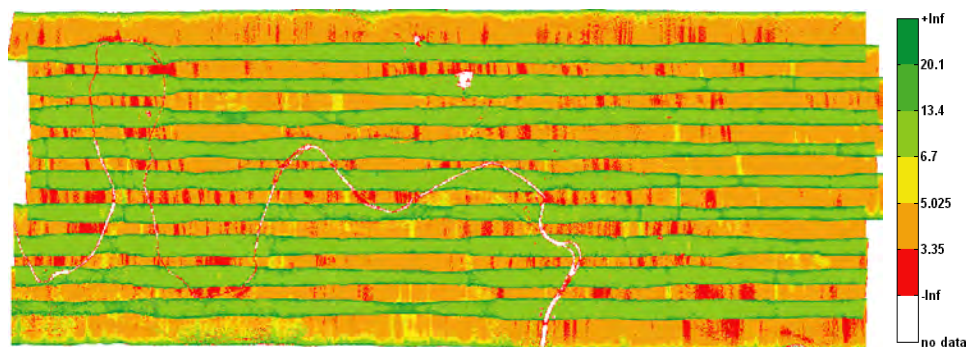


Abb. 1: Farbkodierte Punktdichte für alle 10 LiDAR Streifen, Legende bezogen auf Punkte/m²

Für die Untersuchungen der Arbeitsgruppe *Höhenmodelle* sind DOM Raster mit 0.2m/0.25m und 0.5m Gitterweite für den zentralen 5.0x2.7km² großen Bereich des Testgebiets erstellt und von den Teilnehmern anhand von 63 verfügbaren Kontrollpunkten überprüft worden. Um neben dieser punktuellen Kontrolle der Höhendaten auch flächendeckende Analysen zu ermöglichen, standen LiDAR Daten zur Verfügung. Diese wurden während der Messkampagne mit einem Leica ALS50 System in insgesamt 10 Fluglinien bei 45°FOV und einer Flughöhe von 500m über Grund erfasst. Die mittlere Überlappung der Streifen liegt bei 30%. In nur von einem Streifen

abgedeckten Bereichen betrug die Punktdichte 4 Pkte/m^2 , im Mittel ergab sich eine Dichte von 6.7 Pkte/m^2 . Wie die farbkodierte Darstellung der Punktdichte aller Streifen in Abb. 1 zeigt war diese jedoch erheblichen Schwankungen unterworfen.

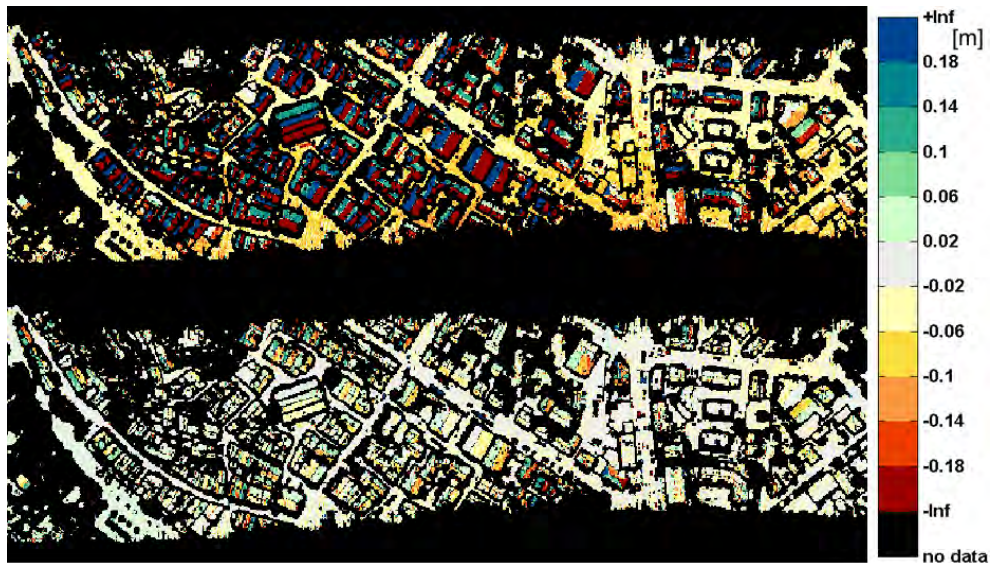


Abb. 2: Farbgekodierte Differenzen für LiDAR Streifen vor (oben) und nach (unten) Korrektur der Georeferenzierung durch Streifenausgleichung

Zur Verbesserung der Georeferenzierung wurde eine streifenweise Korrektur der LiDAR Daten durchgeführt. Dabei wurde die relative Orientierung der LiDAR-Streifen anhand der Differenzen überlappender Streifen kontrolliert [RESSL et al., 2008]. Die Minimierung systematischer Fehler wie Misalignment erfolgte durch eine streifenweise Ausgleichung [KAGER, 2004]. Hierfür wurden die Trajektorien der Streifen aus GNSS/INS Messungen sowie 1110 korrespondierende Ebenen zwischen den Streifen genutzt. Zusätzlich konnten 49 ebene Bereiche in den DMC Bildern mit 8cm GSD bestimmt und im Rahmen einer Streifenausgleichung analog zu Passpunkten einer Bündelblockausgleichung eingesetzt werden. Abb. 2 zeigt die farbgekodierten Differenzen der Streifen vor (oben) und nach (unten) der Streifenausgleichung, wobei die Elimination der systematischen Fehler deutlich sichtbar ist. Die aus dem Median der absoluten Streifendifferenzen berechnete Standardabweichung σ_{MAD} verbesserte sich dabei von 4.5cm auf 2.9cm.

3 Genauigkeitsuntersuchungen für DOM und Punktwolken

Zur ersten Abschätzung der Qualität wurden vertikale Differenzen zwischen den berechneten DOM Daten und den im Testgebiet verfügbaren signalisierten und mit statischem GPS eingemessenen Referenzpunkten genutzt. Hierfür wurden zum Einen DOMs mit 0.2m Gitterweite für eine Auswahl der verfügbaren 8cm GSD Bilder berechnet, zum Anderen aus den 20cm GSD Bildblöcken DOMs mit 0.5m Rasterweite abgeleitet. Die Analyse dieser Differenzen ist in Tab. 1 zusammengefasst. Spalte 3 zeigt die RMS Werte aus den Differenzen zwischen den DOM und den signalisierten Punkten. Die Analyse aller Differenzen ergab, dass die größten Werte durch potentielle Verdeckungen der signalisierten Punkte im jeweiligen Bildmaterial verursacht

wurden. Zur Vereinheitlichung der Ergebnisse wurden diese groben Fehler vor Berechnung der RMS-Werte eliminiert. Neben der Anzahl der verbleibenden Punkte sind in Tab. 1 noch die mittlere sowie größte und kleinste Abweichung – ebenfalls in Bezug auf die gefilterten Punkte - enthalten.

	Sensor	RMS[cm] gefiltert	Mittel[cm]	Δ Max/Min[cm]		# Punkte
LiDAR	ALS 50	3.3	0.4	9.4	-6.7	59
GSD 8cm Raster 0.2m	DMC	3.3	0.9	9.5	-6.9	60
	UltraCamX	4.8	0.6	11.7	-10.0	60
	DigiCAM	6.0	-1.7	15.5	-15.7	61
	RMK	4.6	2.4	8.2	-11.5	61
GSD 20 cm Raster 0.5m	DMC	16.2	-7.5	36.9	-30.5	61
	UltraCamX	7.5	-0.7	14.9	-16.8	60
	DigiCAM	9.6	0.5	18.9	-23.1	61
	RMK	9.5	0.7	23.9	-25.9	61

Tab. 1: Differenzen zwischen DOM und Kontrollpunkten nach Elimination grober Fehler – MATCH-T DSM

	Sensor	RMS[cm] gefiltert	Mittel[cm]	Δ Max/Min[cm]		# Punkte
GSD 8cm Raster 0.25m	ADS 40	6.7	-1.1	13.9	-18.1	57
	DMC	4.4	-1.2	9.0	-8.8	53
	UltraCamX	7.2	1.6	16.1	-11.8	59
GSD 20 cm Raster 0.5m	ADS 40	4.8	1.9	12.9	-8.8	60
	DMC	19.0	-2.7	51.3	-31.4	61
	UltraCamX	11.5	1.6	27.2	-21.6	61

Tab. 2: Differenzen zwischen DOM und Kontrollpunkten nach Elimination grober Fehler – NGATE

Zusätzlich zur Berechnung der DOM mit dem Programmsystem MATCH-T DSM erfolgte eine Berechnung mit dem Programmsystem NGATE. Die zugehörigen Ergebnisse zeigt Tab. 2. Die Ergebnisse aller Differenzanalysen stimmen gut mit der vertikalen Komponente der zuvor durchgeführten Bündelblockausgleichung überein, die $\frac{1}{2}$ GSD beträgt [JACOBSEN ET.AL., 2010]. Insbesondere bei der Auswertung der 8cm GSD Flüge kann annähernd die Genauigkeit von 3.3 cm des DOM aus der LiDAR Messung erreicht werden. Die im Testgebiet verfügbaren Kontrollpunkte wurden in der Regel auf asphaltierten Flächen kleinerer Straßen oder Parkplätze signalisiert. Dies ist natürlich vorteilhaft für die Filterung und Interpolation während der bildbasierten Erzeugung der DOMs. Dadurch sind die Resultate in Tab. 1 und Tab. 2 für geometrisch komplexe Bereiche recht optimistisch. Als Alternative wurden deshalb zusätzlich 3D Punktwolken im Bereich eines (ebenen) Sportplatzes untersucht. Die MATCH-T DSM Ergebnisse für die 8cm GSD Bilddaten sind exemplarisch in Abb. 3 und Tab. 3 dargestellt, zusätzliche Beispiele für die 20cm GSD Bilddaten finden sich in [HAALA ET.AL., 2010].

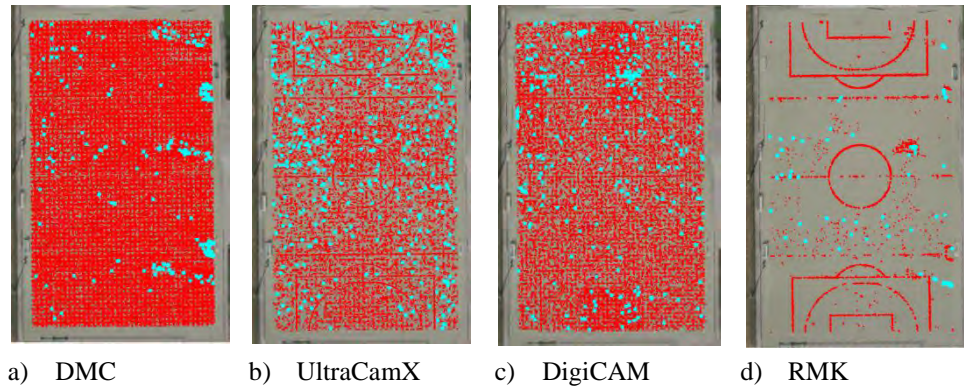


Abb. 3: Punktwolke aus 8cm GSD Bildern, generiert durch MATCH-T DSM

Sensor	STD [cm] nach Filter		STD [cm] vor Filter		Elim.Pkte [%]		Dichte Pkte/m ²	
	M-T	NGATE	M-T	NGATE	M-T	NGATE	M-T	NGATE
DMC	5.2	2.1	9.7	2.3	1.3	0.9	19.7	8.2
UltraCamX	6.8	13.1	8.0	15.6	0.4	1.5	19.0	8.2
DigiCAM	10.2		11.2		0.7		20.8	
ADS 40		2.3		2.6		0.7		8.2
RMK	17.2		27.3		3.2		0.8	
ALS 50	1.8		1.9		0.5		8.25	

Tab. 3: Genauigkeit der 3D Punktwolken aus MATCH-T DSM und NGATE für GSD 8cm

Die Berechnung der Punktwolken erfolgte wiederum durch die Programmsysteme MATCH-T DSM und NGATE. Zur Bewertung der erreichten Genauigkeit wurde für jede 3D Punktwolke eine ausgleichende Ebene berechnet, und aus dem senkrechten Abstand die zugehörige Standardabweichung der Punkte bestimmt. Um eine Beeinflussung der Ergebnisse durch sich bewegendes Schlagschatten beispielsweise von Flutlichtmasten zu verhindern, wurden nach der ersten Berechnung der ausgleichenden Ebene jeweils alle 3D Punkte eliminiert, die einen Abstand größer $3 \cdot \text{RMS}$ aufweisen. Diese Punkte sind in Abb. 3 jeweils hellblau markiert. Tab. 3 beinhaltet die RMS Werte jeweils vor und nach dem Filterprozess und gibt den Prozentsatz der so eliminierten Punkte an. Abb. 3 und Tab. 3 zeigen hohe Punktdichten, die sich insbesondere für die 8cm GSD Daten durch das eingesetzte Multi-Image-Matching mit MATCH-T DSM erreichen lassen. Die Genauigkeiten liegen zwar über dem sehr geringen Wert der LiDAR-Punktwolken, sind aber für viele Anwendungen bereits ausreichend. Neben der sehr vielversprechenden Qualität der Ergebnisse für alle digitalen Aufnahmesysteme bleibt anzumerken, dass ein systemübergreifender Vergleich insbesondere aufgrund der unterschiedlichen Aufnahmebedingungen während der jeweiligen Flugtage nur sehr bedingt möglich ist. Gut möglich ist jedoch der Vergleich zwischen DMC- und RMK-Aufnahmen da diese Bilder im Rahmen eines Doppelkamerafluges und damit unter identischen Bedingungen erfasst wurden. Hier zeigen die Untersuchungen klar die Vorteile der digitalen Bildaufnahme für die anschließende Bildzuordnung.

4 Nutzbarkeit von Höhendaten aus Bildzuordnung

Dichte und genaue Höhendaten werden für eine Reihe von Anwendungen benötigt. Beispiele sind die 3D Visualisierung digitaler Landschaftsmodelle, die Erfassung von 3D Gebäudemodellen oder die Berechnung von Digitalen Geländemodellen. Vor allem wenn Luftbilder bereits für andere Zwecke erfasst werden, ist die Bildzuordnung ökonomischer als der Einsatz zusätzlicher Sensoren wie LiDAR. Die Untersuchung der Nutzbarkeit von Höhendaten aus der Bildzuordnung im Rahmen von weiteren Auswerteschritten ist damit von großem Interesse.



Abb. 4: DOM aus Bildzuordnung (links) und LiDAR (Mitte) und berechnete Differenzen (rechts)

Abb. 4 stellt beispielhaft ein DOM abgeleitet aus der DMC 8cm GSD Befliegung und den ALS 50 LiDAR Daten gegenüber. Die visuelle Analyse der Differenzen auf der rechten Seite zeigt nur geringe Abweichungen zwischen dem jeweiligen rekonstruierten Oberflächen, die vor allem im Bereich von Vegetation liegen. Da die Bilddaten am 24. Juli 2008 und die LiDAR Daten am 21. August 2008 aufgenommen wurden, lassen sich diese Unterschiede auch auf Pflanzenwachstum bzw. Ernte zurückführen. Darüber hinaus werden aufgrund der beiden verschiedenen Messprinzipien unterschiedliche Oberflächengeometrien für Vegetationsbereiche erfasst. LiDAR Pulse dringen beispielsweise teilweise in Baumkronen ein, während Bildzuordnung die Geometrie der sichtbaren Oberfläche rekonstruiert. Solche Effekte sind vor allem dann wichtig, wenn die erfassten Höhendaten für forstwirtschaftliche Anwendungen genutzt wird.

4.1 Forstwirtschaftliche Anwendungen

Aus einem dichten genauen und aktuellen digitalen Oberflächenmodell lässt sich bei Verfügbarkeit eines Digitalen Geländemodells in Waldgebieten über einfache Differenzbildung ein Kronenhöhenmodell ableiten. Dieses liefert Höhen- und 3D Strukturinformation wie sie für eine Reihe forstwirtschaftlicher Arbeiten benötigt wird. Bis dato fanden zumeist LiDAR Daten Verwendung bei der Bestimmung von Kronenhöhenmodellen. Durch die Verfügbarkeit neuer Bilddaten und Algorithmen zur Bestimmung von Digitalen Oberflächenmodellen können jedoch neue Genauigkeitsbereiche erzielt werden, die den Einsatz von DOM via Bildmatching ermöglichen. Hierdurch kann vor allem eine dynamische Landschaftsveränderung jeweils aus aktuellem, zumeist ohnehin vorhandenem, Bildmaterial modelliert werden. Zur Abschätzung der Kronenhöhen unterschiedlicher Erfassungsmethoden dienen verschiedene Untersuchungen. Es wurden jeweils Differenzen gebildet zwischen den mit NGATE generierten DSM, den LiDAR Original-

daten, den korrigierten LiDAR Daten (siehe Kapitel 2) sowie zu ~110 im Stereomodell gemessenen 3D Punkten. Die Ergebnisse sind in Tab. 4 zusammengefasst.

Sensor	IST	Soll	Mittelwert	RMS
			[m]	[m]
ADS 40	DOM	Stereo	0.3	0.5
	LiDAR	Stereo	-0.7	2.7
	DOM	LiDAR	2.0	4.2
	DOM	LiDARcorr	1.9	4.1
DMC	DOM	Stereo	0.2	0.8
	LiDAR	Stereo	-0.3	1.9
	DOM	LiDAR	1.8	4.2
	DOM	LiDARcorr	1.7	4.0
UltraCamX	DOM	Stereo	0.2	0.5
	LiDAR	Stereo	-0.4	1.9
	DOM	LiDAR	1.8	4.1
	DOM	LiDARcorr	1.7	4.0

Tab. 4: Abweichungen zwischen DOM, LiDAR und 3D Punkte aus Stereomessungen

Der Trend der Abweichungen ist ähnlich für alle getesteten Datensätze. Die DOMs liegen hierbei durchschnittlich 25cm oberhalb der 3D Punktmessungen, wobei wiederum die 3D Punktmessungen oberhalb der LiDAR Daten resultieren. Aufgrund der höheren Punktdichte der LiDAR und DOM Daten kann angenommen werden, dass die Abweichungen zwischen diesen Datensätzen zuverlässiger sind. Abb. 5 zeigt für den Untersuchungsbereich je ein Orthophoto-Ausschnitt des analysierten Bereiches sowie eine farbcodierte Darstellung des Differenzmodelles DOM – minus – LiDAR.

Die Untersuchungsergebnisse für forstwirtschaftliche Anwendungen zeigen ähnliche Trends für die unterschiedlichen Datensätze. Die Korrektur der LiDAR Daten (Kapitel 2) zeigte für dieses Einsatzgebiet keine deutliche Verbesserung in den Abweichungen. Die Ergebnisse verdeutlichen das hohe Potential neuer Bilddaten und Matchingmethoden für Gebiete forstwirtschaftlicher Nutzung. Sie zeigen aber dennoch Diskrepanzen auf, die weitere Untersuchungen erfordern, vor allem in Hinblick auf die Bestimmung absoluter Genauigkeitsaussagen und die Anwendbarkeit auf Gebiete unterschiedlicher Vegetation.

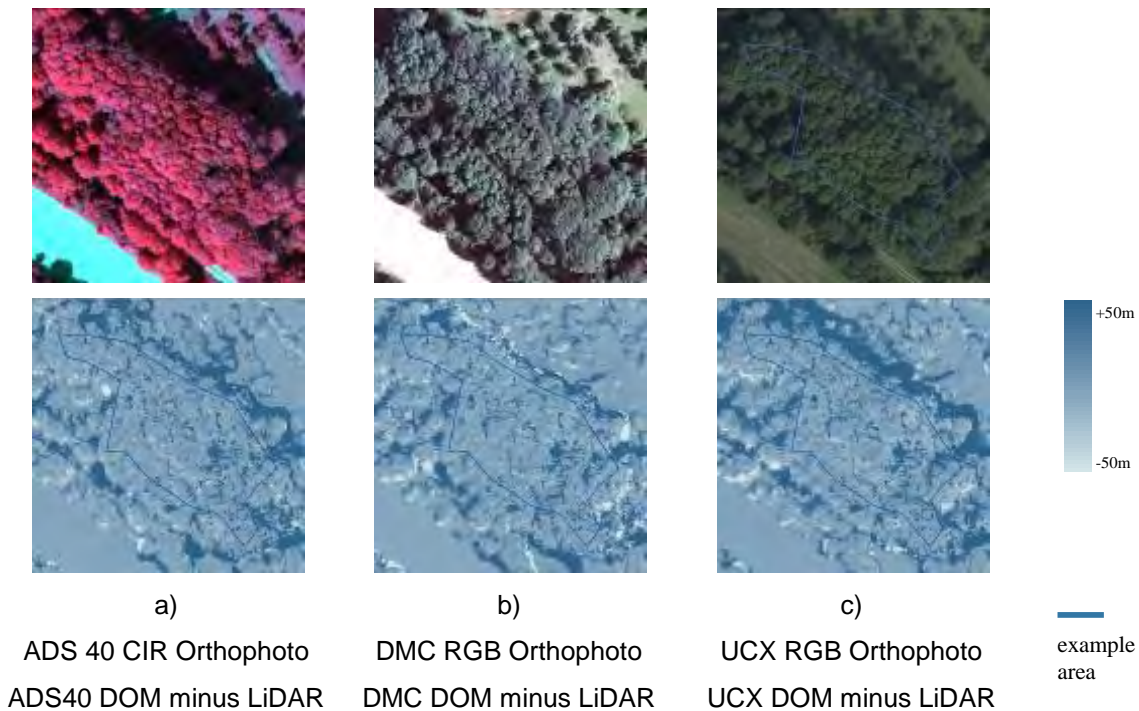


Abb. 5: Bildausschnitte und Differenzdarstellung zwischen DOM und LiDAR Daten

4.2 Stadtgebiete

Eine erste Analyse des Potentials der Bildzuordnung für die Oberflächengenerierung in bebauten Gebieten wurde anhand visueller Vergleiche durchgeführt. Die obere Reihe in Abb. 6 zeigt ein DOM für ein 115m langes Gebäude aus LiDAR Daten (links), DMC 8cm GSD (Mitte) und DMC 20cm GSD (rechts), die mit dem Softwarepaket SAT-PP erzeugt wurden. Die schattierten Darstellungen der DMC DOMs demonstrieren generell eine gute Qualität und eine hohe Auflösung der Modelle. Die Oberflächen der LiDAR Daten weisen eine relativ glatte Struktur auf. Demgegenüber enthalten die DMC DOMs 8cm GSD teilweise mehr Details, wie zum Beispiel kleine Strukturen auf dem Dach des Gebäudes. Dies ist dadurch erklärbar, dass das LiDAR DOM aus einer Punktwolke mit circa 6 Pkte/m² abgeleitet wurde und so diese kleinen Strukturen nicht erfasst werden konnten. Deutliche Unterschiede in den Modellen sind durch parkende Autos verursacht worden. Ein Vergleich der Profile des LiDAR DOMs, Abb. 6 d) und des DMC DOMs 8cm GSD, Abb. 6 e) unterstreichen das Potential der DMC Daten für diese Anwendung. Das Profil zeugt deutlich die Struktur des Gebäudes mit relativ scharfen Kanten und unterstreicht, dass sich die Höhenmodellgenerierung aus Bildmatching moderner digitaler Kameradaten dem Qualitätsbereich von LiDAR Daten annähert. Die schattierte Darstellung des Oberflächenmodells, generiert aus den 20 cm GSD Bildern, zeigt ein größeres Rauschen in Form von Unebenheiten in der generierten Oberfläche als bei der kleineren GSD und erwartungsgemäß weniger scharfe Kanten.

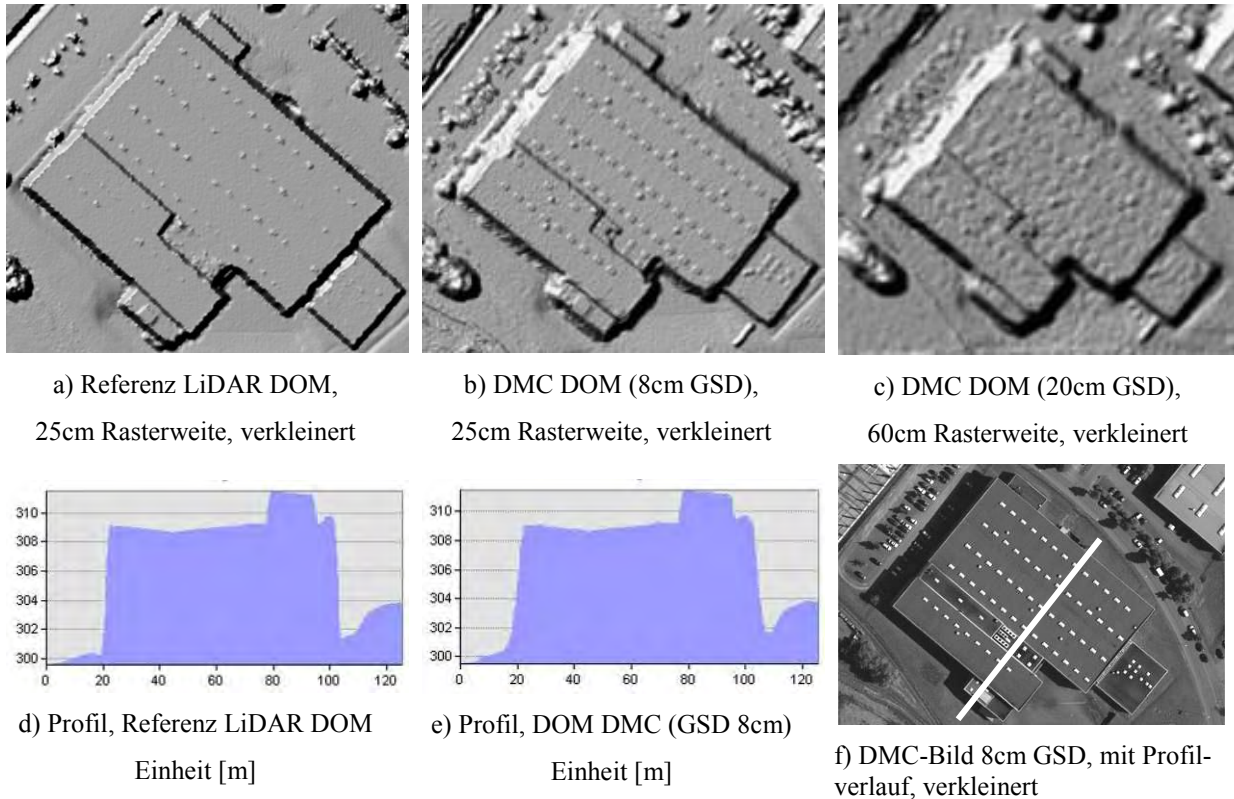


Abb. 6: Visueller Vergleich der Referenzdaten, des DMC (8cm GSD) DOMs, des DMC (20cm GSD) DOMs eines großen Gebäudes mit einer Längenausdehnung in NW – SO Richtung von ca. 115m

5 Zusammenfassung

Die Untersuchungen zur Genauigkeit der Höhenmodellgenerierung zeigen deutlich die Vorteile der digitalen Bildaufzeichnung für Verfahren der automatischen Bildzuordnung. Bilddaten moderner Luftbildkameras erlauben die automatische Ableitung von 3D Punktwolken und 2.5D Raster in einer Qualität, die in der Vergangenheit nur durch den Einsatz von flugzeuggestützten LiDAR Messungen möglich war. Insbesondere durch Mehrfachbildzuordnung können Höhendaten generiert werden, die sich für die Erzeugung von 3D Gebäudemodellen, forstwirtschaftliche Anwendungen, 3D Landschaftsvisualisierung und zumindest teilweise für die Erzeugung und Nachführung Digitaler Geländemodelle nutzen lassen.

6 Literaturverzeichnis

BÖSCH, R., GINZLER, C., WANG, Z., 2007: Von Decken und Lücken. Landesforstinventar (LFI) Info Nr. 8, Dezember 2007, Eidgenössische. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL), Birmensdorf, 1-4, download www.lfi.ch

CRAMER, M.: 2010, The DGPF-test on Digital Airborne Camera Evaluation – Overview and Test Design. PFG 02/2010.

- DEVENECIA, K., WALKER, S. & ZHANG, B., 2007: New Approaches to Generating and Processing High Resolution Elevation Data with Imagery. *Photogrammetric Week*, **17** (5), S. 1442-1448.
- HAALA, N., HASTEDT, H. WOLF, K., RESSL, C. & BALTRUSCH, S., 2010: Digital Photogrammetric Camera Evaluation – Generation of Digital Elevation Models, PFG 02/2010
- HEINZEL, J., WEINACKER, H., KOCH, B. 2008: Full automatic detection of tree species based on delineated single tree crowns - a data fusion approach for airborne laser scanning data and aerial photographs. *SilviLaser 2008*, 8th international conference on LiDAR applications in forest assessment and inventory, Edinburgh, UK, pp 76-85
- HEURICH M. SCHADECK S., WEINACKER H. AND P. KRZYSZEK, 2004: Forest Parameter Derivation From DTM/DSM Generated From LiDAR And Digital Modular Camera (DMC). *Int. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Volume XXXV. Part B. pp. 84-89.
- JACOBSEN, K., CRAMER, M., LADSTÄDTER, R., RESSL, C. SPRECKELS, V., 2010: DGPF project: Evaluation of digital photogrammetric camera systems - geometric properties , PFG 02/2010
- KAGER, H., 2004: Discrepancies between overlapping laser scanning strips - simultaneous fitting of aerial laser scanner strips. In: *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, XXXV, B/1, Istanbul, Turkey, pp. 555–560.
- LEMAIRE, C., 2008: Aspects of the DSM Production with High Resolution Images IAPRS, Volume XXXVII, Part B4, S. 1143-1146.
- PERSSON, A., HOLMGREN, J., SÖDERMAN, U., OLSSON, H., 2002: Detecting and Measuring Individual Trees using an Airborne Laser Scanner, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol. 68. No. 9, pp.925-932
- RESSL, C., KAGER, H., MANDLBURGER, G., 2008: Quality checking of ALS projects using statistics of strip differences. In: *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. XXXVII, pp. 253 – 260.
- ST-ONGE, B., ACHAICHA, N., 2001: Measuring forest canopy height using a combination of LiDAR and aerial photography data. *IAPRS*, Volume 34-3/W4, pp 131-137
- WASER, L.T., GINZLER, C., KÜCHLER, M., LANZ, A., BALTSAVIAS, E., 2009: Semiautomatic prediction of main tree species using multi-temporal ADS 40 data. McRoberts, R. (ed) *Proceedings of the IUFRO Division 4 Symposium on Extending Forest Inventory and Monitoring over space and time*
- ZHANG, L. & GRUEN, A., 2004: Automatic DSM Generation from Linear Array Imagery Data. *IAPRS*, **35** (B3), S. 128-133.

DGPF Projekt: Evaluierung digitaler photogrammetrischer Kamerasysteme – Themenschwerpunkt Stereoplotting

VOLKER SPRECKELS, ANDREAS SCHLIENKAMP¹

Zusammenfassung: Dieser Beitrag entstand im Rahmen des DGPF-Projektes „Evaluierung digitaler Luftbildkameras“ und behandelt die Auswertungen der Arbeitsgruppe „Stereoplotting“. Es wurden bei der RAG Aktiengesellschaft die stereophotogrammetrischen Auswertungen der Bilddaten der Reihemesskammer Zeiss RMK Top 15, der beiden großformatigen Flächensensorkameras Vexcel Imaging UltraCamX und Intergraph/ZI DMC sowie der Mittelformatkamera IGI Quattro DigiCAM und der großformatigen Mehrzeilenkamera Leica ADS40 (2nd Generation) untersucht. Dazu wurden die persönliche Einstellgenauigkeit in den jeweiligen Bilddatensätzen ermittelt, die stereophotogrammetrischen Messungen zu Passpunkten, topographischen Punkten und Linienmessungen in den Bilddatensätzen miteinander und zu den Soll-Koordinaten der terrestrischen Passpunktmessung verglichen. Am Landesbetrieb Geoinformation und Vermessung der Freien- und Hansestadt Hamburg erfolgten Stereoauswertungen in DMC Datensätzen, die mit den Auswertungen der RAG verglichen wurden. Alle Vergleiche zeigen, dass die Auswertungen sehr stark durch die an den unterschiedlichen Bildflugzeitpunkten vorherrschenden Wetterbedingungen geprägt sind. Damit ist die Bewertung der einzelnen Kamerasysteme erschwert und eine möglichst objektive Beurteilung kann somit nur über die Bestimmung der persönlichen Einstellgenauigkeit sowie über die Ermittlung identischer Punkte in den Auswertungen der unterschiedlichen Bildflüge erfolgen. Bei den Vergleichen der ADS40 Bildmessungen wurden systematische Abweichungen in der Größenordnung von 1/2 Pixel festgestellt, welche auf die Lage des Pixelursprungs (linke obere Ecke, Pixelmitte) der bereitgestellten Bilddaten zurückzuführen sind. Die Auswertungen mit der Quattro DigiCAM sind in Teilbereichen durch hohe systematische Bildfehler aufgrund eines defokussierten Kamerakopfes beeinträchtigt. Die Höhenmessungen mit dem NuVision Stereovorsatz lagen etwa um 1 Pixel höher als bei Messungen mit dem PLANAR-System.

1 Einleitung

In der Auswertegruppe „Stereoplotting“ soll das Potenzial der digitalen Luftbildkameras zur Erstellung von topographischen Auswertungen, Lageplänen, Digitalen Geländemodellen (DGM) und auch für 3D-Gebäudemodelle ermittelt werden (s. Abb. 1). Es liegen die Ergebnisse der RAG Deutsche Steinkohle (RAG) und des Landesbetriebes Geoinformation und Vermessung der Freien- und Hansestadt Hamburg (LGV) vor. Die Beteiligung der RAG im Projekt „Evaluierung digitaler Luftbildkameras“ der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung (DGPF) umfasste insgesamt etwa 570 Arbeitsstunden, die des LGV ca. 90 Stunden (SPRECKELS ET AL. 2010). Die Photogrammetrie wird bei RAG seit mehr als 35 Jahren im Tagesgeschäft zur hochgenauen Erfassung von bergbaubedingten Bodenbewegungen eingesetzt (LÜTZENKIRCHEN 1974, BUSCH 1989). Bereits im Jahr 2004 führte RAG photogrammetrische Auswertungen in digitalen Luftbildern durch und hat seitdem einige Untersuchungen zur Genauigkeit dieser Bild-

1)Volker Spreckels, Andreas Schlienkamp, RAG Aktiengesellschaft, Deutsche Steinkohle AG, BG G2 Geodatenmanagement, Shamrockring 1, D-44623 Herne, Deutschland, e-mail: volker.spreckels@rag.de, andreas.schlienkamp@rag.de.

daten durchgeführt (SPRECKELS ET AL. 2008). Weitere praktische Auswertungen zu digitalen Kameras sind unter anderem von PERKO ET AL. 2004, NEUMANN 2004, ARIAS UND GOMEZ 2007 sowie TALAYA ET AL. 2008 beschrieben worden.



Abb. 1: 3D-Ansicht der photogrammetrischen Auswertung, Gebiet 1 „Innenstadt“, in den Bildern der UltraCamX, 8cm Ground Sampling Distance (GSD).

Die Aerotriangulation (AT) wurde von anderen Projektpartnern durchgeführt und an RAG und LGV übergeben. Hierbei musste in Kauf genommen werden, dass über die an der AT beteiligten Operateure andere persönliche Punkteinstellgenauigkeiten vorliegen, deren Einflüsse in den nachfolgenden Auswertungen enthalten sein können (JACOBSEN ET AL. 2010).

Alle stereophotogrammetrischen Messungen der RAG wurden von einer Photogrammetrie-Operateurin mit 23 Jahren Berufserfahrung in der Messung von Bodenbewegungsblöcken und großflächigen DGM in bergbaulichen Veränderungsgebieten durchgeführt. Am LGV erfolgten die Messungen als Trainingsprojekt für eine Operateurin. Die Messungen erfolgten mit ERDAS Imagine LPS/Pro600 und dem NuVision Stereovorsatz, sowie in den ADS40 Daten, 8cm GSD, für das Gebiet Nr. 1 mit dem PLANAR Stereobetrachtungssystem.

Die Messungen des LGV wurden ebenfalls mit ERDAS Imagine LPS/Pro600 am PLANAR Stereo-System mit passiver Polarisationsbrille erstellt.

Es wurden vier Testgebiete ausgewählt, für die das Stereoplotting erfolgte: Gebiet 1 „Innenstadt“, Gebiet 2 „Hochhäuser“, Gebiet 3 „Wohnbebauung“ und Gebiet 4 „Steinbruch“ (s. Abb. 2).

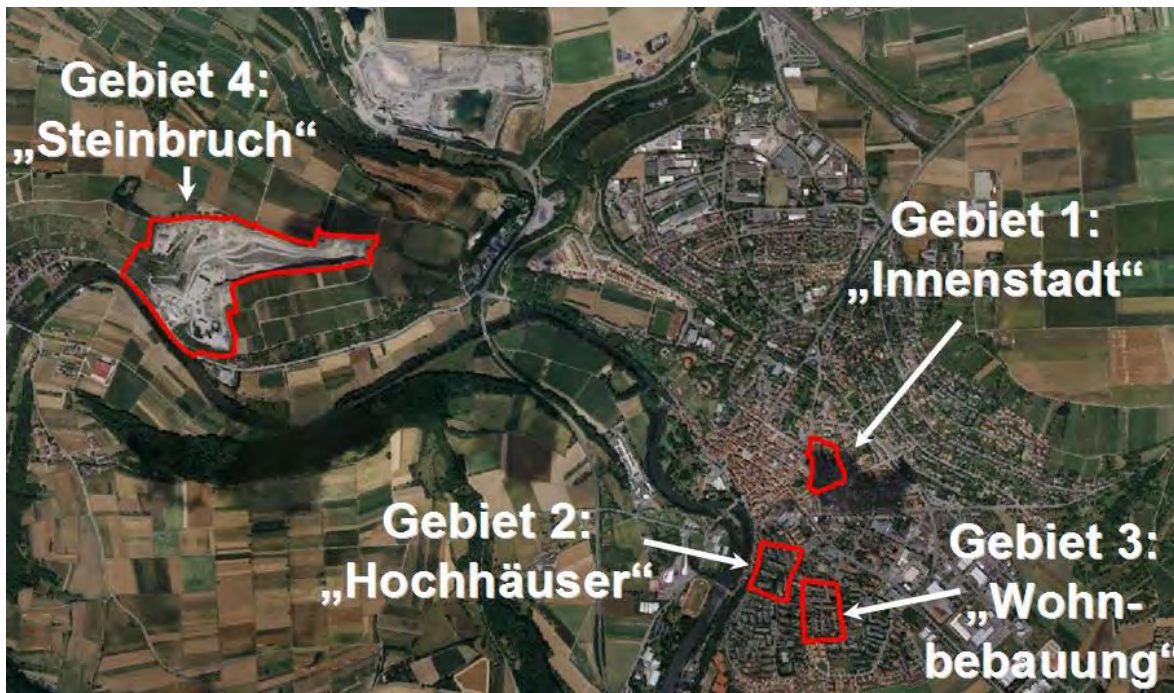


Abb. 2: Ausschnitt aus dem Orthophotomosaik des Testgebietes Vaihingen-Enz mit der Übersicht der vier Testgebiete für das Stereoplotting.

Bei RAG wurden die stereophotogrammetrischen Messungen in den Bilddaten mit 8cm und 20cm Bodenauflösung (Ground Sampling Distance, GSD) für die Testgebiete 1 bis 3 in den Bilddaten der Kamerasysteme Zeiss RMK Top 15 (RMK), Intergraph/ZI DMC (DMC), Vexcel Imaging UltraCamX (UCX), Leica ADS40 (ADS) und der IGI Quattro DigiCAM (DigiCAM) ausgewertet. Das Testgebiet 4, Steinbruch, wurde nur in den 20cm GSD Datensätzen ausgewertet, denn eine Testauswertung in 8cm GSD zeigte keine erkennbaren Abweichungen oder Verbesserungen der topographischen Aufnahme. Am LGV erfolgten die Auswertungen für das Testgebiet Nr. 3 in den 8cm und 20cm Bilddaten der DMC. Die stereophotogrammetrischen Auswertungen wurden als 3D-shapefiles an Mitglieder der Arbeitsgruppe „Geometrie“ übermittelt. Eine 3D Gebäudemessung des Gebietes 1 „Innenstadt“ (s. Abb. 1) wurde als 3D-shapefile und im 3DS-Format der Projektleitung und der ISPRS WGIII/4, Complex Scene Analysis and Reconstruction übergeben.

Die Vergleiche der stereophotogrammetrischen Auswertungen wurden für jede Kamera in 8cm zu 20cm GSD, sowie zwischen den Kamerasystemen in 8cm, sowie in 20cm GSD durchgeführt. Die Vergleiche zeigen einen sehr großen Einfluss des Wetters zum Befliegungszeitpunkt auf die Bildmessung und Interpretation (s. Abb. 3). Zur Ermittlung möglichst objektiver Ergebnisse wurden die Messungen identischer Punkte und Linien, sowie die persönliche Einstellgenauigkeit des Operators über eine Dreifachmessung der Passpunkte in den 8cm GSD Daten herangezogen.



Abb. 3: Übersicht der Bilddatensätze zu den Aufnahmezeitpunkten im Gebiet 1 „Innenstadt“: von links nach rechts, oben: 24.07.2008 RMK, 24.07.2008 DMC, 06.08.2008 DMC, unten: 06.08.2008 ADS, 06.08.2008 DigiCAM und 11.09.2008 UCX.

2 Stereophotogrammetrische Auswertungen

Bei den Auswertungen wurde, soweit möglich, darauf geachtet, dass zuerst die 20cm GSD Bilddaten bearbeitet wurden, damit die Auswertungen nicht durch die Kenntnis von Bildinformationen aus den 8cm GSD Bildern beeinflusst werden konnten. Weiterhin wurde darauf geachtet, dass die auf einander folgenden Bilddatensätze möglichst unterschiedliche Wetterverhältnisse aufwiesen. Die Messungen erfolgten mit Kodierungen gemäß des Objektschlüsselkataloges „OSKA“, so dass alle Gruppenmitglieder einheitliche Datensätze erstellen konnten. Alle Passpunktmessungen zur Ermittlung der persönlichen Einstellgenauigkeit sowie die stereophotogrammetrische Auswertung erfolgten für alle Kameras in 4-facher

Vergrößerung (Zoom-Stufe 4x), so dass eine einheitliche Beurteilung der Performance des Auswertesystems und der topographischen Auswertung möglich ist. Ein Beispiel für die Punktmessung in Zoom-Stufe 4x in den unterschiedlichen Bilddaten zeigt Abb. 4 für den Passpunkt Nr. 2203.

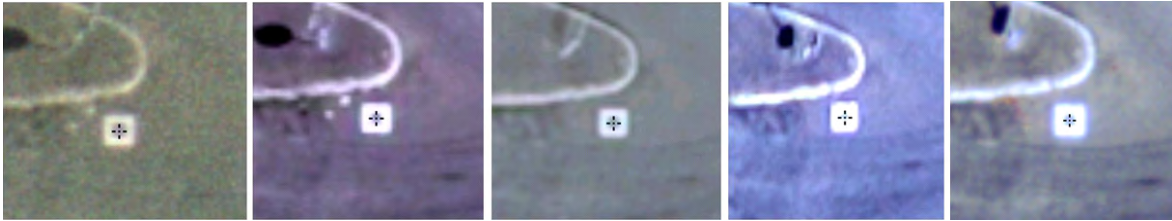


Abb. 4: Passpunktmessung in Zoom-Stufe 4x für den PP 2203, von links nach rechts: RMK, DMC, UCX, DigiCAM, ADS40.

Die von der Universität Stuttgart signalisierten Passpunkte sind innen mit schwarzer Farbe (30cm x 30cm) und außen mit einem 30cm breiten weißen Rand signalisiert. Diese Signalisierung stieß zuerst auf Skepsis, sie erwies sich jedoch als sehr gut für die Punktbestimmung in 8cm GSD, solange die Messmarkengröße so gewählt wurde, dass das Messkreuz bis zum weißen Rand reichte und nicht im schwarz signalisierten Bereich „versinken“ konnte (s. Abb. 4).

Es können keine konkreten systembedingten Unterschiede zwischen der DMC und der UCX ermittelt werden, da die Bilddaten dieser beiden Kameras zu stark durch die vorherrschenden Wetterbedingungen geprägt sind (siehe auch SPRECKELS ET AL. 2010). Herauszustellen sind jedoch die Bilddaten der DigiCAM und der ADS40:

Das Arbeiten mit den jeweils vier Einzelbildern des Quattro DigiCAM Bildfluges war sehr gewöhnungsbedürftig. Zuerst mussten jeweils die beiden „dem rechten Flügel“ bzw. die beiden „dem linken Flügel“ des Bildflugzeuges nahen Einzelbilder in LPS einem gesonderten Bildstreifen zugeordnet werden, so dass zwei Bildstreifen in die gleiche Richtung wiesen. Die Benennung der Bilder war im Projekt vorgegeben und führte dadurch zu sehr langen Bildnamen, was zu einer mühsamen und schnell verwirrenden Zuordnung der Stereobildpartner führte. Die DigiCAM verfügt nicht über eine Forward Motion Compensation (FMC). Im 8cm Bilddatensatz der DigiCAM wurden einige unscharfe Bilder erkannt, so zum Beispiel das Stereobild, das in Abb. 5. links zu sehen ist. Diese unscharfen Bilder entstammen gemäß Aussage des Herstellers der Fokussierung einer der vier Kameras, des Kamerakopfes Nr. 127, auf 70m. Allerdings scheint noch eine Unschärfe in Flugrichtung aufzutreten. Diese lokalen Unschärfen wirken sich natürlich auf die Erkennbarkeit im Stereobild aus, und wegen der resultierenden hohen systematischen Bildfehler (s. Abb. 5, rechts) für diesen Kamerakopf in Teilbereichen direkt auf die stereophotogrammetrische Messung ein. Der Versuch, die Passpunktmessungen in den Bereichen des ungenau fokussierten Kamerakopfes zu selektieren und getrennte Auswertungen zur Punktmessgenauigkeit im unscharfen und scharfen Bildbereich abzuleiten, war jedoch nicht aussagekräftig.

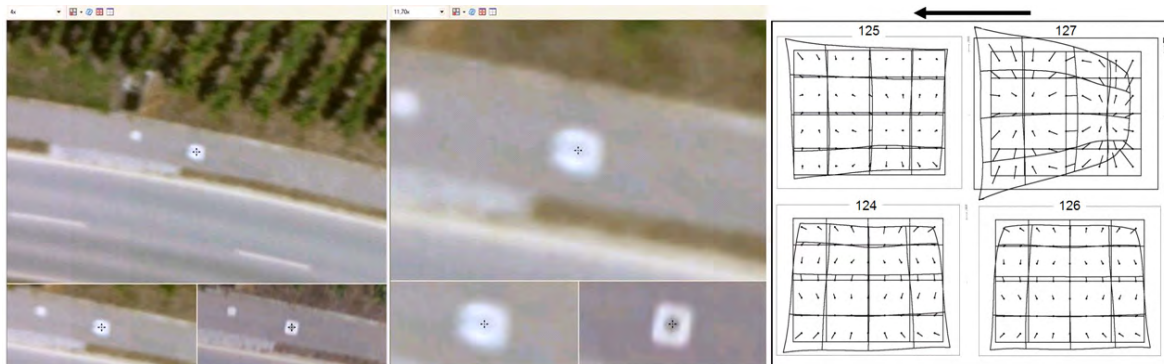


Abb. 5: Einfluss der Defokussierung eines DigiCAM Kamerakopfes am Beispiel des Passpunktes Nr. 3041029 in Zoom-Stufe 4x (links) und Zoom-Stufe 11,7x (Mitte). Jeweils unten: Ansicht des linken und rechten Stereopartners. Rechts: Systematische Bildfehler der DigiCAM Kameraköpfe. Flugrichtung in Pfeilrichtung.

In den ADS40 Bilddaten war das Stereoplotting mit LPS/PRO600 möglich, da das Modell der Zeilenkamera im Auswerteprogramm integriert ist. Allerdings können nur bereits triangulierte Level1 Bilder bearbeitet werden. Die stereophotogrammetrische Auswertung war dank der Arbeit in den sehr langen, kontinuierlichen Stereomodell-Streifen (Backward-Nadir, BN und Forward-Nadir, FN) in den ADS40 Bildern am angenehmsten. Über den durchgehenden Nadirblick treten nur sehr geringe sichttote Bereiche auf, dafür bieten die Stereomodelle in Streifenform nicht so viele unterschiedliche Einblickmöglichkeiten wie Einzelbilder. Für die Operateurin war damit nur eine geringfügige Umstellung der Auswertung nötig, zum Beispiel bei der Messung eines Gebäudes über den Wechsel zwischen den Stereomodellen in BN und FN, anstatt des fortlaufenden Anhängens des nächsten Stereomodells.

Da die Farbinformation bei der ADS in der originalen Pixelgröße vorliegt, zeichnen sich die ADS Bilder durch die höchste Detailschärfe und Objekterkennung aus (s. Abb. 6). Das erleichtert zum einen die photogrammetrische Auswertung und führt zum anderen zur höchsten Anzahl der für die weiteren Vergleiche selektierten identischen Punkte und Linien, die im weiteren Verlauf dieses Kapitels vorgestellt werden.

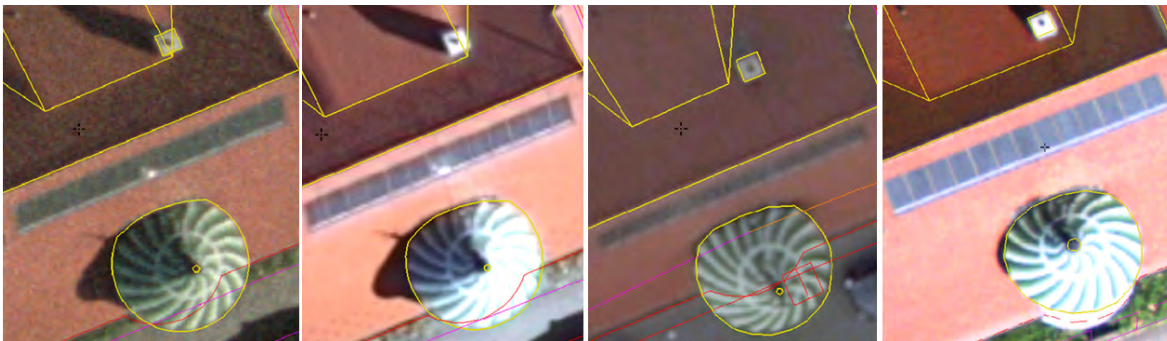


Abb. 6: Detailansicht der Bilddaten, von links nach rechts: RMK, DMC, UCX, ADS. 8cm GSD.

Bei den Flächensensorkameras muss die Quattro DigiCAM wegen der großen Modelldeformationen des defokussierten Kamerakopfes Nr. 127 und seines großen lokalen Einflusses auf sehr viele Stereomodelle gesondert betrachtet werden. Aufgrund der unterschiedlichen Wettersituationen kann für die Flächensensorkameras keine klare Aussage für oder gegen ein Kamerasystem gegeben werden, da eventuell bestimmbare Unterschiede definitiv vom Einfluss der Sonneneinstrahlung überdeckt werden. Eine Empfehlung kann für die Bilddaten des Zeilensensors ADS40 gegeben werden, da dieser die beste Objekterkennung und die angenehmste Stereomessung bietet.

2.1 Vergleich des Stereoplottings in 8cm zu 20cm GSD

Bei diesem Vergleich wurden die stereophotogrammetrischen Auswertungen je Kamera betrachtet. Dabei muss darauf hingewiesen werden, dass die 20cm GSD Bilddaten der RMK mit CIR-Film und für 8cm mit einem Echtfarbfilm befliegen wurden. Es kann also keine direkte Aussage über die Interpretation und Erkennbarkeit in den Luftbildern der RMK getroffen werden. Die CIR Bilder der RMK sind wegen der starken Überstrahlungen nicht sehr gut für eine topographische Auswertung geeignet (s. Abb. 7).



Abb. 7: Detailansicht der Bilddaten. Von links nach rechts: RMK, DMC, UCX, ADS für 8cm GSD (obere Reihe) und 20cm GSD (untere Reihe).

Die Auswertungen belegen, wie natürlich zu erwarten war, dass deutlich mehr Details in den 8cm GSD Luftbildern zu erfassen sind (s. Abb. 8, links). Die Auswertungen sind sehr stark von der Anzahl der Stereomodelle, der Lage des Messgebietes im Stereomodell bzw. der Sichtbarkeit in einem oder in zwei Bildflugstreifen, sowie von der Sonneneinstrahlung beeinflusst. Durch den Einfluss der Sonneneinstrahlung können Kanten hervorgehoben und somit Bordsteine messbar werden, es können allerdings auch Auswertebereiche im Schatten verschwinden oder Bordsteine oder Passpunktsignale überstrahlt werden. Bei schwachen Kontrasten hingegen können z.B. Bordsteine nicht mehr genau zu messen sein oder Details schlechter - stellenweise wiederum besser - zu erkennen sein, was bis hin zu Fehlinterpretationen führen kann.

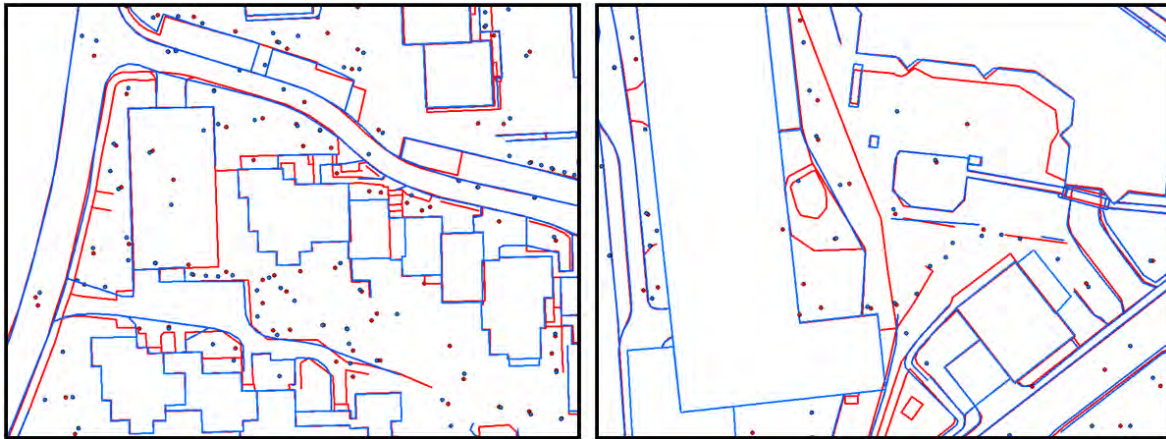


Abb. 8: Links: Gebiet 2 „Hochhäuser“: Vergleich der photogrammetrischen Auswertungen in 8cm GSD (rot) zu 20cm GSD (blau), RMK. Rechts: Gebiet 1 „Innenstadt“: Vergleich der Auswertungen in 8cm GSD zwischen UCX (rot) und DMC (blau).

Somit ist eine rein visuelle Beurteilung zum Vergleich der topographischen Auswertungen hinsichtlich kameraspezifischer Vor- oder Nachteile nicht aussagekräftig.

2.2 Vergleich des Stereoplottings in 8cm zu 8cm und 20cm zu 20cm GSD

Bei diesem Vergleich wurden die stereophotogrammetrischen Auswertungen der unterschiedlichen Kameras betrachtet. Wie bereits geschildert, weist die ADS40 insgesamt die beste Objekterkennbarkeit auf. Wesentlich bei der Betrachtung der Flächensensoren war auch hier der Einfluss der Sonneneinstrahlung, so dass es z.B. beim Vergleich der Auswertung des DMC und des UCX Datensatzes dazu kam, dass einige Kanaldeckel, die nicht von Fahrzeugen verdeckt sind, im einen bzw. im anderen Bildmaterial nicht erkannt und gemessen wurden (s. Abb. 8, rechts).

Auch hier konnte keine objektive Bewertung kameraspezifischer Eigenschaften erfolgen, da die Interpretation und Erkennbarkeit im Luftbild wesentlich von der Lage eines Objektes im Stereomodell sowie von der Zahl der das Gebiet abdeckenden Stereomodelle abhängt, was zu unterschiedlichen sichttoten Räumen führt. Auf jeden Fall erschwerten starke Kontraste und Helligkeitsunterschiede die Stereoauswertung dadurch, dass Helligkeit und Kontrast öfter angepasst werden mussten. Sehr helle Bereiche hinterlassen zudem ein Nachbild im Auge des Operateurs, das bis zur nächsten sicheren Messeinstellung abklingen muss.

Eine rein visuelle Beurteilung zum Vergleich der topographischen Auswertungen hinsichtlich kameraspezifischer Vor- oder Nachteile ist also mit den vorliegenden Bilddatensätzen nicht durchgehend aussagekräftig.

2.3 Vergleich der stereophotogrammetrischen Punktmessungen

Eine visuelle Bewertung der photogrammetrischen Auswertungen könnte im Einzelfall für ein spezielles Objekt erfolgen. Das ist aber nicht flächendeckend für alle Kamerasysteme und Testgebiete in 8cm GSD und 20cm GSD umsetzbar, so dass die Vergleiche über identische

Punkte und Linien erfolgten. Identische Punkte sollten innerhalb eines Puffers von 50cm liegen und die gleiche Kodierung besitzen. In den 3D-shapefiles der stereophotogrammetrischen Auswertung wurden identische Punkte der Klassen 3504 (Kanaldeckel), 3505 (Gully) und 5742 (Lanterne) selektiert und die Punktkoordinaten zueinander statistisch aufbereitet, siehe Tab. 1. Im Vergleich zu den Punktmessungen zeigt die Messung der Kanaldeckel kleinere Lagedifferenzen, die Höhenmessung bleibt auf gleichem Niveau (s. Abb. 9.). Die Vergleiche erfolgten mit den Kameras RMK, DMC, UCX und ADS für die Gebiete 1 bis 3. Mit der DigiCAM wurden die Gebiete 1 und 2 bearbeitet, so dass hier eine insgesamt geringere Punktzahl vorliegt.

Sensor	Alle Punkte, 8cm zu 20cm GSD						Kanaldeckel, 8cm zu 20cm GSD							
	Anzahl Punkte	mean [cm]			stddev [cm]			Anzahl Punkte	mean [cm]			stddev [cm]		
		dx	dy	dz	dx	dy	dz		dx	dy	dz	dx	dy	dz
RMK	125	-1,9	0,7	17,7	10,3	9,2	14,7	36	-1	1,6	20	6	8,3	12,8
DMC	92	-0,7	2,2	6,2	12,6	9,6	18,5	21	7,6	1	6,5	10,3	7	13,9
UCX	129	-2	6,1	7,3	9,4	8,4	18	29	-0,6	4,8	10,1	6,4	7,1	15,1
ADS	203	4,4	-4,5	-5,9	5,2	0,4	-6,5	69	5,1	-1,6	-4,4	4,7	5,2	11,8
DigiCAM	63	10,9	5,5	11,6	13,6	15,3	17,6	13	10,1	12,9	11,7	5,9	14,4	18,3
DMC LGV	63	-4,8	-0,5	18,6	11,0	11,4	13,3	16	-1,8-	3,3	24,8	4,1	7,3	13,6

Tab. 1: Vergleich identischer Punktmessungen der RAG für RMK, DMC, UCX, ADS und DigiCAM, sowie des LGV für DMC im Gebiet Nr. 3. **8cm GSD zu 20cm GSD**

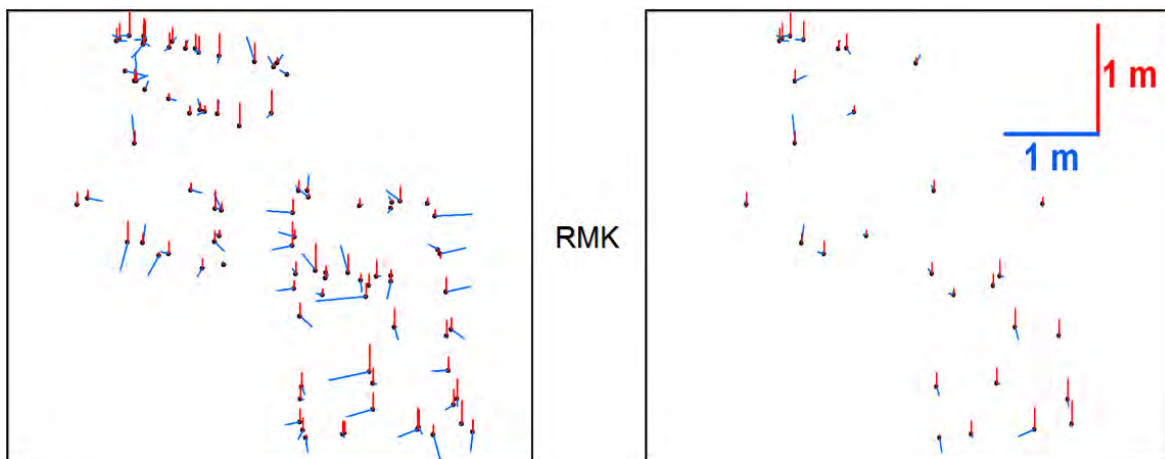


Abb. 9: Differenzen aller Punktmessungen (links) und Kanaldeckelmessungen (rechts) am Beispiel der RMK, Vergleich **8cm GSD zu 20cm GSD** für die Gebiete 2 und 3.

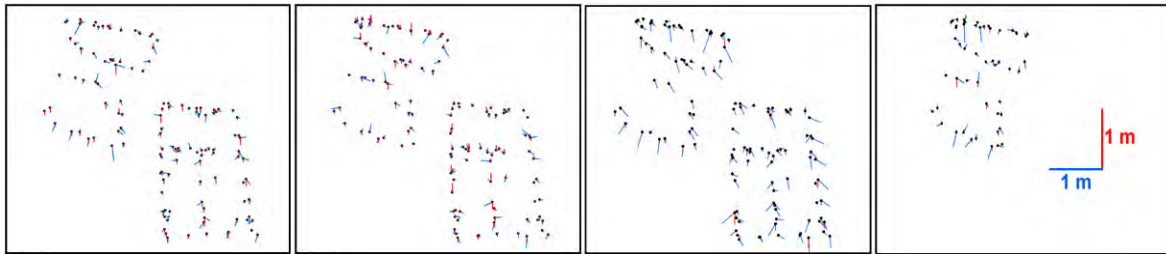


Abb. 10: Differenzen aller Punktmessungen der Gebiete 2 und 3 in **8cm GSD**, von links nach rechts: RMK-DMC, RMK-UCX, RMK-ADS und RMK-DigiCAM (nur für Gebiet 2).

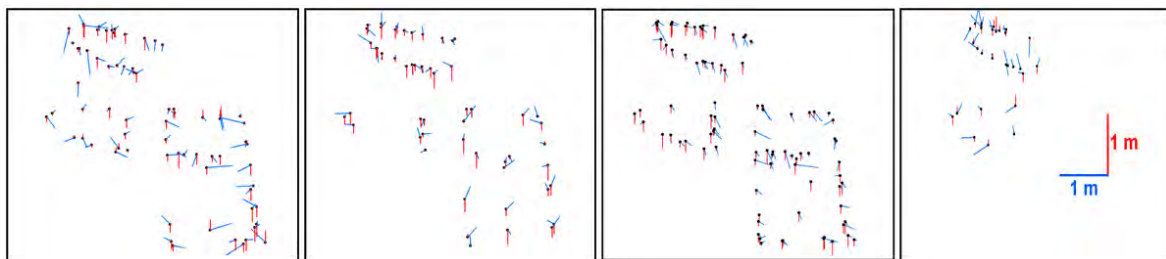


Abb. 11: Differenzen aller Punktmessungen der Gebiete 2 und 3 in **20cm GSD**, von links nach rechts: RMK-DMC, RMK-UCX, RMK-ADS und RMK-DigiCAM (nur für Gebiet 2).

Sensor	Alle Punkte, 8cm GSD							Kanaldeckel, 8cm GSD						
	Anz. Pkte	mean [cm]			stddev [cm]			Anz. Pkte	mean [cm]			stddev [cm]		
		dx	dy	dz	dx	dy	dz		dx	dy	dz	dx	dy	dz
RMK - DMC	182	-0,6	-2,6	-1,7	5,7	5,5	10,6	53	-1,1	-1,9	-3,1	2,9	5,2	7,7
RMK - UCX	183	-0,9	-0,9	2,6	6,1	5,2	11,0	54	-1,0	-0,5	2,9	3,6	4,9	8,3
RMK - ADS	172	2,4	-8,9	-1,5	6,8	6,1	10,1	52	2,6	-7,4	-1,7	3,7	5,0	6,9
RMK - DigiCAM	104	0,9	-2,5	-0,8	7,3	7,9	8,4	36	-0,1	0,2	1,2	4,2	5,5	6,2
DMC - UCX	184	-0,3	1,7	4,5	4,7	5,6	11,1	54	0,0	1,2	5,5	3,0	3,9	8,1
DMC - ADS	180	3,3	-6,1	0,2	5,1	4,6	9,2	57	3,7	-5,3	0,4	3,1	3,5	6,8
DMC - DigiCAM	108	2,5	-0,3	-2	7,1	6,6	10,3	35	0,9	0,3	-1,0	4,9	5,0	8,3
UCX - ADS	206	4,3	-7,7	-3,7	5,7	5,0	10,5	63	4,0	-6,6	-5,2	3,1	3,8	8,0
UCX - DigiCAM	130	3,3	-1,5	-4,3	6,8	6,8	9,4	45	1,7	-0,3	-6,3	4,8	4,8	7,2
ADS - DigiCAM	137	-1,4	5,6	0,3	5,9	6,0	10,6	56	-2,4	5,8	1,3	4,3	4,2	5,5

Tab. 2: Vergleich identischer Punktmessungen der RAG zwischen RMK, DMC, UCX, ADS und DigiCAM Bilddaten in **8cm GSD**

Sensor	Alle Punkte, 20cm GSD							Kanaldeckel, 20cm GSD						
	Anz. Pkte	mean [cm]			stddev [cm]			Anz. Pkte	mean [cm]			stddev [cm]		
		dx	dy	dz	dx	dy	dz		dx	dy	dz	dx	dy	dz
RMK - DMC	97	-0,6	-2,1	-9,7	14,5	11,6	21,5	20	7,5	-2,8	-14,1	11,7	8,8	20,7
RMK - UCX	88	-0,9	2,3	-11,6	9,4	10,6	23,3	22	-0,7	0,2	-4,2	8,9	9,7	22,6
RMK - ADS	123	4,6	-9,4	-18,4	7,7	7,0	16,5	37	2,9	-7,9	-19,7	6,1	6,3	15,7
RMK - DIGICAM	51	-6,6	2,3	0,9	14,3	17,0	18,3	11	-8,4	1,9	-6,4	7,3	16,1	12,7
DMC - UCX	72	-1,5	3,5	0,3	15,2	11,9	20,3	13	-6,7	3,6	1,7	10,5	11,3	14,0
DMC - ADS	91	4,8	-8,7	-5,9	14,2	9,7	17,1	22	-4,0	-5,4	-6,9	9,8	7,1	13,0
DMC - DIGICAM	37	-7,5	3,1	5,3	18,0	14,3	23,4	5	-19,3	8,9	-4,1	5,2	12,4	24,1
UCX - ADS	117	6,3	-12,3	-10,2	9,3	7,9	17,8	28	3,9	-10,6	-15,5	6,2	6,2	13,7
UCX - DIGICAM	50	-7,1	1,1	2,1	14,1	13,3	25,4	11	-9,3	1,8	-8,9	7,8	14,3	29,1
ADS - DIGICAM	69	-12,7	10,2	16,0	14,6	13,8	16,6	13	-14,9	16,7	13,3	6,9	13,7	20,1

Tab. 3: Vergleich identischer Punktmessungen der RAG zwischen RMK, DMC, UCX, ADS und DigiCAM Bilddaten in **20cm GSD**

Aus den Vergleichen in Tabelle 1 bis Tabelle 3 können folgende Ergebnisse abgeleitet werden, wobei die geringere Punktzahl der DigiCAM für die Gebiete 1 und 2 zu berücksichtigen ist:

8cm zu 20cm, je Kamera:

Die meisten identischen Punktmessungen konnten der ADS zugeordnet werden, gefolgt von der UCX, RMK und der DMC. Die Punktmessungen für die Flächensensoren sind sehr stark von der Sonneneinstrahlung geprägt.

Die Stereomessungen in den 8cm GSD Bilddatensätzen liegen für die digitalen Luftbilder der Mehrzeilenkamera ADS etwa 5cm bis 6cm niedriger als in den 20cm GSD Bildern.

Die Flächensensorkameras hingegen liegen um ca. 6cm bis 7cm höher als in den 20cm GSD Luftbildern, und um 18cm höher verglichen zu den analogen, gescannten Luftbildern der RMK. Der Grund hierfür kann in der schlechteren Punktansprache in den CIR Bildern verglichen zu den RGB Bildern zu finden sein. Zudem weisen die gescannten Luftbilder ein höheres Bildrauschen auf, so dass die Messmarke für die Höhenmessung in den gescannten Luftbildern nicht so exakt aufgesetzt werden kann, wie in den digitalen Luftbildern. Da die Farbbilder der Flächensensoren mit dem Verfahren des Pan-Sharpening aufbereitet werden, unterliegen sie Filterungen, die den Bildinhalt somit auch die Stereomessung beeinflussen. Das ist bei der ADS nicht der Fall, da die panchromatischen und die Farbbilder in der gleichen Auflösung erfasst werden.

In den 8cm GSD Bildern ist der schwarze Innenbereich des Passpunktes erkennbar, in den 20cm GSD Bildern wird der schwarze Innenbereich vom weißen Rand des Passpunktsignals überstrahlt. Somit erfolgt eine unterschiedliche Punktansprache, wobei die Messmarke in 8cm GSD genauer als in 20cm GSD auf das Passpunktsignal aufgesetzt wird.

Die ADS weist in x- und y-Richtung Abweichungen von etwa 0,5 Pixel auf, die auf die Lage des Pixelursprungs zurückzuführen sind (s. Abb. 14).

Die DigiCAM weist einen sehr hohen Wert von ca. 11cm in x-Richtung auf, der auf Punktmessungen in Stereomodellen des Kamerakopfes Nr. 127 zurückzuführen ist.

Der Vergleich zwischen RAG und LGV für die Auswertungen im DMC Datensatz zeigt ein vergleichbares Ergebnis für die Standardabweichungen der Punktmessungen, wobei die Werte des LGV für die Höhenmessung stärker streuen.

8cm zu 8cm, zwischen den Kameras:

Die Mittelwert der ADS40 Punktmessungen liegt im Vergleich zu den anderen Kameras bei bis zu 1 Pixel in x- und in y-Richtung, bedingt durch die Zuordnung des Pixelursprungs (s. Abb. 14).

Die Lagemessgenauigkeit liegt für alle Kameras bei 0,6 Pixel und besser.

Die Höhenmessgenauigkeit über alle Punkte liegt für alle Kameras bei 1,0 bis 1,2 Pixel, für die Messung von Kanaldeckeln bei 0,8 bis 1 Pixel.

20cm zu 20cm, zwischen den Kameras:

Die größte Streuung der Lagemessungen weist die ADS40 zu der UCX und der DigiCAM auf, jedoch beträgt die Standardabweichung der ADS zu den Flächenkameras nur ca. 0,8 Pixel über alle Punkte und etwa 0,7 Pixel für die Kanaldeckel. Zwischen der RMK, DMC und UCX beträgt sie ca. 0,5 Pixel und zur DigiCAM etwa 0,7 Pixel.

Die Höhenmessungen der Flächenkameras verglichen mit der ADS streuen bis zu 0,9 Pixel, die Standardabweichungen nehmen für diese Vergleiche allerdings die niedrigsten Werte von 0,8 bis 0,9 Pixel über alle Punkte, bzw. ca. 0,7 Pixel für die Kanaldeckelmessungen an.

Die Höhenmessungen der Flächenkameras untereinander streuen zwischen 0,1 bis 0,5 Pixel, jedoch liegt die Standardabweichung mit 0,9 bis 1,1 für DMC und UCX bzw. 1,1 bis 1,4 Pixel für die DigiCAM und ist damit leicht höher als für die 8cm GSD Bilddaten.

Die RMK Höhenmessungen liegen etwa auf gleichem Niveau wie die Höhenmessungen der DigiCAM. Die RMK Höhenmessungen liegen ca. 10cm unter der DMC und der UCX und sogar 16cm bis 18cm unterhalb der ADS. DMC und UCX liegen auf etwa gleichem Höhenniveau.

2.4 Vergleich stereophotogrammetrisch gemessener Linien

Es wurde weiterhin ein Versuch unternommen, auch die Linienmessung im Stereomodell zu analysieren. Dazu wurden identische Linienpunkte innerhalb eines Puffers von 1m selektiert. Es wurden die Punktkodierungen 5101 (Strasse) und 5201 (Weg) verwendet. Für diese Linien wurden die Anzahl der Linien, Anzahl der Linienpunkte, die Lagedifferenz und der kürzeste Abstand der Linien ermittelt. Tabelle 4 zeigt die Ergebnisse des Linienvergleiches für die jeweiligen Kameras in 8cm GSD zu 20cm GSD, siehe auch Abb. 12. In Tabelle 5 sind die Differenzen (Mittelwert und Median) der als identisch ermittelten Linien zwischen den Kameras in 8cm GSD und in 20 cm GSD zusammengefasst.

Die Abbildung 12, rechts, belegt eindeutig, dass der Bildinhalt und die Erfahrung der Operateure das Ergebnis der Auswertung über die Bildinterpretation bedingen. Der Vergleich der Linienmessungen zeigt, wie schon vorher genannt, die starke Abhängigkeit der Messung vom Wetter, vor allem der Sonneneinstrahlung. Aufgrund der starken Kontraste weicht die Wahrnehmung von Kanten, z. B. Bordsteinen, vom DMC zum Bilddatensatz der RMK stark ab, was zu größeren Lageunterschieden zwischen der DMC, der RMK und der UCX führt.

Kamera	Anzahl der Linien	Vergleich 8cm zu 20cm GSD [cm]		
		mean dl	median dl	stdev dl
RMK	83	5,3	2,1	7,4
DMC	57	8,7	3,7	10,1
UCX	87	5,7	2,1	7,6
ADS	106	6,3	3,2	8,4
DigiCAM	32	4,1	2,4	5,4

Tab. 4: Vergleich identischer Linienmessungen für RMK, DMC, UCX, ADS und DigiCAM zwischen **8cm GSD** und **20cm GSD**.

Kameras	Anzahl der Linien	8cm GSD [cm]		Anzahl der Linien	20cm GSD [cm]	
		mean dl	stdev dl		mean dl	stdev dl
RMK - DMC	85	2,9	4,8	65	7,4	10,6
RMK - UCX	102	4,2	5,3	83	4,7	7,7
RMK - ADS	97	5,0	6,5	87	6,6	9,9
RMK - DigiCAM	37	2,5	3,7	33	5,5	9,3
DMC - UCX	111	3,2	5,0	57	7,3	9,0
DMC - ADS	93	4,5	6,9	61	6,8	8,5
DMC - DigiCAM	46	2,6	3,4	23	6,3	9,5
UCX - ADS	125	5,7	6,9	98	5,6	8,5
UCX - DigiCAM	52	2,4	3,7	39	5,0	5,0
ADS - DigiCAM	55	3,7	6,2	28	4,7	5,0

Tab. 5: Vergleich der Linienmessungen zwischen RMK, DMC, UCX, ADS und DigiCAM in **8cm** und **20cm GSD**.



Abb. 12: Links und Mitte: Linienmessungen in RMK (rot) und DMC Bildern (blau), 8cm GSD, überlagert zum UCX Orthophoto, 8cm GSD. Rechts: Vergleich der Linienmessungen RAG (blau) und LGV (rot) überlagert zum DMC Orthophoto, 20cm GSD.

Auch dieser Vergleich der Linienmessungen bestätigt den großen meteorologischen Einfluss. Kameraspezifische Unterschiede können auch über diesen Vergleich nicht konkret erfasst werden.

2.5 Vergleich der NuVision- und PLANAR-Stereobetrachtungssysteme

Im Projektverlauf ergab sich die Möglichkeit, die Punktmessungen zweier unterschiedlicher Stereobetrachtungssysteme zu vergleichen. Bei RAG wurden alle Auswertungen an Röhrenmonitoren mit dem NuVision Stereovorsatz angefertigt, zudem konnte das Testgebiet 1 „Innenstadt“ noch in den ADS Bilddaten an einer Auswertestation mit dem PLANAR-System und Flachbildschirmen ausgewertet werden. Das Testgebiet Nr. 3 „Wohnbebauung“ wurde am LGV mit dem PLANAR-System bearbeitet, so dass Vergleiche in Messpunkten für das Gebiet Nr. 1 (RAG) und Nr. 3 (RAG - LGV) möglich waren, siehe Tabelle 6 und Tabelle 7.

Sensor DMC	Kanaldeckel, 8cm GSD							Kanaldeckel, 20 cm GSD						
	Punkte	mean [cm]			stddev [cm]			Punkte	mean [cm]			stddev [cm]		
		dx	dy	dz	dx	dy	dz		dx	dy	dz	dx	dy	dz
RAG - LGV	24	2,9	3,1	10,5	2,4	3,0	6,3	7	-4,7	-9,5	25,6	10,9	7,4	15,8

Tab. 6: Vergleich der Punktmessungen im Gebiet 3 „Wohnbebauung“, RAG (NuVision) zum LGV (PLANAR), in DMC Bilddaten **8cm GSD** und **20cm GSD**

Sensor ADS	Kanaldeckel, 8cm GSD						
	Punkte	mean [cm]			stddev [cm]		
		dx	dy	dz	dx	dy	dz
NuVision - PLANAR	26	3,9	5,3	7,9	2,8	3,6	7,1

Tab. 7: Vergleich der Messungen im Gebiet 1 „Innenstadt“, RAG: NuVision zu PLANAR in ADS40 Bilddaten, **8cm GSD**

Die Ergebnisse bestätigen die Aussagen der Operateure, dass bei der Stereoauswertung am PLANAR-System ein helleres, klareres Bild vorliegt, wodurch eine veränderte Punktansprache erfolgt. Daraus folgt am PLANAR-System das Aufsetzen der Messmarke auf einem tieferen Niveau entsprechend etwa der Größenordnung 0,7 bis 0,9 Pixel, wie die Vergleiche der RAG untereinander und zum LGV zeigen. Bei der Betrachtung dieses Vergleiches muss allerdings noch die persönliche Einstellgenauigkeit der Operateure berücksichtigt werden.

2.6 Bestimmung der persönlichen Einstellgenauigkeit

Die persönliche Einstellgenauigkeit wurden bei RAG über eine Mehrfachmessung aller Passpunkte in den 8cm GSD Luftbildern der RMK, DMC, UCX, ADS und DigiCAM bestimmt, beim LGV in den DMC Bildern. Dazu wurden die Punkte in jedem Stereomodell dreimal angefahren und gemessen (s. Tab. 8). Abweichend von der täglichen Praxis wurden auch außerhalb des Modellbereiches liegende Passpunkte im Randbereich gemessen, um Erkenntnisse über die Messgenauigkeiten in den randnahen Bereichen zu erlangen (s. Abb. 13). Bei der ADS und der DigiCAM war es systembedingt nicht möglich, die Punktmessungen einem Modell- bzw. Randbereich zuzuordnen. Die persönliche Einstellgenauigkeit der RAG Operateurin liegt in den 8cm GSD Bildern aller Kameras bei etwa 0,5cm in Lage und Höhe. Am LGV wurden die

Passpunkte der DMC in 8cm GSD durch eine Doppelmessung bestimmt. Nach diesen liegt die Einstellgenauigkeit der Operateurin des LGV bei etwa 2 cm in der Lage und 3,7cm in der Höhe. Die tägliche Praxis zeigt, dass bei der Stereoauswertung durchaus Abweichungen von ca. 0,5 bis 0,7 Pixel zwischen unterschiedlichen Operateuren auftreten können.

Kamera	Punkte im	Anzahl PP	Anzahl Messungen	Persönliche Einstellgenauigkeit [cm]								
				dx			dy			dz		
				max	mean	std	max	mean	std	max	mean	std
RMK	Modellb.	60	645	0,9	0,4	0,2	1,2	0,4	0,2	1,1	0,4	0,2
	Randb.	45		0,9	0,3	0,2	1,3	0,4	0,2	1,0	0,4	0,3
DMC	Modellb.	58	735	1,2	0,4	0,2	1,6	0,4	0,2	1,6	0,6	0,3
	Randb.	55		1,0	0,4	0,2	1,6	0,5	0,2	1,8	0,6	0,3
UCX	Modellb.	58	741	1,0	0,4	0,2	1,5	0,4	0,2	1,9	0,6	0,4
	Randb.	50		1,2	0,4	0,2	1,1	0,5	0,2	1,7	0,6	0,3
ADS	Gesamt	55	102	0,9	0,3	0,2	1,0	0,4	0,2	1,5	0,5	0,3
DigiCAM	Gesamt	56	591	1,4	0,5	0,3	1,8	0,5	0,3	1,5	0,4	0,3
DMC LGV	Gesamt	57	114	2,0	0,1	1,3	5,0	0,3	2,1	11,0	0,0	3,7

Tab. 8: Persönliche Einstellgenauigkeit, Operateure RAG und LGV, aus 8cm GSD Bilddaten



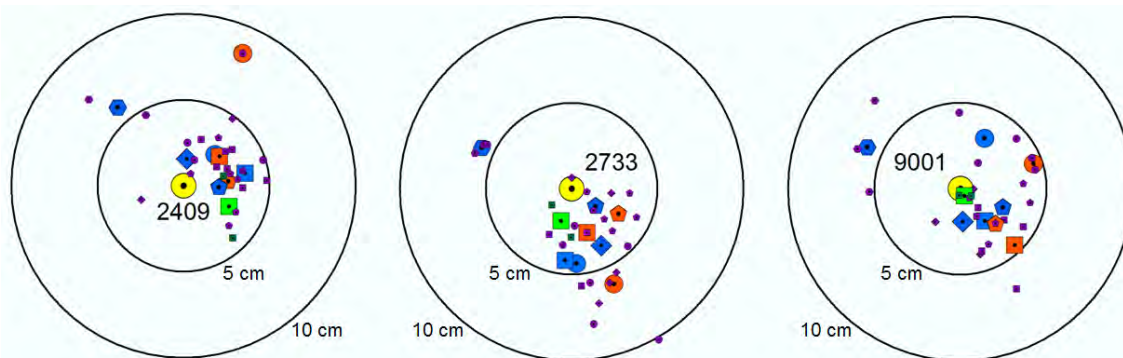
Abb. 13: Übersicht zur mehrfachen Passpunktmessung zur Bestimmung der persönlichen Einstellgenauigkeit: Grenzen des Modellbereiches (gelb) und des Randbereiches (rot), am Beispiel der RMK, 8cm GSD.

2.7 Bestimmung der Abweichung zur GPS-Koordinate

Wie bereits zu Beginn des Beitrages genannt, sind in den stereophotogrammetrischen Punktmessungen der RAG und des LGV noch die Einflüsse der AT enthalten. Um diese darzustellen, wurden die mehrfachen Passpunktmessungen mit der GPS-Koordinate der Passpunktbestimmung verglichen (s. Tab. 9). Die Abweichung zur GPS-Koordinate gibt Hinweise auf die Auswirkungen der AT und Bündelblockausgleichung.

Kamera	Punkte im	Anzahl PP	Anzahl Messungen	Differenz zur GPS-Koordinate [cm]					
				dx		dy		dz	
				mean	std	mean	std	mean	std
RMK	Modellb.	60	125	-1,0	2,4	1,1	3,5	1,1	7,5
	Randb.	45	90	-0,9	2,4	0,5	3,8	4,4	7,5
DMC	Modellb.	58	122	-1,2	1,8	1,8	2,8	-1,3	3,4
	Randb.	55	123	-1,3	1,9	2,3	2,6	-1,9	3,8
UCX	Modellb.	58	134	-2,2	1,2	1,6	2,1	0,2	4,8
	Randb.	50	113	-2,4	1,4	1,8	2,2	-2,1	5,4
ADS	Gesamtb.	55	102	3,5	1,1	-3,1	2,0	-0,2	3,7
DigiCAM	Gesamtb.	56	197	-1,0	1,9	0,8	2,6	-2,9	3,4
DMC LGV	Gesamtb.	58	116	-0,7	1,6	1,7	2,5	4,4	4,3

Tab. 9: Abweichungen der gemittelten Passpunktmessungen zur GPS-Koordinate



GPS-Koordinate: ●, Ø 1cm						
Gemittelte stereophotogrammetrische Messungen:						
	RMK Top 15	DMC	DMC - LGV	UltraCamX	ADS40	DigiCam
Modellbereich	●	■	■	●	●	◆
Randbereich	●	■		●		
Je Stereomodell	●	■	■	●	●	◆

Abb. 14: Übersicht der Passpunktmessungen bezogen auf die GPS-Koordinate. Von links nach rechts: Passpunkte Nr. 2409, 2733 und 9001.

Eine Darstellung der Streuung der Punktmessungen bezogen auf die GPS-Koordinate zeigt Abb. 14, mit den beispielhaft ausgewählten Punkten 2409, 2733 und 9001. Die Kreise kennzeichnen die 5cm und 10cm Abstände zur GPS Koordinate. Die blauen Symbole zeigen für die stereophotogrammetrische Messung die für den Modellbereich gemittelte Passpunktmessung, die roten Symbole die gemittelte Passpunktkoordinate für die Messungen im Randbereich. Die violetten Symbole zeigen die aus den Dreifachmessungen gemittelte Punktlage je Stereomodell. Die Messungen des LGV in den DMC Bildern sind in grün dargestellt. Es ist erkennbar, dass die Bildmessungen recht nah als Cluster beieinander liegen, wobei die Punktmessungen in den ADS Bildern klar erkennbare systematische Abweichungen aufzeigen.

Für die Punktmessungen in den ADS40 Bilddaten zeigt Tab. 9 größere Differenzen für den Mittelwert der Messungen in x- und y-Richtung von fast 0,5 Pixel auf. Hier liegen systematische Abweichungen vor, die der Zuweisung des Pixelursprungs entstammen, so dass in einem Vorverarbeitungsschritt eine falsche Zuordnung der „Pixelmitte“ bzw. der „linken oberen Ecke“ auftrat. Wird der systematische Anteil abgespalten, liegt die Standardabweichung der Punktmessung wie bei den anderen Sensoren bei ca. 0,25 Pixel in Lage und Höhe.

Die Höhenmessungen der RAG und des LGV in den DMC Bildern zeigen, verglichen mit der Sollhöhe aus den GPS Koordinaten, dass die Messung der RAG am NuVision Stereovorsatz um ca. 2cm niedriger liegt, die Stereomessungen des LGV am PLANAR-System liegen im Schnitt etwa 4cm höher.

Es ist zu erkennen, dass die stereophotogrammetrischen Höhenmessungen, bezogen auf die Soll-Koordinate der GPS Messungen, in den Randbereichen der RMK, DMC und UCX schlechter werden. Die Lageabweichungen nehmen für die Digitalkameras sogar noch etwas größere Werte an, als für die RMK. Aus diesem Grunde sollten auch bei Digitalen Flächensensorkameras die Stereomessungen nur im zentralen Modellbereich erfolgen.

3 Zusammenfassung

Die Auswertung und Vergleiche der stereophotogrammetrischen Messungen in den Bilddatensätzen der RMK, DMC, UCX, ADS und DigiCAM legen den starken Einfluss des Wetters, insbesondere der Sonneneinstrahlung offen. Das unterschiedliche Wetter an den Bildflugtagen machte eine direkte und aussagekräftige Bewertung kameraspezifischer Eigenschaften unmöglich.

Die Stereoauswertung mit den Bildern der RMK, DMC und UCX konnte wie gewöhnlich an der Stereoauswertestation unter LPS/PRO600 durchgeführt werden.

Die Bearbeitung der ADS Bilddaten konnte unter LPS/PRO600 in den Level1 Bildern erfolgen. Da die Farbinformation bei der ADS in der originalen Pixelgröße vorliegt, zeichnen sich die ADS Bilder durch höchste Detailschärfe und Objekterkennung aus. Die ADS Bilddaten in 8cm GSD sind durch einen systematischen Lagefehler von 0,5 Pixel beeinflusst, welcher in der Bildprozessierung über die Zuordnung des Pixelursprungs (Bildmitte / linke obere Ecke) begründet ist.

Bei der Beurteilung der DigiCAM muss berücksichtigt werden, dass der Kamerakopf Nr. 127 defokussierte Bilder aufzeichnete, die zu großen lokalen Modellfehlern führen. Der Umgang mit

den zur Verfügung gestellten vier Einzelbildern der DigiCAM war sehr gewöhnungsbedürftig. Nach Aussage der Fa. IGI können die vier Einzelbilder mittlerweile zu einem großen Einzelbild gemergt werden.

Es konnte eine Höhendifferenz von ca. 1 Pixel zwischen Stereomessungen in analogen gescannten und digitalen Stereomodellen aufgezeigt werden. Die Messungen in den 8cm GSD Bilddaten der Flächensensorkameras liegen um ca. 6 cm bis 7 cm höher als in den 20cm GSD Luftbildern, und um 18cm höher verglichen zu den analogen, gescannten Luftbildern der RMK. Die Stereomessungen in den 8cm GSD Bilddatensätzen liegen hingegen für die digitalen Luftbilder der Mehrzeilenkamera ADS40 etwa 5cm bis 6cm niedriger als in den 20cm GSD Bildern. Diese Höhenunterschiede sind zwingend zu beachten, wenn Vergleiche zwischen diesen unterschiedlichen Bilddaten bzw. Epochenvergleiche photogrammetrischer Höhenmessungen durchzuführen sind.

Weitere Unterschiede der Höhenmessungen wurden durch die Vergleiche zwischen dem NuVision- und dem PLANAR-Stereobetrachtungssystem ersichtlich. Die Höhenmessungen mit dem PLANAR-System lagen um etwa 0,8 bis 1,0 Pixel tiefer.

Die Untersuchungen zur persönlichen Einstellgenauigkeit ergaben in 8cm GSD Bildern bei RAG aus etwa 2800 Einzelmessungen etwa 0,4cm für die Lage und ca. 0,5cm für Höhenmessungen. Beim LGV konnte aus 114 Einzelmessungen eine weniger repräsentative Einstellgenauigkeit von etwa 2cm für die Lage und ca. 3,5cm für Höhenmessungen abgeleitet werden. Die Abweichungen der Punktmessungen im Stereomodell zur GPS Soll-Koordinate liegen bei etwa 0,25 Pixel in der Lage und bis 0,5 Pixel für die Höhe.

Es kann keine grundsätzliche Empfehlung für oder gegen einen Kameratyp gegeben werden. Bei den Flächensensor-Kameras dominierte der Wittereinfluss die Ergebnisse des Stereoplottings. Die Mehrzeilenkamera ADS40 besticht durch die klaren Bilddaten und auch durch die Genauigkeit. Eine Entscheidung über die zu verwendende Kamera sollte gründlich bezüglich des Verwendungszwecks, der technischen Möglichkeiten der Kameras und der ökonomischen Rahmenbedingungen erfolgen.

4 Literaturverzeichnis

- ARIAS, B.; GOMEZ, J., 2007: Stereoscopic Accuracy. In: ISPRS Hannover Workshop 2007 "High-Resolution Earth Imaging for Geospatial Information", The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Hannover, Germany, Vol. XXXVI - 1/W51, 2007. Auf CD-ROM.
- BUSCH, W., 1989: Großräumige photogrammetrische Bodenbewegungsmessungen. In: Das Markscheidewesen 96, Heft 4, 1989, S. 323 - 327.
- JACOBSEN, K.; CRAMER, M.; LADSTÄDTER, R.; RESSL, C.; SPRECKELS, V., 2010: DGPF Projekt: Evaluierung digitaler photogrammetrischer Kamerasysteme – Themenschwerpunkt Geometrie. Dieser Tagungsband 19 / 2010, Jahrestagung DGPF Wien.

- LÜTZENKIRCHEN, K., 1974: Der erste Versuch einer großflächigen aerophotogrammetrischen Höhenaufnahme hoher Genauigkeitsforderung im Ruhrgebiet. In: Schriftenreihe Lagerstätten erfassung und -darstellung, Bodenbewegungen und Bergschäden, Ingenieurvermessung. Heft 6. Aachen: Institut für Markscheidewesen der RWTH Aachen 1974.
- NEUMANN K. J., 2004: Operational aspect of digital aerial mapping cameras. In: The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Istanbul, Turkey, Vol. XXXV, Part B1, 2004, pp. 222-225.
- PERKO, R.; KLAUS, A.; GRUBER, M., 2004: Quality comparison of digital and film-based images for photogrammetric purposes. In: The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science, Istanbul, Turkey, Vol. XXXV, Part B1, 2004, pp.1136-1141.
- SPRECKELS, V.; SCHLIENKAMP, A.; JACOBSEN, K., 2008: Geometric Characteristics of Digital Frame Cameras. In: Proceedings of EARSeL Joint Workshop "Remote Sensing - New Challenges of High Resolution", Ruhr-Universität Bochum, Deutschland, 2008. Auf CD-ROM.
- SPRECKELS, V.; SYREK, L.; SCHLIENKAMP, A., 2010: DGPF-Project: Evaluation of Digital Photogrammetric Camera Systems – Stereoplotting. In: PFG 02/2010, S. 117 - 130.
- TALAYA, J.; KORNUS, W.; ALAMÚS, R.; SOLER, E.; PLA, M.; RUIZ, A., 2008: Analyzing DMC Performance in a Production Environment. In: The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Beijing, China, Vol. XXXVII, Part B4, 2008, pp. 1183-1188.

Überlegungen zum stufenlosen Übergang zwischen verschiedenen generalisierten 3D-Stadtmodellrepräsentationen

TASSILO GLANDER¹, JANETT BARESEL² & JÜRGEN DÖLLNER³

Zusammenfassung: Generalisierungsalgorithmen für virtuelle 3D-Gebäude- und Stadtmodelle leiten aus detaillierten Repräsentationen weniger detaillierte Repräsentationen in unterschiedlich starkem Generalisierungsgrad ab. Für eine kartographisch optimierte Darstellung von 3D-Stadtmodellen in interaktiven Anwendungen muss abhängig vom Maßstab bzw. vom Abstand zum Betrachter eine geeignete Abstraktionsstufe ausgewählt werden. In diesem Beitrag betrachten wir das Problem der Abbildung zwischen kontinuierlichem Maßstab und diskreten generalisierten Modellen und diskutieren Ideen zu Lösungen für den dynamischen Übergang zwischen verschiedenen Generalisierungsstufen eines 3D-Stadtmodells.

1 Einleitung

Durch die Weiterentwicklung der Erfassungs- und Fortführungstechniken nehmen Qualität und Komplexität virtueller 3D-Stadtmodelle weiter zu. Während die immer genauere Modellierung einer Stadt die Modelle vielseitiger macht, erfordern viele Anwendungen häufig einen hohen Detailgrad in einem Fokusbereich, hingegen einen geringeren Detailgrad des Modells im entsprechenden Kontextbereich. Generalisierungsalgorithmen für virtuelle 3D-Gebäude- und Stadtmodelle leiten automatisch aus detaillierten Repräsentationen reduzierte und abstrahierte Repräsentationen ab, die z. B. für effizientere Berechnung physikalischer Simulationen, optimierte Datenübertragung oder kartographische Visualisierung (MENG & FORBERG 2006) eine Voraussetzung bilden.

Insbesondere für die kartographische Visualisierung mittels interaktiver 3D-Anwendungen werden generalisierte virtuelle 3D-Stadtmodelle benötigt, um Informationen optimal im Informationsgrad anzupassen und damit zu kommunizieren (JOBST ET AL. 2008). Zu großer Detailreichtum in peripheren Bereichen wird z. B. eher als ablenkendes „visuelles Rauschen“ wahrgenommen.

Interaktive 3D-Anwendungen sind im Vergleich zur klassischen Karte durch einen kontinuierlichen (1) und veränderlichen (2) Maßstab sowie durch Fokus-&-Kontext-Visualisierung (3) gekennzeichnet.

- (1) Der Nutzer betrachtet im Allgemeinen eine perspektivische Darstellung des Modells, die Vordergrundobjekte größer abbildet als Hintergrundobjekte; dabei ist der Grad der Verzerrung direkt von der Entfernung zum virtuellen Standpunkt abhängig. Somit treten in einem einzelnen erzeugten Bild der 3D-Anwendung eine Vielzahl von Maßstäben auf; im Gegensatz zur klassischen Karte, die üblicherweise genau einen Maßstab besitzt.

¹Tassilo Glander, Hasso-Plattner-Institut, Universität Potsdam, E-Mail: tassilo.glander@hpi.uni-potsdam.de

²Janett Baresel, Hasso-Plattner-Institut, Universität Potsdam, E-Mail: janett.baresel@hpi.uni-potsdam.de

³Jürgen Döllner, Hasso-Plattner-Institut, Universität Potsdam, E-Mail: doellner@hpi.uni-potsdam.de

- (2) Der Nutzer kann durch Navigation seinen Standpunkt nahezu stufenlos verändern um die virtuelle Umgebung zu erkunden. Dadurch ergibt sich kontinuierlich eine neue Entfernung zu den dargestellten Objekten, so dass in der perspektivischen Darstellung eine kontinuierliche Menge von Maßstäben auftritt.
- (3) Der Nutzer kann abhängig von Aufgaben, Nutzungskontext und Nutzerprofil Fokusbereich auswählen, so dass eine Schwerpunktsetzung in der Visualisierung ermöglicht wird. Insbesondere ergibt sich im Allgemeinen eine Aufteilung in momentane Fokus-&-Kontext-Bereiche.

2 Problemstellung

Virtuelle 3D-Stadtmodelle werden durch Generalisierungsverfahren transformiert, um so eine abstrakte Repräsentation zu erhalten. Dabei lassen sich die Generalisierungsverfahren durch Parameter steuern. Da die Verfahren meist aufwändige Prozessschritte beinhalten, wird die Generalisierung üblicherweise als Vorverarbeitung durchgeführt und nicht nach Bedarf zur Laufzeit. Die wiederholte Anwendung eines Generalisierungsverfahrens mit verschiedenen Steuerparametern erzeugt eine diskrete, endliche Menge von unterschiedlich abstrakten Modellen (MENG & FORBERG 2006).

In einer interaktiven 3D-Anwendung muss aus dieser Menge je nach angemessenem Generalisierungsgrad das geeignete Modell ausgewählt und angezeigt werden. Eine plausible Annahme ist es, den Generalisierungsgrad entsprechend der Entfernung zum Betrachter zu wählen. Alternative Metriken für den Generalisierungsgrad sind Wichtigkeit oder Entfernung zu wichtigen Punkten (*points-of-interest*) oder Flächen (*areas-of-interest*). In jedem Fall muss aus einem kontinuierlichen Intervall auf eine diskrete Menge abgebildet werden (VAN KREVELD 2001).

Ein einfacher Ansatz wählt jeweils aus der Menge der Repräsentationen die dichteste und schaltet beim Übergang eines Schwellwertes zur nächsten Repräsentation um. Diese Darstellung führt zu störenden *popping*-Artefakten, die ungewollt die Aufmerksamkeit des Betrachters auf sich ziehen (WARE 2004). Durch die fehlende Bild-zu-Bild-Kohärenz kann schwer vermittelt werden, dass es sich bei beiden Repräsentationen um dasselbe Objekt in unterschiedlicher Generalisierung handelt.

Für eine bessere Darstellung müssen Zwischenrepräsentationen gefunden werden, die den Übergang optisch „weich“ gestalten, d. h. sich im Übergangsbereich kontinuierlich verändern. Dabei kann dieser Übergang je nach Richtung komplex → abstrakt (Generalisierung) oder abstrakt→komplex (Detaillierung) unterschiedlich gestaltet sein.

3 Formen der 3D-Generalisierung

Generalisierungsverfahren im Kontext von 3D-Gebäudemodellen verarbeiten Geometrie um eine vereinfachte Repräsentation zu erhalten. Dabei stehen gebäudetypische Eigenschaften wie Erhaltung rechter Winkel und Parallelität im Vordergrund.

Viele Ansätze für Einzelgebäudegeneralisierung basieren auf der Annahme, dass ein Gebäude durch einen neuen geometrischen Körper bestehend aus wenigen charakteristischen, planaren

Primitiven, d. h. Dreiecke oder Vierecke, generalisiert werden kann. Entsprechend werden diese auf verschiedene Weise abgeleitet, etwa aus charakteristischen Halbebenen (KADA 2006), der Zerlegung in Komponenten mittels *constructive solid geometry* (CSG) (THIEMANN 2002) oder durch Vereinfachung der projizierten 2D-Grundrisse (RAU ET AL. 2006). In (FORBERG 2007) werden zur Detailreduktion nahe Primitive in gemeinsame Ebenen verschoben.

Alternativ gibt es auch Versuche, die Gebäudegeometrie durch wenige grundsätzliche Formen auszudrücken, beispielsweise durch prototypische *Template*-Geometrie, die durch Parameter an die konkrete Form angepasst werden (THIEMANN & SESTER 2006), oder die Abbildung und Zerlegung auf Elemente einer Grammatik (GUERCKE ET AL. 2008)

Für die Generalisierung von mehreren Gebäuden werden für lineare Gebäudegruppen deren 2D-Projektionen entlang der Hauptachsen vereinfacht, und anschließend extrudiert und geschnitten (ANDERS 2005). In (GLANDER & DÖLLNER 2009) werden aus Zellen des Straßennetzes neue Bebauungsblöcke an Stelle der Einzelgebäude gesetzt.

4 Übergänge zwischen Generalisierungsstufen

Für topographische Karten haben sich komplexe Regelwerke etabliert, in denen definiert ist, welche Objekte in welchem Stil je nach Maßstab dargestellt werden. Während diese Regelwerke sich zwischen Ländern und Kartenverlagen durchaus unterscheiden, gibt es übergreifend anerkannte Konzepte, etwa einzuhaltende Mindestdimensionen oder die Auswahl von in einem Maßstab zu zeigenden Objektarten (HAKE ET AL. 2002). Auch für digitale Medien und virtuelle 3D-Umgebungen stellen Grundlagenarbeiten Mindestdimensionen und Gestaltungsprinzipien fest (HÄBERLING 2003).

Allerdings ist in einer interaktiven 3D-Anwendung neben der Auswahl des geeigneten Generalisierungsgrades für einzelne Objekte die Art und Weise des Übergangs zwischen Generalisierungsgraden von Bedeutung. Dabei sollte der Übergang einerseits subtil sein, um die Aufmerksamkeit des Betrachters nicht zu stark zu binden. Andererseits soll durch den Wechsel der Bezug zwischen den beiden Repräsentationen kommuniziert werden, beispielsweise, wenn eine Gruppe von Gebäuden durch ein aggregierendes Objekt ersetzt wird.

4.1 Abbildung des Generalisierungsparameters

Formal kann der Generalisierungsgrad g als ein kontinuierlicher Parameter betrachtet werden, der die Darstellung der geographischen Objekte steuert. Für die Frage der Übergänge ist interessant, wie das kontinuierliche Intervall auf eine diskrete Menge von Modellrepräsentationen abgebildet wird.

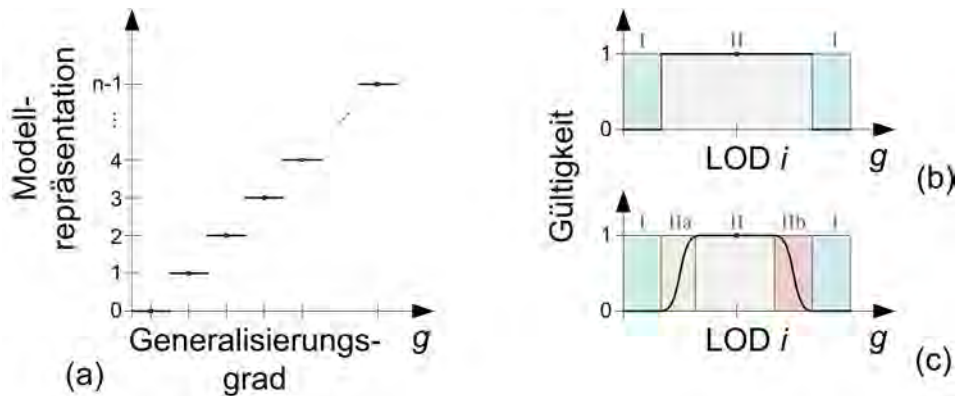


Abb. 1: Abbildung des kontinuierlichen Generalisierungsgrads auf diskrete Repräsentationen (a). Statt binärer Gültigkeit (b) kann eine Repräsentation in Übergangsphasen auch teilweise gültig sein (c).

Eine einfache Abbildung wechselt für eine weniger detaillierte Darstellung die Modellrepräsentation durch das vergrößerte Modell aus (Abb. 1). Da jede Repräsentation für einen konkreten Generalisierungsgrad (*level of detail*, LOD) vorberechnet wird, dürfte sie nur für diesen einen Maßstab angezeigt werden. Damit in einer interaktiven Umgebung mit kontinuierlichem Maßstab immer eine Repräsentation dargestellt wird, muss die Gültigkeit ausgeweitet werden. Da es nicht für jeden gewünschten Generalisierungsgrad eine korrekte Repräsentation gibt, wird so zumindest die geeignetste angezeigt. Schwellwerte beschreiben den Generalisierungsgrad, bei dem zu einer neuen Repräsentation gewechselt werden muss, um den Fehler möglichst klein zu halten. Das „harte“ Umschalten entspricht dem Wechsel des (diskreten) Maßstabs, beispielsweise in einem webbasierten Kartendienst wie Google Maps. In einer perspektivischen 3D-Darstellung führt dies bei Navigation und damit verbundenen Maßstabswechseln zu ständigen Austauschprozessen der Geometrie einzelner Szenenobjekte. Beispielsweise könnte ein Gebäudemodell mit detailliertem Balkon und Dach durch einen einfachen Quader ersetzt werden, wenn sich der Betrachter entfernt.

Eine komplexere Abbildung führt Zwischenwerte und Phasen in die Gültigkeit eines bestimmten LODs ein, so dass eine Repräsentation weich ein- und ausgeblendet wird (GLANDER & DÖLLNER 2009). Für Ein- und Ausblendphasen (IIa, IIb) können verschiedene Funktionen angenommen werden, etwa lineare oder Spline-basierte Interpolation. Da diese Phasen nur der visuellen Unterstützung dienen und die Darstellungen keine echten Zwischengeneralisierungen sind, sollten diese Phasen sehr kurz sein. Beim Stoppen der Navigation sollte der Übergang in die nächste Phase fortgesetzt werden, damit die Zwischenformen nicht in statischen Ansichten erhalten bleiben.

Die Einführung von kontinuierlichen Gültigkeitswerten für eine Repräsentation erfordert gleichzeitig, dass in den Zwischenphasen (IIa, IIb) pro Szenenobjekt zwei Repräsentationen angezeigt werden. Während z. B. LOD₂ gerade ausgeblendet wird (IIb), wird gleichzeitig bereits LOD₃ eingeblendet.

4.2 Grundtechniken

Um den angestrebten weichen Übergang umzusetzen, werden Interpolationsverfahren benötigt. Anhand eines kontinuierlichen Mischparameters wird stufenlos zwischen zwei geometrischen Repräsentationen umgeschaltet. Die folgenden Möglichkeiten gibt es grundsätzlich:

Das **bildbasierte Mischen** erzeugt Rasterbilder der beiden Repräsentationen und berechnet daraus gewichtete Mittelbilder. Ein Beispiel für dieses Verfahren ist das *alpha blending*.

Beim geometrischen **Morphing** werden Knoten einer geometrischen Repräsentation einer anderen zugeordnet (*vertex correspondence problem*), und beim Übergang in Richtung dieser Zielknoten bewegt (*vertex path problem*). Morphing hat sich bei LOD-Übergängen von Geländemodellen etabliert.

Durch die Einführung von zusätzlichen **Hilfskörpern** kann der Übergang kommuniziert werden.

5 Diskussion von Ansätzen für Übergänge

5.1 Alpha blending

Das bildbasierte Mischen anhand eines Mischparameters α ist eine sehr einfache Möglichkeit für einen weichen Übergang. Für Objekte in einer Übergangsphase werden jeweils Bilder erzeugt, die anschließend gemischt werden. Dabei gehen die Farbwerte mit dem Gültigkeitswert gewichtet in die Berechnung ein. Dieser Ansatz ist einfach umzusetzen und ermöglicht einen subtilen und stufenlosen Übergang (Abb. 2). Darüber hinaus lässt er sich mit beliebigen Generalisierungsverfahren anwenden, da keine Anforderungen an die Art der Geometrie gestellt werden oder Zusatzinformationen benötigt werden. Nachteilig an dieser Art des Übergangs ist der reduzierte Kontrast im Zwischenbereich, außerdem ist die Tiefenwirkung reduziert.

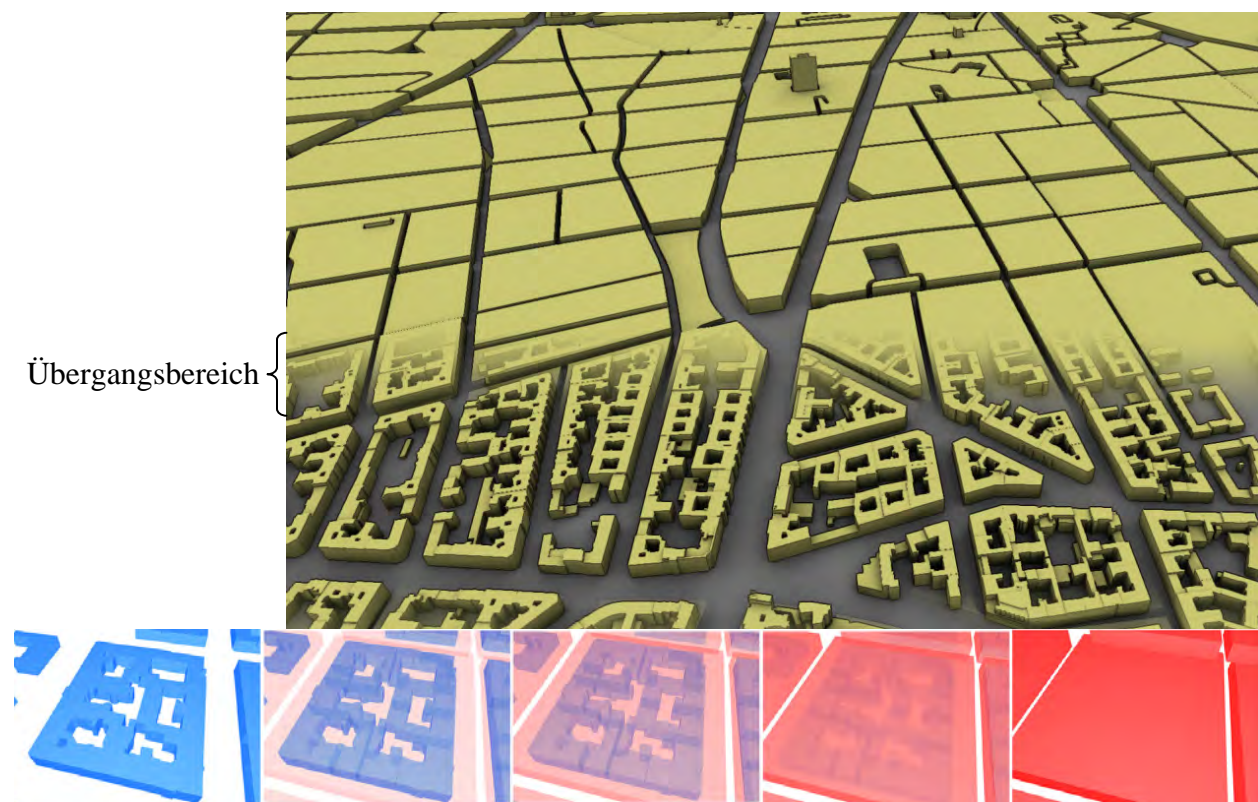


Abb. 2: Bildbasiertes Mischen führt zu einem halbdurchsichtigen Übergangsbereich.

5.2 Morphing

Morphing-Verfahren ermöglichen ebenfalls den stufenlosen Übergang von einem geometrischen Objekt zum anderen. Ein Morphing-Parameter kontrolliert analog zum bildbasierten Mischen, welchen Einfluss die beiden beteiligten Objekte haben sollen.

Morphing hat Potential für eine sinnvolle Visualisierung von Übergangszuständen, da hier die Probleme von verringertem Kontrast und Verlust von Tiefenhinweisen nicht auftreten. Die geometrische Formveränderung kann in vielen Fällen sehr natürlich und gleichzeitig subtil wirken, etwa beim sukzessiven Entfernen/Hinzufügen von Details eines Gebäudes. Dabei muss sichergestellt werden, dass typische Gebäudeeigenschaften wie Rechtwinkligkeit und Parallelität während des Morphings erhalten bleiben, z. B. indem mehrere Knoten gleichzeitig verschoben werden (SESTER & BRENNER 2004).

Das Verfahren ist im Vergleich zu bildbasierten Ansätzen deutlich aufwendiger, da vor dem eigentlichen Morphing Knoten der beteiligten geometrischen Repräsentationen einander zugeordnet werden müssen. Eine Möglichkeit ist, dass bereits während des Generalisierungsverfahrens Informationen über die Veränderung gespeichert werden. Dies ist für Simplifizierungsverfahren, die kleinere geometrische Details auf (gemeinsame) Ebenen zurückführen (KADA 2006, THIEMANN 2002, FORBERG 2007) denkbar. Ein Beispiel dafür ist Abb. 3, in der die Grundrissvereinfachungsregeln von (STAUFENBIEL 1973) analog zu (SESTER & BRENNER 2006) auf einen extrudierten Grundriss angewendet werden, und dabei die Knotenzuordnung während der Vereinfachung gespeichert wird.

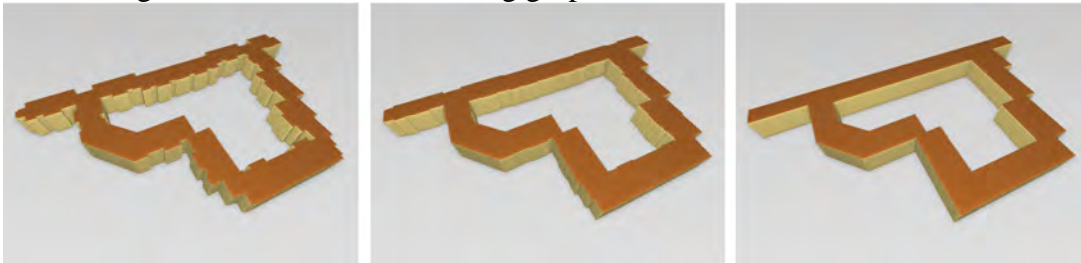


Abb. 3: Beispielhafte Darstellung für Morphing nach (SESTER & BRENNER 2006)

Alternativ können die Eckpunkte auch nachträglich einander zugeordnet werden. Dieses Verfahren bietet sich an, wenn die geometrischen Repräsentationen bereits erzeugt wurden, oder eine Zuordnung der Knoten während des Generalisierungsverfahrens nicht einfach möglich ist, etwa bei (Thiemann & Sester 2006, Glander & Döllner 2009). Für die Zuordnung müssen eventuell zusätzliche Knoten in beide Modelle aufgenommen werden, beispielsweise über ein Zwischenobjekt (z. B. Kugel oder Würfel). Für n -zu-1-Morphing von Objekten, beispielsweise wenn Einzelgebäude zu größeren Blöcken zusammengefasst werden, können möglicherweise nicht alle Knoten abgebildet werden. In Abb. 4 wird illustriert, wie mehrere Einzelgebäude durch ein Bebauungsobjekt ersetzt werden. Beim Abbildungsprozess können nur Außenflächen der LOD_i -Geometrie sinnvoll den begrenzenden Kanten der LOD_{i+1} -Geometrie zugeordnet werden. Auch bei Einzelgebäuden können in konkaven Bereichen für einzelne Kanten/Flächen keine korrespondierenden Kanten/Flächen gefunden werden.

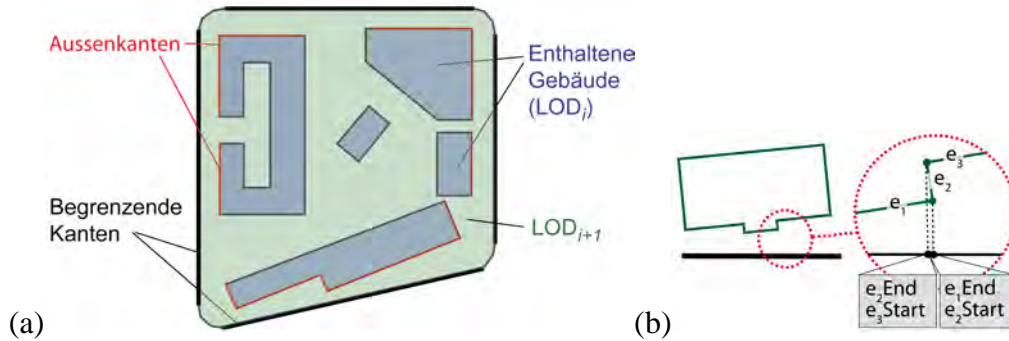


Abb. 4: Zuordnung von Flächen der LOD_r -Gebäude zu Flächen der LOD_{i+1} -Geometrie ist nur teilweise sinnvoll (a). Auch konkave Bereiche führen durch überlappende Kanten zu Zuordnungsproblemen (b).

Morphing ist bei Einzelgebäudevereinfachung eher unproblematisch, vor allem, wenn die Abbildung der Knoten bereits während des Generalisierungsverfahrens erfolgen kann. Bei der nachträglichen Zuordnung und insbesondere der Anwendung auf mehrere Gebäude ist es grundsätzlich schwierig, degenerierte Zwischengeometrie zu vermeiden. Außerdem können Genus-Änderungen auftreten, d. h. die Anzahl der Objekte ändert sich, oder Löcher entstehen bzw. fallen weg. Dies erschwert einen kontinuierlichen Übergang (Abb. 5).

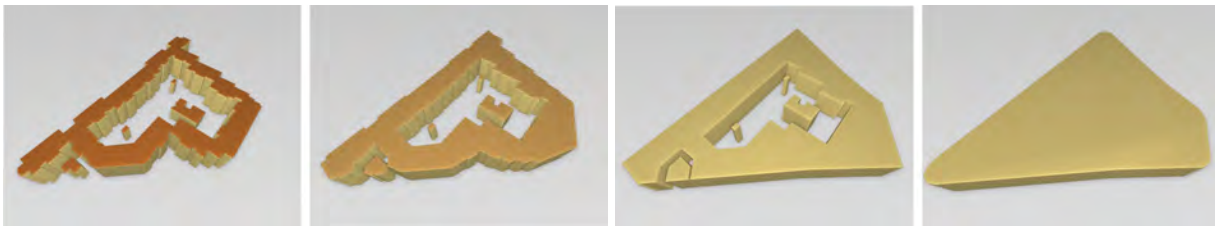


Abb. 5: Beim Morphing auf Außenkanten können Innenflächen nicht abgebildet werden, so dass die Repräsentationen schließlich sprunghaft ausgetauscht werden.

5.3 Zusatzgeometrie

Die Einführung von zusätzlicher Geometrie ermöglicht eher die Kommunikation von Generalisierungsbeziehungen als direkt einen weichen Übergang zwischen Repräsentationen. Beispielsweise können neu entstehende geometrische Details, z. B. ein Balkon, durch eine Baugerüstanalogie angekündigt werden. Auch für Geometrie, die Einzelgebäude aggregiert, können Gerüste (Abb. 6) oder kontinuierlich vergrößerte Wände des generalisierenden Blocks (Abb. 7.) als Hilfsgeometrie den Übergang begleiten.



Abb. 6: Die Gerüstmetapher dient der Ankündigung einer anderen Repräsentation.

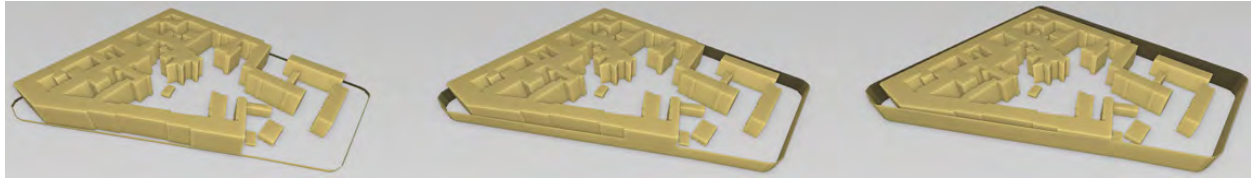


Abb. 7: Vertikal wachsende Wände verdeutlichen den aggregierenden Block.

Allerdings ist für diese Art des Übergangs fraglich, ob die Metapher verständlich genug ist und durch die Zusatzgeometrie nicht zu sehr die Aufmerksamkeit der Nutzer abgelenkt wird.

6 Fazit

In diesem Artikel wird das Problem der Visualisierung von wenigen, diskreten und verschieden stark generalisierten Gebäudemodellen im Kontext von virtuellen und interaktiven 3D-Umgebungen mit kontinuierlichem Maßstab diskutiert. Während die bildbasierten Übergänge relativ einfach umsetzbar sind, erscheint das Morphing im Allgemeinen größeres Potential für verständliche Transformation zu haben. Ansätze mit Zusatzgeometrie sind eher als Ergänzung zur Unterstützung der Darstellung zu sehen. Für die kartographische Gestaltung von virtuellen 3D-Umgebungen müssen neue Ansätze für die kontinuierliche Darstellung von generalisierten Gebäudemodellen gefunden werden. Die vorgestellten Ansätze sollen dabei Impulse für weitere Diskussion geben.

7 Danksagung

Dieses Forschungsprojekt wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert und ist Teil der InnoProfile Nachwuchsforschergruppe 3D-Geoinformationen (www.3dgi.de). Wir danken außerdem Benjamin Richter für seinen Beitrag zur Implementierung.

8 Literaturverzeichnis

- ANDERS, K., 2005: Level of Detail Generation of 3D Building Groups by Aggregation and Typification. Proc. 22nd Int. Cartographic Conference, La Coruña, Spain. S. 11–16.
- GLANDER, T. & DÖLLNER, J., 2009: Abstract Representations for Interactive Visualization of Virtual 3D City Models. *Computers, Environment and Urban Systems*, **33**(5), S. 375–387.
- GUERCKE, R., BRENNER, C. & SESTER, M., 2008: Data Integration and Generalization for SDI in a Grid Computing Framework. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Bd. XXXVII.
- HÄBERLING, C., 2003: Topografische 3D-Karten: Thesen für kartografische Gestaltungsgrundsätze. Dissertation.
- HAKE, G., Grünreich, D., Meng, L., 2002: *Kartographie*. 8. Ed., Walter de Gruyter.
- JOBST, M. & DÖLLNER, J., 2008: 3D City Model Visualization with Cartography-Oriented Design. 13th International Conference on Urban Planning, Regional Development and Information Society (REAL CORP), S. 507–516.

- KADA, M., 2006: 3D Building Generalization based on Half-Space Modeling. Joint ISPRS Workshop on Multiple Representation and Interoperability of Spatial Data.
- FORBERG, A., 2007: Generalization of 3D building data based on a scale-space approach. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, **62**(2), S. 104–111.
- MENG, L. & FORBERG, A., 2006: 3D Building Generalisation, Challenges in the Portrayal of Geographic Information: Issues of Generalisation and Multi Scale Representation. Elsevier, S. 211–232.
- RAU, J., CHEN, L.-C., TSAI, F., HSIAO, K.H. & HSU, W.C., 2006: LOD Generation for 3D Polyhedral Building Model. *Advances in Image and Video Technology*, S. 44–53.
- SESTER, M. & BRENNER, C., 2004: Continuous Generalization for Visualization on Small Mobile Devices. *Developments in Spatial Data Handling*, S. 355–368.
- STAUFENBIEL, W., 1973: Zur Automation der Generalisierung topographischer Karten mit besonderer Berücksichtigung großmaßstäbiger Gebäudedarstellungen. Dissertation.
- THIEMANN, F., 2002: Generalization of 3D Building Data. *Geospatial Theory, Processing and Applications*, **34**(4), S. 286–290.
- F. THIEMANN & M. SESTER, 2006: 3D-Symbolization Using Adaptive Templates. *Proceedings of ISPRS Technical Commission II Symposium*, S. 49–54.
- VAN KREVELD, M., 2001: Smooth Generalization for Continuous Zooming. *Proc. 20th International Cartographic Conference (ICC'01)*, S. 2180–2185.
- WARE, C., 2004: *Information Visualization: Perception for Design*. Morgan Kaufmann.

3D-Stadtmodelle – Automatische Detektion, Modellierung und Qualitätskontrolle von Gebäudemodellen

PETER DORNINGER¹ & REINHARDPRINZ²

Zusammenfassung: Die Zahl der Anwendungsbereiche für 3D-Stadtmodelle wächst stetig. Typischerweise werden sie zur Bestimmung von baulichen Veränderungen (change-detection), als Basis für Solarpotentialanalysen, als Planungsgrundlage oder für Marketingzwecke (google, bing) verwendet. Die Art der Anwendung hängt stark von der Qualität der Modelle ab. Überdies entscheiden häufig begrenzte Budgets ob entsprechende Datenerfassungskampagnen und die meist zeit- und kostenintensive Auswertung und Modellierung realisierbar sind. In diesem Beitrag wird ein automatisierter Workflow zur Erstellung von 3D-Stadtmodellen aus Punktwolken vorgestellt. Die Punktdaten können mittels Airborne Laserscanning (ALS) erfasst oder auch aus Stereobildern abgeleitet worden sein. Es werden Methoden zur Gebäudedetektion, Grundrisspolygonableitung und Modellgenerierung vorgestellt. Besonderer Wert wird auf eine automatisierte Qualitätsanalyse gelegt, um einerseits die Vollständigkeit zu überprüfen, andererseits aber vor allem um eine hohe Zuverlässigkeit der generierten Gebäudemodelle zu gewährleisten. Die erzielbaren Ergebnisse werden an Hand von großflächigen Tests in dicht verbautem wie auch in ländlichem Siedlungsgebiet dargestellt und analysiert.

1 Einleitung

Der Aufbau eines 3D-Stadtmodells erfordert die Erfassung und Modellierung von Gebäuden sowie einer Vielzahl weiterer Objekte des städtischen Raumes. Digitale Oberflächen-Modelle (DOM) können automatisiert aus Airborne Laserscanning (ALS) Daten [SHAN, J. & TOTH] oder aus Bilddaten [HIRSCHMÜLLER] abgeleitet werden. Sie repräsentieren die Topographie sowie alle natürlichen (Vegetation) und künstlichen (Gebäude, Straßen, Leitungen, etc.) Objekte. In Verbindung mit Texturinformation können sie für Visualisierungsanwendungen verwendet werden. Weiterführende Analysen sind jedoch nur begrenzt möglich, da keine explizite Objektbildung erfolgt. Um ein 3D-Stadtmodell im Sinne eines Geoinformations-Systems einsetzen zu können ist die explizite Ableitung von Geometriemodellen, basierend auf einem topologischen Modell bestehend aus Knoten, Kanten und Flächen notwendig. In Bezug auf Gebäudemodelle bedeutet dies, dass alle geometrierelevanten Gebäudeteile (Dach- und Wandflächen) modelliert werden müssen.

Bei der Ableitung von Gebäudemodellen aus Punktwolken können zwei Schritte unterschieden werden: *Gebäudedetektion* und *Modellableitung*. In vielen Fällen kann bei der Gebäudedetektion auf vorhandene Plandaten (z.B. Kataster, Naturstandsaufnahme, Luftbildauswertung) zurückgegriffen werden. Der Vorteil dabei ist, dass eine konsequente Erweiterung des gegebenen Datenbestandes möglich ist. Allerdings werden Veränderungen (z.B. neue Häuser oder

¹ Peter Dorninger, TU Wien, Christian Doppler Labor „Räumliche Daten aus Laserscanning und Fernerkundung“, Gußhausstraße 27-29, 1040 Wien, Österreich; pdo@ipf.tuwien.ac.at

² Reinhard Prinz, Vermessung Schmid, Inkustraße 1-7, Stg. 3, 1. OG, Büropark Donau, 3400 Klosterneuburg, Österreich; prinz@geoserve.co.at

Zubauten) nicht erfasst. Über dies handelt es sich bei derartigen Bestandsdaten meist um Aufnahmen die über einen längeren Zeitraum hinweg erfasst wurden. Es ist daher zu erwarten, dass der Datenstand nicht aktuell ist und insbesondere in Bezug auf die zur Verfügung stehende Punktwolke Diskrepanzen aufweist. Daher ist es meist sinnvoll im Zuge der Ableitung von Gebäudemodellen aus Punktwolken bei der Einbeziehung von Bestandsdaten eine umfassende Kontrolle und ggf. Verbesserung der Bestandsdaten durchzuführen.

Der im Folgenden beschriebene Ansatz ist eine vollständige Prozessierungskette mit den Schritten Detektion potentieller Gebäuderegionen, Bestimmung von regularisierten Gebäudeumfahrungspolygonen, Ableitung topologisch korrekter Einzelgebäudemodelle und einer abschließenden Qualitätskontrolle. Um dem stetig wachsenden Genauigkeits- und Detaillierungspotential verfügbarer Daten zu genügen, wurde ein datengetriebener Ansatz gewählt. Im Gegensatz zu sogenannten modellgetriebenen Ansätzen welche darauf basieren Objekte aus einem vordefinierten Objektkatalog an die vorhandenen Daten anzupassen, ist die einzige Modellannahme des beschriebenen Ansatzes die, dass das zu modellierende Gebäude durch ebene Flächen beschrieben werden kann. Im Allgemeinen wird eine Zusatzbedingung angewandt, welche vorgibt, dass Dachlandschaften entlang der Traufenlinien durch vertikale Wandebenen mit dem Gelände zu verbinden sind. Wenn genügend Punkte an den begrenzenden Wandflächen erfasst wurden, muss diese Bedingung nicht angewendet werden.

Im folgenden Absatz werden die einzelnen Arbeitsschritte im Rahmen der Gebäudemodellierung beschrieben. Anschließend beschreiben wir die für den gewählten Ansatz relevanten Methoden und demonstrieren die erreichbaren Ergebnisse in der praktischen Anwendung.

2 Related Work

Die meisten Algorithmen zur *Gebäudedetektion* basieren auf Rasterdaten um die Datenmenge zu reduzieren, Unzulänglichkeiten in den Daten zu eliminieren und nicht zuletzt um die Prozessierung zu vereinfachen und zu beschleunigen, da die Verarbeitung von Rasterdaten im Allgemeinen schneller (und einfacher) implementiert werden kann als jene von Originalpunkten. Um ein Digitales Geländemodell (DGM) aus Rasterdaten zu bestimmen, werden so genannte Filtermethoden [SITHOLE & VOSSELMAN, 2004, KRAUS & PFEIFER, 1998] verwendet. Zur Bestimmung Digitaler Oberflächenmodelle (DOM) gibt es ebenfalls zahlreiche Verfahren (z.B. HOLLAUS ET AL., 2010). Aus der Differenz von DOM und DGM lässt sich ein normalisiertes Digitales Geländemodell (nDSM) berechnen. Im nDSM können alle Objekte die sich aus dem Gelände erheben detektiert werden. Durch Verwendung von lokalen Rauigkeitsmaßen können dann potentielle Gebäude von Vegetation und anderen Objekten unterschieden werden [NARDINOCCHI & FORLANI, 2001, MORGAN & TEMPFLI, 2000].

Für jede potentielle Gebäuderegion muss eine polygonale *Gebäudeumfahrung* bestimmt werden. Werden keine Dachüberstände modelliert, so entspricht diese den 2D-Projektionen der Terrain Intersection Curve (Verschnitt des Gebäudes mit dem Gelände) und der Traufenlinie. Die meisten Verfahren leiten die Gebäudeumfahrung durch Generalisierung und Regularisierung aus den Grenzen der Gebäuderegionen ab [SAMPATH & SHAN, 2007, JWA ET AL. 2008].

Segmentierung ist die Zuordnung einzelner Objekte (Einzelpunkte der Punktwolke) zu übergeordneten Objekten (z.B. Ebenen). Gemäß der in der Einleitung genannten Annahme, dass

ein Gebäude durch eine Anzahl von ebenen Flächen beschrieben werden kann, erlaubt eine Segmentierung welche die Gesamtheit der Punkte eines Gebäudes ebenen Flächen zuweist eine vollständige Beschreibung des Gebäudes, vorausgesetzt, alle notwendigen Dachflächen wurden hinreichend durch ALS-Punkte erfasst. [LEE & SCHENK, 2002, MAAS & VOSSELMAN, 1999, ROTTENSTEINER ET AL., 2005] beschreiben Ansätze zur Ebenendetektion zum Zwecke der Gebäudemodellierung basierend auf Rasterdaten (vgl. Gebäudedetektion). Der entscheidende Nachteil dieser sogenannten 2.5D-Ansätze besteht darin, dass eine ausgezeichnete Richtung (i.A. z-Richtung) definiert werden muss. Dadurch können steile Flächen nur bedingt und Überhänge nicht modelliert werden, wenngleich derartige Flächen auf Grund der stetig steigenden Punktdichte bzw. durch entsprechende Aufnahmekonfigurationen (z.B. größere Öffnungswinkel, geneigter Einbau des Scanners) vermehrt erfasst werden. Da diese Einschränkung bei terrestrischen Anwendungen nicht möglich ist, werden dort ausschließlich 3D-Ansätze angewendet (z.B. ALHARTHY & BETHEL, 2002, TÓVARI & VÖGTLE, 2004).

Im Bereich der *Gebäudemodellierung* gibt es, wie bereits erwähnt, zwei unterschiedliche Ansätze mit anwendungsspezifischen Vor- und Nachteilen. Bei der modellgetriebenen Modellierung (z.B. MAAS & VOSSELMAN, 1999) wird versucht jenes Modell aus einem entsprechenden Objektkatalog (z.B. Sattel-, Walm-, Flachdach) zu wählen, welches die gegebenen Daten am besten beschreibt. Dadurch wird immer ein topologisch korrektes (weil vorab definiertes) Modell pro Haus erstellt. Dies kann insbesondere bei "schlechten" Daten ein Vorteil sein. Im Gegenzug dazu führen modellgetriebene Ansätze im Allgemeinen zu einer stärkeren Generalisierung. Das heißt, Informationen die durchaus in den Daten vorhanden sind (z.B. Dachaufbauten, Vorsprünge, etc.) werden nicht modelliert, wenn sie durch den Objektkatalog nicht abgedeckt werden. Diese Einschränkungen sind bei datengetriebenen Ansätzen nicht zu erwarten, da sich dabei die Modellbildung an die Daten anpasst (z.B. Erstellung eines Modelles durch paarweisen Verschnitt von ebenen Flächen). Dafür besteht die Gefahr, dass Dachflächen nicht vollständig modelliert werden. In diesem Fall ist es daher unumgänglich eine umfassende *Qualitätskontrolle* der Ergebnisse durchzuführen.

3 Methodik

Unsere Methode verwendet einen 3D-Segmentierungsansatz zur Bestimmung ebener, zusammenhängender Bereiche in 3D-Punktwolken. Als Entscheidungskriterium ob zwei Punkte zur selben Ebene zugewiesen werden, wird das von [POTTMANN & WALLNER, 1999] ursprünglich für die Anwendung im 2.5D-Raum definierte Abstandmaß, erweitert für die Anwendung im Euklidischen 3D-Raum, verwendet. Die mathematische Herleitung ist in [DORNINGER & PFEIFER 2008] beschrieben. Die geometrische Interpretation dieses Abstandmaßes zwischen zwei Ebenen der Form

$$0 = a_0 + a_1x + a_2y + a_3z$$

ist das Mittel der quadratischen Abstände zwischen den beiden Ebenen innerhalb eines Interessensgebietes Γ . Setzt man Γ gleich der Einheitskugel, so erhält man ein richtungsunabhängiges Abstandmaß. Abb. 1 zeigt wie sich unterschiedliche Abstandmaße

verhalten, wenn zwei Ebenen die einen Winkel von 1° einschließen um die horizontale x-Achse rotieren. Die strich-punktierte Linie zeigt das 2.5D Abstandmaß. Man kann deutlich erkennen, dass dieses Maß für vertikale Ebenen (90° , 270°) nicht definiert ist und bereits bei um 45° geneigten Ebenen etwa den doppelten Wert annimmt. Die strichlierte Linie zeigt das 3D-Abstandsmaß, allerdings innerhalb eines würfelförmigen Interessensgebietes. Die durchgezogene Linie zeigt das konstante Verhalten des verwendeten 3D-Abstandsmaßes innerhalb der Einheitskugel.

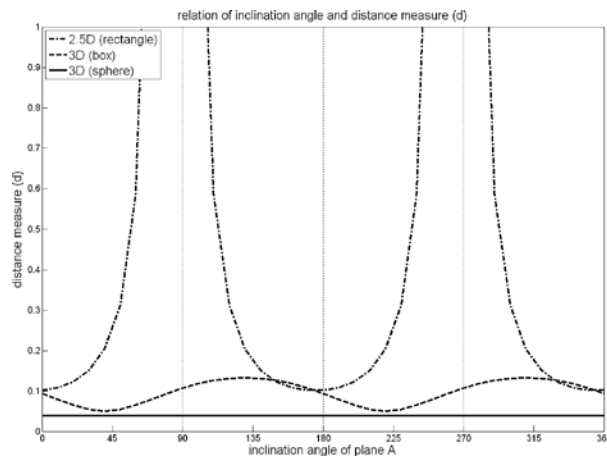


Abb. 1: Verhalten von 2.5D und 3D Abstandmaß in Bezug auf vertikale Referenzrichtung (z-Richtung)

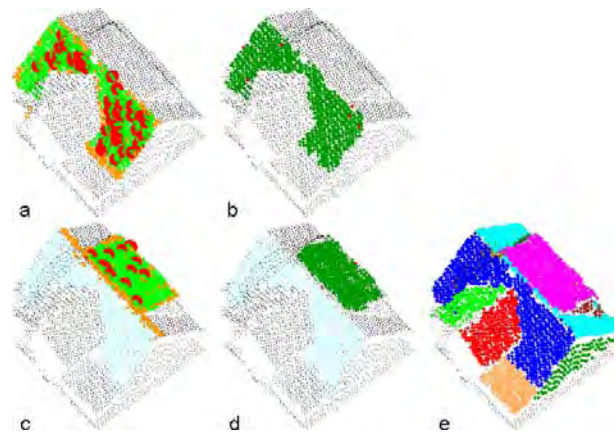


Abb. 2: Auffinden der ersten (a & b) und zweiten (c & d) Ebene; Ergebnis der Ebenendetektion (e)

Es wird angenommen, dass Punkte die zu einer ebenen (Dach)fläche gehören nahezu identische, lokal (innerhalb einer definierten 3D-Nachbarschaft) bestimmte Ausgleichsebenen haben. Theoretisch muss dieses Abstandsmaß im vierdimensionalen Parameterraum (a_0 bis a_4) paarweise für alle Punkte durchgeführt werden. Um den Rechenaufwand zu reduzieren untersucht der gewählte Ansatz lediglich die Randverteilungen der vier Parameter. Auf diese Weise können so genannte Seed-Cluster (Abb. 2a&c: rot) bestimmt werden. Ausgehend von diesen Seed-Clustern werden zunächst alle Punkte der Ebene zugeordnet, die innerhalb einer definierten Distanz zur Seed-Ebene (mittlere Ebene durch alle Punkte des Seed-Clusters) liegen (Abb. 2a&c: orange). Für jeden dieser Punkte wird das Abstandsmaß gegenüber der Seed-Ebene bestimmt und nur Punkte deren lokale Ausgleichsebenen innerhalb eines definierten Abstandes zur Seed-Ebene liegen werden akzeptiert (Abb. 2a&c: grün). Anschließend wird für diese Punkte eine robuste Ausgleichsebene bestimmt (Abb. 2b&d: grün). Die nun akzeptierten Punkte definieren ein Ebenensegment und werden aus der Grundgesamtheit entfernt (Abb. 2c&d: cyan). Für die verbleibenden Punkte wird die Berechnung wiederholt.

3.1 Gebäudeumrissbestimmung

Die Bestimmung der Gebäudeumrisse erfolgt zweistufig. Im ersten Schritt werden potentielle Gebäuderegionen bestimmt. Bei diesem rasterbasierten Ansatz wird zunächst die Durchdringungsrate für jede Rasterzelle bestimmt. Diese ist das Verhältnis der Anzahl der Punkte in der 3D-Nachbarschaft (Kugel) eines bestimmten Punktes zur Anzahl der Punkte

innerhalb seiner 2D-Nachbarschaft (vertikaler Zylinder). Bestimmt man dieses Verhältnis pro Gitterzelle für den höchsten Punkt, so ergibt sich für glatte Bereiche (Dachflächen, freies Gelände) ein hoher Wert (Anzahl der Punkte in 3D-Nachbarschaft ist identisch mit der Anzahl der Punkte in 2D-Nachbarschaft) und für raue Bereiche (Vegetation, Überhänge) ein niedriger Wert. Unter Berücksichtigung des nDSM können potentielle Gebäudeflächen gefunden werden:

hohe Durchdringungsrate && hoher z-Wert in nDSM = potentielle Gebäudefläche

Eine detaillierte Beschreibung des Algorithmus ist in [HÖFLE ET AL., 2009] zu finden. Als zweiter Schritt werden innerhalb dieser potentiellen Gebäudeflächen polygonale Hausumfahrungen bestimmt. Hierbei werden einerseits zusammenhängende Komponenten gesucht. Dadurch können Gebäude in einzelne Bestandteile aufgeteilt werden (z.B. Hauptgebäude und Nebengebäude). Außerdem wird bereits in diesem Schritt mit Hilfe des beschriebenen Segmentierungsansatzes nach Dachebenen gesucht. Für jede zusammenhängende Punktwolke deren Punkte auch Dachebenen zugewiesen werden konnten wird anschließend eine genäherte Umfahrung (Alpha-Shape) berechnet. Anschließend wird versucht, innerhalb dieser Umfahrung geradlinige Segmente zu bestimmen. Diese werden abschließend einer Regularisierung unterworfen (Winkelbedingungen) und ein geschlossenes Polygon wird als Hausumfahrung ausgegeben.

3.2 Gebäudemodellierung

Die Ableitung der Gebäudemodelle erfolgt gebäudeweise. Auf Basis der Segmentierung werden benachbarte Dachsegmente gesucht. Zusätzlich werden entlang der Traufenkanten (vertikale Projektion der Kanten des Grundrisspolygons mit den darüber befindlichen Dachsegmenten) vertikale Ebenen definiert. Anschließend wird versucht, für jede Dachfläche eine geschlossene, polygonale Umfahrung aus den Traufenkanten und den Schnittkanten paarweise benachbarter Dachebenen zu bilden. Kann keine vollständige Umfahrung (Dachpolygon) gefunden werden, so werden zusätzliche vertikale Ebenen (Sprungkanten) definiert.

3.3 Qualitätsanalyse

Die Beurteilung der Qualität erfolgt mehrstufig. Im Zuge der Modellbildung wird auf topologische Korrektheit geprüft (z.B.: sind alle Dachpolygone geschlossen; gibt es überlappende Dachpolygone; etc.). Anschließend werden mehrere Plausibilitätskriterien untersucht (z.B. Dachhöhe, Dachfläche, etc.). Eine umfassende Kontrolle liefert der Vergleich der Rohpunktwolke mit dem Dachmodell. Die Normalabstände aller Punkte gegenüber dem Dachmodell können automatisch bestimmt und statistisch ausgewertet werden. Ein Gebäude wird als korrekt akzeptiert, sofern alle genannten Kriterien erfüllt sind.

4 Experiment

An Hand des folgenden Beispiels wird die Funktionalität der einzelnen Schritte demonstriert. Die Daten wurden mit einem *Riegl LMS Q560* erfasst. Im freien Gelände beträgt die mittlere Punktdichte rund 15 Punkte pro Quadratmeter. Da dieser Scanner die Form des rückgestreuten

Signales aufzeichnet (Full-Waveform Digitizing Scanner) ist die Punktdichte in Bereichen mit Vegetation entsprechend höher. Der Datensatz enthält 10 Häuser eines Siedlungsgebietes (Einfamilienhäuser). In den dazwischen liegenden Gärten ist hohe Vegetation (Bäume und Büsche) vorhanden.

In Abb. 3 (oben) sind die pro Punkt berechneten Flächennormalen farbkodiert entsprechend dem lokalen Neigungswinkel dargestellt. Basierend auf den Flächennormalen und unter Berücksichtigung des daraus abgeleiteten, lokalen 3D-Rauigkeitsmaßes ist eine Klassifizierung der Punkte in Dachpunkte (glatt), Wandpunkte (glatt und vertikal) und Vegetationspunkte (rau) möglich. Mit Hilfe des DTM können geländenahe Punkte detektiert werden. Die farbkodierte Darstellung dieser punktbasierten Klassifizierung ist in Abb. 3 (unten) dargestellt.

Abb. 4 zeigt das Ergebnis der Gebäudedetektion. Die auf Basis des Bildverarbeitungsschrittes näherungsweise bestimmten Gebäudegrenzen wurden um zwei Meter erweitert um zu gewährleisten, dass das gesuchte Gebäude jeweils vollständig innerhalb der Näherung liegt (rote Flächen). Anschließend wurde für jedes Gebiet das regularisierte Gebäudepolygon (schwarz) bestimmt.

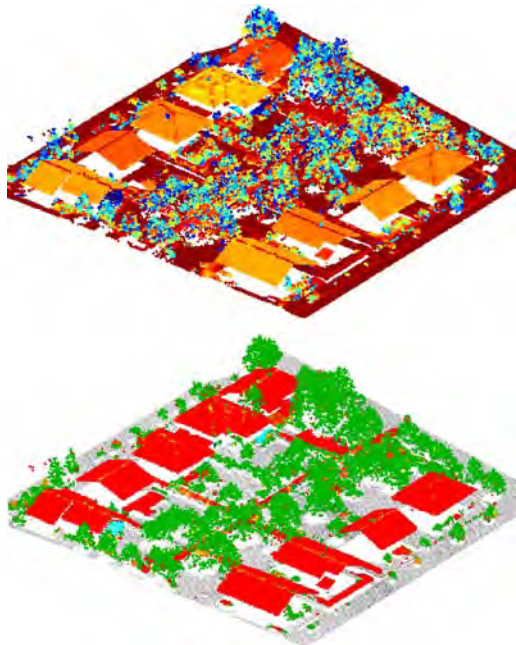


Abb. 3: Farbkodierte Darstellung der Neigung von robust bestimmten 3D-Flächennormalen pro Punkt (oben); Punktbasierte Klassifizierung (unten) – rot: Dachpunkte, cyan: Wandpunkte, grün: Vegetationspunkte; schwarz: DTM-nahe Punkte

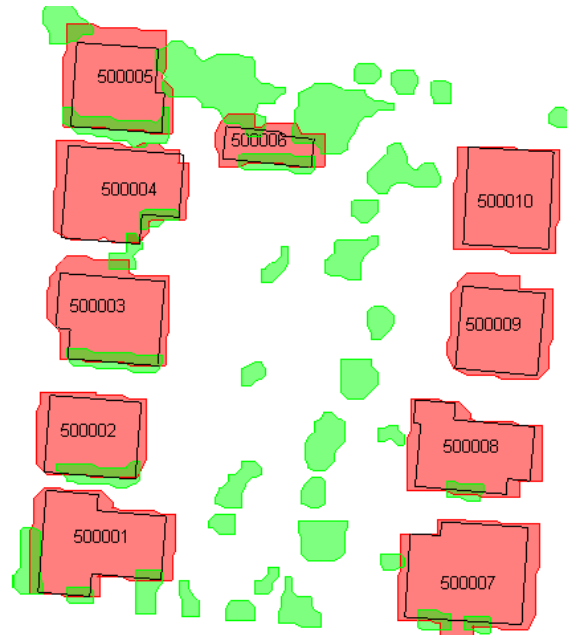


Abb. 4: Potentielle Gebäudegrenzen (rot), regularisierte Gebäudepolygone (schwarz) und hohe Vegetation (grün).

Für die Gebäudemodellierung wurden ausschließlich Punkte verwendet, die als Dachpunkte klassifiziert wurden. Die Prozessierung erfolgte gebäudeweise. Das Ergebnis der Dachflächendetektion (Segmentierung) ist in Abb. 5 farbkodiert dargestellt. Das Ergebnis der Flächenmodellbildung ist in Form eines Drahtmodells (schwarze Linien) überlagert. Die Plausibilitätskontrolle der Gebäude ergab keine Fehler. Der Vergleich der Gebäudemodelle mit

der Originalpunktwolke ist in Abb. 6 dargestellt. Für diesen Test wurden alle Punkte die lagemäßig innerhalb der Gebäudeumfahrung und oberhalb (1 Meter) des DTM liegen herangezogen. Punkte deren Normalabstand gegenüber der nächstgelegenen Ebene größer als 20 cm beträgt werden als Ausreißer dargestellt (braun).

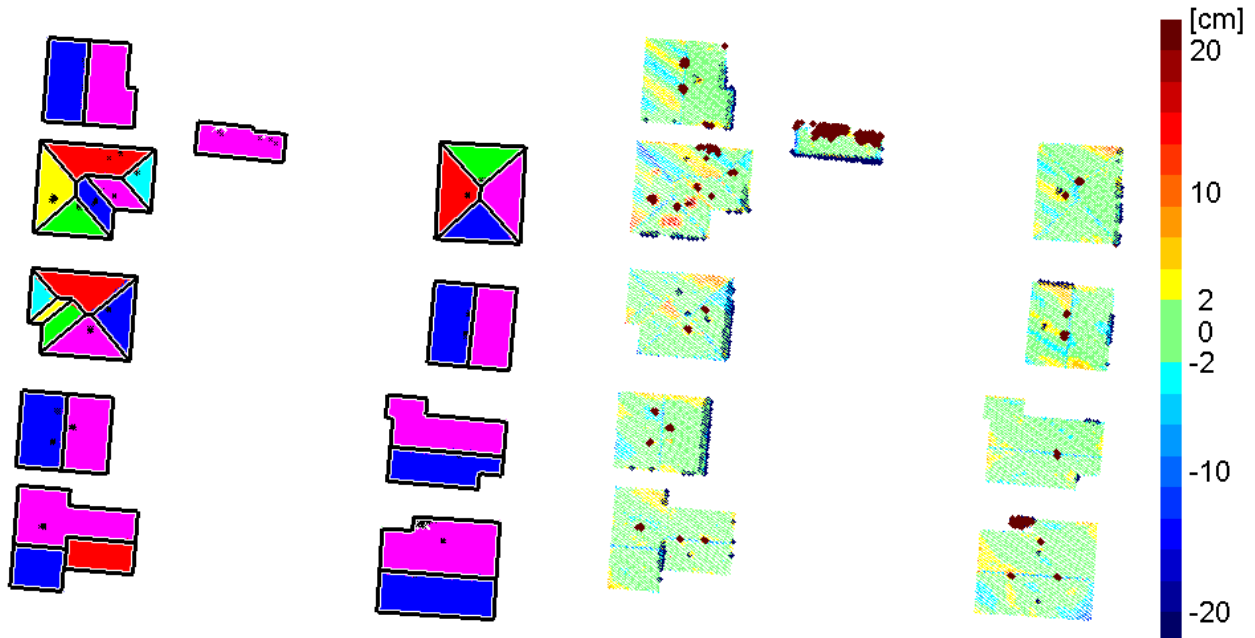


Abb. 5: Ergebnis der Dachflächendetektion als farbkodierte Punkte und Gebäudemodelle als Drahtmodell (schwarze Linien).

Abb. 6: Qualitätsanalyse: Normalabstände der Originalpunkte vom Dachflächenmodell.

5 Anwendung und Diskussion

Im vorigen Abschnitt wurde die Funktionsweise des Ansatzes an Hand eines Testdatensatzes demonstriert. Alle Gebäude konnten topologisch korrekt modelliert werden. Bei der in Abb. 6 dargestellten Qualitätsanalyse sieht man alle Abweichungen der gegebenen Punkte gegenüber den Modellflächen. Die großen Abweichungen im Bereich des alleinstehenden, rechteckigen Gebäudes im oberen Bereich sind durch darüber befindliche Bäume erklärbar. Bei einigen Häusern sind an Wandflächen erfasste Punkte ersichtlich (geradlinig entlang von Traufenkanten verlaufende Punkte mit großen Abweichungen). Grüne dargestellte Punkte liegen innerhalb von ± 5 cm. Größere Abweichungen sind entweder auf großflächige Verformungen der Dachform gegenüber einer geometrischen Ebene oder auf Restfehler der Georeferenzierung (der Flugrichtung folgende Wellenbewegung – abwechselnd gelb und cyan) zurück zu führen.

Die folgenden Abbildungen zeigen die Ergebnisse einer großflächigen Anwendung der vorgeschlagenen Methode in zwei Testgebieten in Wien, Österreich, mit unterschiedlicher Bebauung. Abb. 7 zeigt ein gerendertes Flächenmodell der Gebäudemodelle (rot: Dachflächen, grau: vertikale Wandflächen) welche mit einer Dreiecksvermaschung des DGM (grün) verschnitten wurden. Die definierenden Kanten der Dachflächen wurden automatisch drei Klassen (Traufen-, Giebel-, Schnittkanten) zugewiesen und sind farbkodiert in der Abbildung

dargestellt. In Abb. 8 ist das Modell eines dicht bebauten, innerstädtischen Bereiches dargestellt. In beiden Fällen wurde keine Gebäudedetektion durchgeführt, da die vorhandenen Grundrisspolygone aus der Mehrzweckkarte der Stadt Wien entnommen werden konnten. Die Datenerfassung erfolgte ebenfalls mit einem *Riegl LMS Q560* und auch die mittlere Punktdichte ist etwa 15 Punkte pro Quadratmeter.

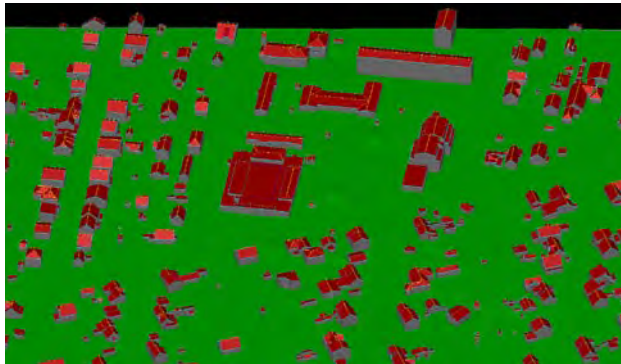


Abb. 7: Flächen- und Drahtmodell im locker bebauten Siedlungsgebiet.

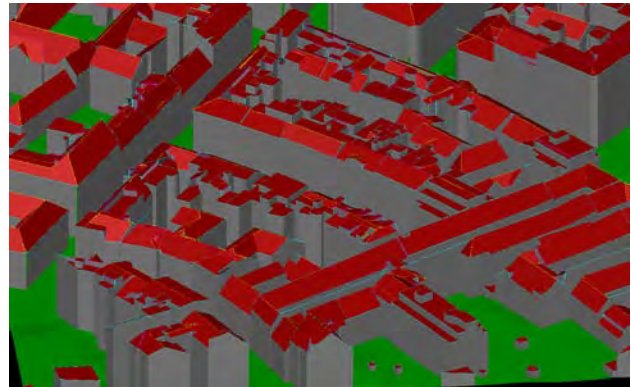


Abb. 8: Flächen- und Drahtmodell im Stadtbereich.

Tab. 1 zeigt den Grad der erzielbaren Vollständigkeit in den beiden Testgebieten. Es ist deutlich erkennbar, dass das locker bebaute Siedlungsgebiet weitaus vollständiger modelliert werden konnte. Im Zuge der Plausibilitätsüberprüfungen wurden 90% der modellierten Gebäude als korrekt ausgewiesen. Weitere 3% wiesen kleine Flächendifferenzen auf. Diese geringfügigen Abweichungen werden meist durch nicht vollständig korrekt modellierte, vertikale Sprungkanten hervorgerufen. Bei 29% der Gebäude lagen mehr als 10% der gegebenen ALS-Punkte weiter als 50 cm vom Dachmodell entfernt. Diese Abweichungen können durch hohe Vegetation hervorgerufen werden oder durch nicht modellierte Aufbauten verursacht werden. Bei der dichten, innerstädtischen Bebauung konnte knapp 70% der Gebäude vollständig modelliert werden. Auffällig ist die hohe Rate an Gebäuden mit grob abweichenden ALS-Punkten. Dies lässt sich allerdings mit den meist stark strukturierten Dachaufbauten (Terrassen, Antennen, Schornsteine, etc.) erklären.

Status	Siedlung		Innenstadt	
	Anzahl Geb.	%	Anzahl Geb.	%
Bearbeitet	797	100	688	100
Korrekt	719	90	473	69
Kleine Flächendiff. (< 0.5 m)	24	3	27	4
Große Flächendiff.	54	7	187	27
10% Abweichung von ALS-Pkt.	233	29	493	72

Tab. 1: Korrektheit automatisiert erstellter Gebäudemodelle im Siedlungs- und Innenstadtbereich.

6 Schlussfolgerungen

Der gewählte Ansatz ist hochgradig automatisiert. Das heißt, die interaktive Arbeit beschränkt sich auf die Bestimmung einiger Parameter (z.B. Distanzschwellwert, Schwellwert im Parameterraum, minimale Größe von Dachebenen). Dadurch können große Bereiche innerhalb kurzer Zeit prozessiert werden. Überdies werden Methoden zur automatischen Kontrolle auf Korrektheit und Plausibilität zur Verfügung gestellt. Diese erlauben eine umfassende Qualitätskontrolle der erstellten Modelle und weisen den Bearbeiter auf potentiell nicht korrekt modelliert Gebäude hin.

An Hand der Ergebnisse konnte demonstriert werden, dass in Siedlungsbereichen mit lockerer Bebauung eine Vollständigkeit von rund 90% erzielt werden kann. Wie ein Vergleich mit Referenzdaten gezeigt hat, handelt es sich bei den nicht vollständig korrekt modellierten Häusern meist um Gebäude die entweder nicht durch die getroffene Modellannahme (Flächenapproximation) beschrieben werden können, oder es kommt zu kleinen, topologisch nicht vollständig korrekten Diskrepanzen. Diese können im Allgemeinen im Zuge einer interaktiven Nachbearbeitung mittels CAD behoben werden.

In der dichten, innerstädtischen Bebauung, konnten 70% der Gebäude korrekt modelliert werden. Der Grund für die größere Anzahl an nicht vollständig korrekt modellierten Gebäuden ist in der meist hoch komplexen Struktur der Dachaufbauten zu sehen. Diese lässt sich im Allgemeinen nicht ohne interpretative Generalisierung mit Hilfe von ebenen Flächen approximieren. Vor dem selben Problem steht ein Operateur welcher derartige Gebäude im Rahmen einer Stereo-Bildauswertung modelliert.

Derzeit wird an der Erweiterung der Methodik hinsichtlich einer vollständigen 3D-Fähigkeit gearbeitet. Dadurch sollen Wandflächen und vertikale Dachflächen die von den ALS-Daten erfasst wurden direkt in den Modellierungsprozess integriert werden. Durch diese Verbesserung des Modellierungsansatzes, ist mit einer weiteren Verbesserung der Vollständigkeit insbesondere in innerstädtischen, dicht bebauten Gebieten zu rechnen.

7 Danksagung

Diese Arbeit wurde von der Firma *Vermessung Schmid ZT GmbH* im Rahmen des *Christian Doppler Labors "Räumliche Daten aus Laserscanning und Fernerkundung"* unterstützt. Die Daten wurden von der *Stadtvermessung Wien (Magistratsabteilung 41)* zur Verfügung gestellt.

8 Literaturverzeichnis

- ALHARTHY, A., BETHEL, J., 2002: Heuristic filtering and 3d feature extraction from Lidar data. In International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, XXXIV, 3A, Graz, Austria.
- DORNINGER, P. & PFEIFER, N., 2008: A Comprehensive Automated 3D Approach for Building Extraction, Reconstruction, and Regularization from Airborne Laser Scanning Point Clouds. *Sensors*, **2008** (8), S. 7323-7343.

- HIRSCHMÜLLER, H., 2008: Stereo processing by semi-global matching and mutual information. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, **30** (2), S. 328-341.
- HÖFLE, B., MÜCKE, W., DUTTER, M., RUTZINGER, M., DORNINGER, P., 2009: Detection of building regions using airborne LiDAR - A new combination of raster and point cloud based GIS methods. in: "Geospatial Crossroads @ GI_Form '09 - Proceedings of the Geoinformatics Forum Salzburg", S. 66-75.
- HOLLAUS M., MANDLBURGER G., PFEIFER N., MÜCKE W., 2010: Land Cover Dependent Derivation of Digital Surface Models from Airborne Laser Scanning Data. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and the Spatial Information Sciences*. Volume **39** (3). S. 6.
- JWA, Y., SOHN, G., TAO, V., CHO, W., 2008: An implicit geometric regularization of 3d building shape using airborne lidar data. In *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, XXXVI, 5, S. 69-76, Beijing, China.
- KRAUS, K., PFEIFER, N., 1998: Determination of terrain models in wooded areas with airborne laser scanner data. *Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 53, S. 193-203.
- LEE, I., SCHENK, T., 2002: Perceptual organization of 3d surface points. In *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Graz, Austria.
- MAAS, H.-G., VOSSELMAN, G., 1999 Two algorithms for extracting building models from raw laser altimetry data. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, **54** (2/3), 153–163.
- MORGAN, M., TEMPFLI, K., 2000: Automatic building extraction from airborne laser scanning data. In *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, XXXIII, B3, pages 616–623, Amsterdam, Netherlands.
- NARDINOCCHI, C., FORLANI, G., 2001: Building detection and roof extraction in laser scanning data. In *Proceedings of 3rd International Workshop on Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images*, Ascona, Switzerland.
- POTTMANN, H., WALLNER, J., 1999: Approximation algorithms for developable surfaces. *Comput. Aided. Geom. Des.*, **16** (6), 539–556.
- ROTTENSTEINER, F., TRINDER, J., CLODE, S., KUBIK, K., 2005: Automated delineation of roof planes from lidar data. In *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, XXXVI, 3/W19, Enschede, the Netherlands.
- SAMPATH, A., SHAN, J., 2007: Building boundary tracing and regularization from airborne lidar point clouds. *Photogramm. Eng. Remote Sens.*, **73** (7), S. 805-812.
- SITHOLE, G., VOSSELMAN, G., 2004: Experimental comparison of filtering algorithms for bare-earth extraction from airborne laser scanning point clouds. *Journal of Photogrammetry & Remote Sensing.*, **59** (1-2), S. 85-101.
- SHAN, J. & TOTH, C., 2008: *Topographic laser ranging and scanning: Principles and processing*. CRC Press, London, UK.
- TÓVARI, D., VÖGTLE, T., 2004: Object classification in laserscanning data. In *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, XXXVI, 8/W2, S. 45-49, Freiburg, Germany.

3D-Punktwolken als vollwertige 3D-Stadtmodelle?

STEPHAN NEBIKER, SUSANNE BLEISCH¹

Zusammenfassung: In diesem Beitrag diskutieren wir die Nutzung von 3D-Punktwolken als vollwertigen 3D-Stadtmodellierungsansatz. Kern dieses Modellierungsansatzes bilden dichte und semantisch angereicherte 3D-Punktwolken aus primär kinematischen terrestrischen Laserscans. Zuerst werden die bisherigen Ansätze zur 3D-Stadtmodellierung – namentlich die explizite 3D-Geometrie-Modellierung und die bildbasierte Modellierung – zusammengestellt und verglichen. In der Folge werden die Kernpunkte des Punktwolken-Ansatzes vorgestellt und diskutiert. Anschliessend wird aufgezeigt, welche zentrale Rolle virtuellen Globen bzw. webbasierten 3D-Geobrowsern zukommt, um diese 3D-Punktwolken und die darauf basierenden Stadtmodelle breit nutzen zu können. Anhand einer Implementierung in der eigenen Virtuellen Globus-Technologie i3D werden erste Untersuchungen zur technischen Machbarkeit und zu visuellen und kartographischen Grundsatzfragen präsentiert.

1 Einleitung

An der effizienten Generierung realitätsgetreuer 3D-Stadtmodelle wird seit über 15 Jahren geforscht. Der Fokus lag zunächst auf der automatischen 3D-Gebäudeextraktion aus Luftbildern (HAALA & HAHN, 1995), wurde dann erweitert auf luftgestütztes bzw. airborne Laserscanning (ALS) (HAALA & BRENNER, 2001) und auf die Thematik der 3D-Geoinformationssysteme zur Generierung und Verwaltung grosser 3D-Stadtmodelle (NEBIKER, 2003). Aber erst mit der Lancierung von Google Earth in 2005 und Microsoft Virtual Earth (heute Bing Maps 3D) wurden die Möglichkeiten von 3D-Stadtmodellen in einer breiteren Öffentlichkeit wahrgenommen, was neben dem wissenschaftlichen vor allem das kommerzielle Interesse an einer effizienten Generierung von 3D-Stadtmodellen rapide empor schnellen liess. Parallel zu den Aktivitäten im Bereich der 3D-Stadtmodellierung durchlief die Laserscanning-Technologie seit ihrer Lancierung zu Beginn der 1990er-Jahre eine rasante Entwicklung. So erlaubten die erzielbaren Messraten und Punktdichten um das Jahr 2000 erste erfolgreiche Untersuchungen zur 3D-Stadtmodellierung mittels ALS (VOSSELMAN & DIJKMAN, 2001). Mit der Einführung terrestrischer Laserscanner (TLS) in den späten 1990er-Jahren und vor allem von mobilen Scannern (MLS) ca. 5 Jahre später, ist heute auch eine effiziente, genaue und vor allem detaillierte terrestrische 3D-Geometrieerfassung möglich (BARBER et al., 2008).

Mit der rasch zunehmenden Verbreitung von 3D-Stadtmodellen und den neuen technischen Möglichkeiten steigen jedoch auch die Ansprüche und die Anforderungen an die 3D-Stadtmodellierung (NEBIKER et al., in press). So müssen sich 3D-Stadtmodelle vermehrt mit 3D-Modellen aus der Game- und Filmindustrie vergleichen lassen. Gleichzeitig ist die effiziente, automatisierte Ableitung von expliziten 3D-Modellen aus Laserscanning-Punktwolken heute noch ein weitgehend ungelöstes Problem. Eine der grossen Herausforderungen ist es somit,

¹ Stephan Nebiker, Susanne Bleisch: (stephan.nebiker, susanne.bleisch)@fhnw.ch, Institut Vermessung und Geoinformation, Hochschule für Architektur, Bau und Geomatik, FHNW Fachhochschule Nordwestschweiz, CH-4132 Muttenz

möglichst realitätsgetreue und in vielen Fällen auch detailreiche 3D-Stadtmodelle effizient, kostengünstig und rasch generieren und aktualisieren zu können. In diesem Beitrag werden die aktuellen 3D-Stadtmodellierungsansätze vorgestellt und deren Stärken und Schwächen diskutiert. Anschliessend stellen wir die Nutzung von 3D-Punktwolken als eigenständigen und vollwertigen 3D-Stadtmodellierungsansatz vor, der viele der Schwächen der existierenden Ansätze kompensieren kann.

2 Heutige 3D-Stadtmodellierungsansätze

In der 3D-Stadtmodellierung haben sich zwei unterschiedliche Ansätze etabliert: die explizite *geometrische 3D-Modellierung* und die *bildbasierte Modellierung*. In der Folge werden die wichtigsten Merkmale dieser Modellierungsansätze kurz vorgestellt.

2.1 Geometrische 3D-Modellierung

Bei der geometrischen 3D-Modellierung besteht das Stadtmodell aus einem expliziten geometrischen Modell, das um semantische und Darstellungs-Eigenschaften ergänzt wird (KOLBE et al., 2005). Als geometrisches Basismodell werden dabei vor allem die Randdarstellung (boundary representation bzw. B-Rep) oder Constructive Solid Geometry (CSG) und deutlich weniger häufig Zellmodelle (spatial enumeration) verwendet (Abb. 1) (PFUND, 2001). Bei der verbreiteten 3D-Modellierung mittels B-Rep oder CSG muss das 3D-Stadtmodell zunächst auf der Basis unterschiedlicher Geodaten (primär Luftbilder und ALS, neuerdings auch unter Einbezug von TLS) in einem anspruchsvollen und aufwändigen Prozess konstruiert oder generiert werden, bevor es für Visualisierungs- oder Analysezwecke genutzt werden kann. Eine der wichtigsten Stärken der geometrischen 3D-Stadtmodellierung besteht darin, dass sie auf bewährten Konzepten und Technologien aus der CAD- und GIS-Welt aufbaut und somit durch eine Vielzahl an Tools, Formaten und vermehrt auch Standards wie CityGML (KOLBE et al., 2005) unterstützt wird. Eine weitere Stärke des Ansatzes liegt auf Grund seiner Verbreitung in der grossen Flächendeckung, insbesondere bei wenig detaillierten Objekten.

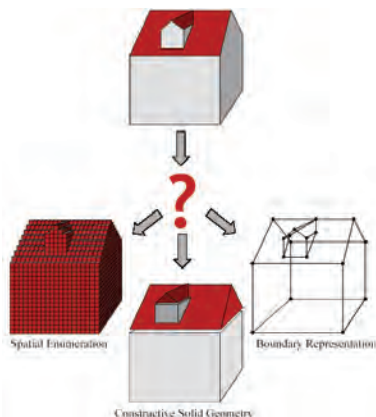


Abb. 1: Geometrische 3D-Modellierung mit geometrischen Basismodellen (PFUND, 2001)

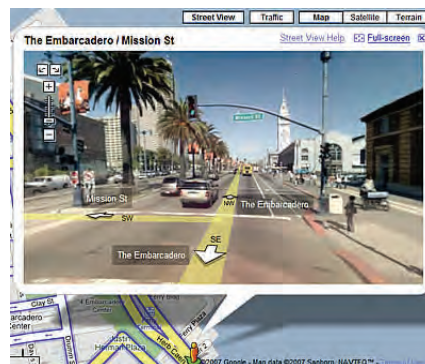


Abb. 2: Bildbasierte Modellierung – georeferenzierte Bildpanoramen (Bsp. Google Street View)

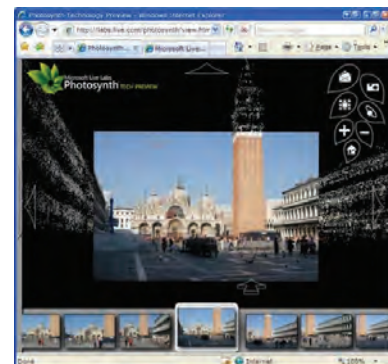


Abb. 3: Bildbasierte Modellierung – georeferenzierte Bildverbände (Bsp. Microsoft Photosynth)

2.2 Bildbasierte Modellierung

Beim bildbasierten Modellierungsansatz wird die Realwelt bzw. der urbane Raum durch georeferenzierte zweidimensionale Bilder oder Videos repräsentiert, anstelle eines expliziten 3D-Modells. Die bildbasierte Stadtmodellierung wurde 2007 mit der Lancierung von Google Street View (Abb. 2) ins öffentliche Interesse gerückt. Erste ähnliche Untersuchungen wie movie-maps (LIPPMAN, 1980), welches eine navigierbare Videofahrt durch Aspen ermöglichte, liegen jedoch bereits 30 Jahre zurück. Währenddem bildbasierte Modellierungsansätze wie Google Street View auf navigierbaren (direkt) georeferenzierten Bildpanoramen beruhen, basiert ein alternativer bildbasierter Modellierungsansatz auf (indirekt) georeferenzierten Bildverbänden. Dieser zweite Ansatz gelangte mit dem Photosynth-Webdienst (Abb. 3) von Microsoft zu einem gewissen Bekanntheitsgrad. Diese zwei Haupttypen der bildbasierten Stadtmodellierung weisen teilweise recht unterschiedliche Eigenschaften auf:

- *Georeferenzierte Bildpanoramen* – Zu den vorteilhaften Eigenschaften dieses Modellierungsansatzes gehört die Möglichkeit einer sehr effizienten fahrzeuggestützten Erfassung mit hohem Detailreichtum und einer robusten, weitgehend automatisierbaren Prozessierung, was eine rasche Erfassung ganzer Städte oder Regionen erlaubt. Zu den Nachteilen gehören die Einschränkung auf die ursprüngliche Erfassungsposition (z.B. 'lock-in' auf Fahrspur des Erfassungsfahrzeug) und die limitierte Navigierbarkeit zwischen den diskreten Panoramen.
- *Georeferenzierte Bildverbände* – Dieser Modellierungsansatz basiert auf der Erfassung und automatischen Co-Registrierung grosser Mengen an 2D-Bilddaten, die anschliessend im 3D-Raum interaktiv betrachtet werden können. Der Ansatz erlaubt den Einbezug eines potentiell fast unerschöpflichen Pools an Laien (crowd-sourcing), was theoretisch eine enorme Skalierbarkeit ermöglicht. Zu den Nachteilen des Ansatzes gehört, dass sich die Erfassung in aller Regel auf (touristisch) interessante Sehenswürdigkeiten beschränkt und dass die resultierenden Bildgeometrien potentiell instabil und ungenau sind.

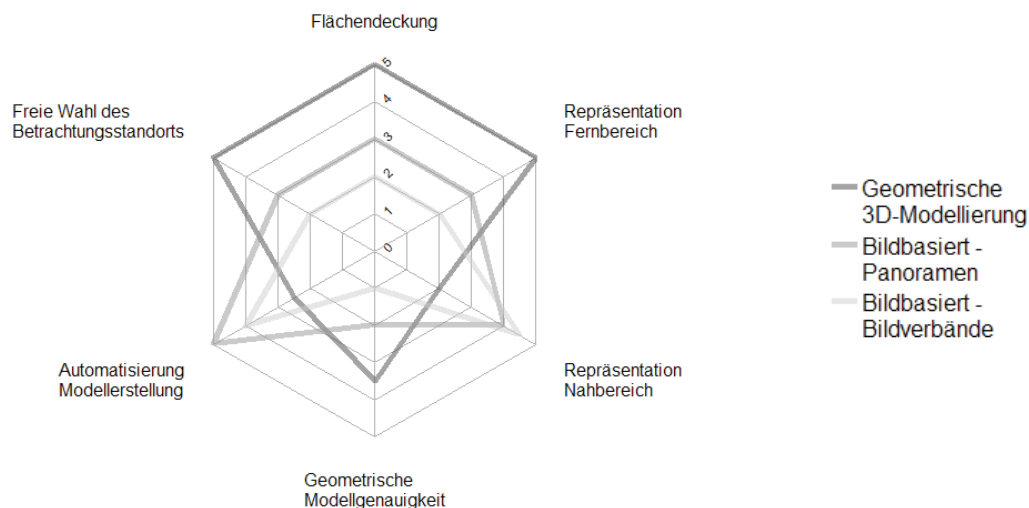


Abb. 4: Vergleich der heutigen 3D-Stadtmodellierungsansätze nach unterschiedlichen Kriterien (0 = keine, 3 = mittlere, 5 = sehr gute Unterstützung)

Wie der Vergleich in Abb. 4 zeigt, weisen die traditionellen Modellierungsansätze, insbesondere die für 3D-Geoinformationsanwendungen massgebende geometrische 3D-Modellierung, neben

vielen Stärken auch einige Defizite auf, namentlich in der wirtschaftlich realisierbaren Modellierung des Nahbereichs (z.B. für typische strassenverkehrsgebundene Anwendungen), in der routinemässig erzielbaren geometrischen Genauigkeit und vor allem in der beschränkten Automatisierbarkeit der Modellgenerierung.

3 3D-Punktwolken als Modellierungsbasis

Eine mögliche Antwort auf die aufgeführten Defizite bietet die Nutzung von 3D-Punktwolken als eigentliche 3D-Stadtmodelle – und nicht bloss als Inputdaten für den geometrischen 3D-Modellierungsprozess, wie dies bis anhin der Fall war. Das Konzept zur Nutzung informationsreicher 3D-Punktwolken (rich point clouds) als vollwertigen 3D-Stadtmodellierungsansatz macht sich zu Nutze, dass zukünftige 3D-Punktwolken eine enorm hohe Dichte aufweisen und über umfassende geometrische, radiometrische und semantische Eigenschaften verfügen werden (NEBIKER et al., in press) (Abb. 5). Beispiele solcher Eigenschaften von Punktwolken bzw. Attribute einzelner Punkte sind: Intensitätswert des reflektierten Laserpulses, RGB-Punkttextur aus ko-registrierten Bildsensoren, 'Punktnormale' aus der Aufnahmegeometrie oder Punktklassifikationen.



Abb. 5: Ausschnitt aus punktwolkenbasiertem 3D-Modell

Punktwolkenbasierte 3D-Stadtmodelle weisen eine Reihe von Vorteilen auf. So können 3D-Punktwolken mittels MLS rasch erfasst und weitgehend automatisch generiert werden, was eine kostengünstige Abdeckung und regelmässige Aktualisierung ganzer Städte und Regionen erlaubt. Da die Datenerfassung bodengestützt – aus einer für Menschen gewohnten Perspektive erfolgt –, erlauben sie eine sehr detaillierte dreidimensionale Abbildung des Nahbereichs und eignen sich ganz besonders für Drive-through- oder Walk-through-Szenarien. Ein weiterer grosser Vorteil ist, dass punktwolkenbasierte 3D-Stadtmodelle als vollautomatisch erzeugte detailreiche graphische 3D-Modelle sofort genutzt werden können, dass jedoch zusätzlich die Möglichkeit besteht, diese auf Grund ihrer reichhaltigen geometrischen und radiometrischen

Eigenschaften sukzessive zu strukturieren und semantisch anzureichern (NEBIKER et al., in press).

Zu den Nachteilen der punktwolkenbasierten 3D-Stadtmodelle gehören die enormen Datenmengen, die sich aus den dichten und informationsreichen 3D-Punktwolken ergeben, der fehlende bzw. leere Hintergrund in 3D-Punktwolken sowie die Beschränkung der Datenerfassung auf die Bereiche entlang von Strassen und Wegen. Die Probleme der Datenmengen und des Hintergrunds liesse sich durch eine Integration der punktwolkenbasierten 3D-Modelle in einen Virtuellen Globus lösen. Das Problem der ungleichen Datenverteilung kann einerseits mit routenbasierten Navigationsmodellen und andererseits durch eine Kombination expliziter geometrischer 3D-Modelle und punktwolkenbasierter Modelle entschärft werden.

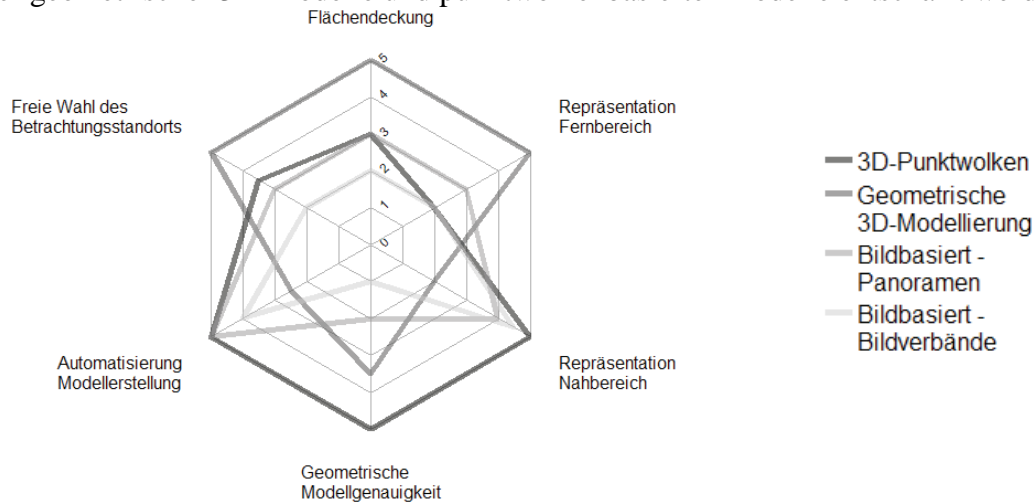


Abb. 6: 3D-Stadtmodellierungsansätze aus Abb. 4 ergänzt um punktwolkenbasierte 3D-Modellierung

4 Virtuelle Globen als Schlüssel zur Nutzung punktwolkenbasierter 3D-Stadtmodelle

4.1 Punktwolkenvisualisierung und Virtuelle Globen

Virtuelle Globen oder webbasierte 3D-Geobrowser könnten eine zentrale Rolle spielen, um riesige 3D-Punktwolken auch ausserhalb heutiger Spezialsoftwarelösungen breit nutzen zu können, und um punktwolkenbasierte 3D-Stadtmodelle zu einer vollwertigen Alternative für heutige 3D-Stadtmodelle zu machen. Die Bedeutung von virtuellen Globen geht somit weit über das Mildern der oben aufgeführten Schwachstellen des Punktwolkenansatzes hinaus.

Die Visualisierung grosser Punktdatenmengen mit Level-of-Detail-Support ist ein sehr aktives Forschungsthema in der Computergrafik mit aktuell zwei vorherrschenden Lösungsansätzen: punktbasiertes Rendering (point-based rendering PBR) und volumenbasiertes Rendering. Eine gute Übersicht über verschiedene PBR-Ansätze und -Implementierungen findet sich in Sainz & Pajarola (2004). In volumenbasierten Ansätzen werden die Originalpunktdaten zuerst in eine volumetrische Repräsentation mit Mehrfachauflösung transformiert (CHRISTEN & NEBIKER, 2010). Ein leistungsfähiger Ansatz auf der Basis eines Sparse Voxel Octrees wird in Crassin et

al. (2009) vorgestellt. Dieser Ansatz erlaubt das Streaming und die performante Visualisierung von Milliarden von Punkten. Einige Autoren, wie bspw. Böhm (2009), haben punktbasierte Visualisierungsansätze erfolgreich auf den Geoinformationsbereich, insbesondere auf die Visualisierung von TLS-Datensätzen angewandt. Wichtige Gründe für die Nutzung Virtueller Globen als Basis für punktwolkenbasierte 3D-Stadtmodelle sind: ein (je nach Implementierung) genaues globales geodätisches Bezugssystem bspw. zur Integration genauer MLS-Punktwolken, effiziente globale räumliche Datenstrukturen und Indizierungsmechanismen, eine LOD-Unterstützung für sämtliche raumbezogenen Inhalte, eine ruckfreie dynamische Visualisierung und – als zentrales Element – eine effiziente streaming-basierte Nutzung sämtlicher Inhalte via Internet durch eine grosse Anzahl an Nutzern (siehe auch Nebiker et al. (in press)).

4.2 Punktwolkensupport in i3D – Implementierung und erste Untersuchungen

Am Institut Vermessung und Geoinformation (IVGI) der FHNW wird mit i3D seit einigen Jahren eine eigene Virtuelle Globus-Technologie entwickelt, welche einerseits als Forschungs- und Entwicklungsplattform dient und andererseits in Projekten mit Industriepartnern zum Einsatz kommt. Die i3D-Technologie ermöglicht die Aufbereitung und die internetbasierte Visualisierung grosser Geodatenmengen mit lokaler bis globaler Ausdehnung. Unterstützt werden Orthobilddaten, Höhendaten, Points of Interest (POI) und 3D-Objekte. Zentrale Elemente von i3D sind ein genaues geodätisches Bezugssystem mit einem ellipsoidischen Rendering-Ansatz auf dem WGS-84-Ellipsoid unter Einbezug eines Geoidmodells und der neu implementierte, voll skalierbare Höhenmodellsupport auf TIN-Basis, welcher eine effiziente Prozessierung riesiger Höhendatensätze und eine optimale Geländerepräsentation inkl. LOD-Unterstützung ermöglicht (CHRISTEN & NEBIKER, 2010). Eine solide geodätische Basis und ein genauer TIN-basierter Höhenansatz sind Voraussetzung für die anvisierten Mixed Reality-Anwendungen in virtuellen Globen (EUGSTER et al., 2010).

Zur Untersuchung der technischen Machbarkeit sowie visueller und kartographischer Grundsatzfragen einer punktwolkenbasierten 3D-Stadtmodellierung wurde in i3D eine Unterstützung für grosse 3D-Punktwolkenmengen implementiert und anhand erster realer Datensätze getestet. Für den Punktwolkensupport in i3D wurden zwei unterschiedliche Ansätze umgesetzt. Eine erste Implementierung verwendete den punktbasierten Rendering-Ansatz. Der neu implementierte Lösungsansatz basiert auf einem Sparse Voxel Octree (CHRISTEN & NEBIKER, 2010). Dabei wird eine Punktwolke in einem Octree gespeichert, wobei jeder Octree-Knoten aus einer 8x8x8 Voxel-Gruppe besteht. Über einen Octocode (analog zum Quadkey) oder über einen „Leveled Voxel Space Index“, einem 3D-Index inklusive Level, ist ein direkter Zugriff auf eine Partition im 3D-Raum und den gewünschten Level of Detail möglich.

Für die ersten Untersuchungen standen die folgenden Testdaten zur Verfügung: eine 3D-Landschaftsmodell des FHNW Campus bestehend aus einem Höhenmodell mit Sub-Meter-Genauigkeit, Orthobilddaten mit einer GSD von ca. 50 cm und 3D-Gebäudemodelle des Campus mit photorealistischen Texturen aus Schrägluftbildern (vgl. Abb. 7). Da zum Zeitpunkt der Untersuchungen keine Punktwolken mit NIR- und RGB-Punkttexturen aus einem mobilen Laserscan zur Verfügung standen, wurde die MLS-Aufnahme mittels mehrerer TLS-Aufnahmen

entlang des Strassenraums substituiert. Diese TLS-Aufnahmen wiesen eine zu MLS vergleichbare Punktdichte von 1-3 cm im Strassenraum und 5-10 cm im Bereich der umliegenden Gebäude auf. Abb. 8 zeigt das Punktwolkenmodell für den identischen Ausschnitt wie Abb. 7 und illustriert die massiv verbesserte Repräsentation des Nahbereichs mit den unzähligen Objekten wie Vegetation, Beleuchtungskandelaber und Verkehrssignale, die den Raumeindruck massgeblich prägen.



Abb. 7: Geometrische 3D-Modellierung des FHNW-Campus mit ausgewählten texturierten 3D-Objekten integriert in virtuellen Globus i3D



Abb. 8: 3D-Punktwolken-Modell des identischen Ausschnitts mit hoher Punktdichte und mit RGB-Texturen aus ko-registrierten Bilddaten

5 Fazit und Ausblick

In diesem Beitrag haben wir einen Ansatz zur 3D-Stadtmodellierung auf der Basis dichter und informationsreicher 3D-Punktwolken vorgestellt. Es wurde gezeigt, dass traditionelle Ansätze zur 3D-Stadtmodellierung Defizite aufweisen, namentlich im Bereich der realitätsgetreuen Modellierung des Nahbereichs und in der beschränkten Automatisierbarkeit der 3D-Modellgenerierung, die durch den neuen Ansatz behoben werden können. Zu den wichtigsten Stärken der punktwolkenbasierten 3D-Stadtmodellierung gehören:

- eine genaue und detailreiche Erfassung des Nahbereichs
- eine rasche 3D-Datenerfassung mittels MLS aus einer nutzer-ähnlichen Perspektive
- eine weitgehend automatisierte Datenprozessierung und Modellgenerierung
- die Möglichkeit zur sofortigen Nutzung eines einfachen graphischen 3D-Modells
- die Möglichkeit zur bedarfsweisen, sukzessiven semantischen Anreicherung des Modells

Es wurde auch aufgezeigt, dass für eine breite Nutzung von 3D-Punktwolken – über einen engen Kreis von LiDAR-Fachleuten hinaus – geeignete streamingfähige Technologien erforderlich sind und dass Virtuelle Globen ideale Voraussetzungen mitbringen, um diese Anforderungen zu erfüllen. Mit einer ersten Implementierung im Virtuellen Globus i3D konnte nicht nur die technische Machbarkeit bewiesen werden, es konnte auch aufgezeigt werden, dass die Integration punktwolkenbasierter 3D-Stadtmodelle graphisch ansprechend ist und einen deutlichen Informationsgewinn bietet. Eine ausführlichere Betrachtung findet sich in Nebiker et al. (in press).

Die punktwolkenbasierte 3D-Stadtmodellierung wirft jedoch auch zahlreiche neue Fragen auf. Zu den vielen offenen Fragen und Herausforderungen gehören die optimale Texturierung von 3D-Punktwolken, die Filterung unerwünschter Objekte (z.B. von Fahrzeugen im Fahrbahnbereich) sowie etwa geeignete Datenstrukturen und Algorithmen zur semantischen Anreicherung punktwolkenbasierter 3D-Stadtmodelle direkt im Virtuellen Globus.

6 Literaturverzeichnis

- BARBER, D. et al., 2008: Geometric validation of a ground-based mobile laser scanning system. – *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, **63**(1): 128-141.
- BÖHM, J., 2009. Terrestrial LiDAR in Urban Data Acquisition. In: D. Fritsch (Editor), *Photogrammetric Week 2009*. Wichmann, pp. 169-178.
- CHRISTEN, M. & NEBIKER, S., 2010: Neue Entwicklungen im Bereich Virtueller Globen am Beispiel der i3D-Technologie. – Dreiländertagung der OVG, DGPF und SGPF, Wien.
- CRASSIN, C. et al., 2009: GigaVoxels: ray-guided streaming for efficient and detailed voxel rendering. – *Proceedings of the 2009 symposium on Interactive 3D graphics and games*. ACM, Boston, Massachusetts.
- EUGSTER, H. et al., 2010: Drohnenbasierte Umweltbeobachtung und Kartierung basierend auf einem Virtuellen Globus. – Dreiländertagung der OVG, DGPF und SGPF, Wien.
- HAALA, N. & BRENNER, C., 2001: City model data acquisition from laser scanning, OEEPE/ISPRS-Workshop 'From 2D to 3D - Establishment and Maintenance of National Core Geospatial Databases, Hannover.
- HAALA, N. & HAHN, M., 1995. Data fusion for the detection and reconstruction of buildings, Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images. Birkhäuser Verlag, Basel, pp. 211-220.
- KOLBE, T.H. et al., 2005. CityGML – Interoperable Access to 3D City Models. In: P.v. Oosterom, S. Zlatanova and E.M. Fendel (Editors), *Proceedings of the Int. Symposium on Geo-Information for Disaster Management on 21-23 March 2005 in Delft*. Springer Verlag.
- LIPPMAN, A., 1980: Movie-maps: An application of the optical videodisc to computer graphics. – *ACM SIGGRAPH Computer Graphics* **14**(3): 32-42.
- NEBIKER, S., 2003. DILAS - The Digital Landscape Server for the Generation and Management of Large 3D City Models. In: D. Fritsch (Editor), *Photogrammetric Week '03*. Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg, pp. 227-236.
- NEBIKER, S. et al., in press: Rich point clouds in virtual globes – A new paradigm in city modeling? – *Computers, Environment and Urban Systems*: doi:10.1016/j.compenurbsys.2010.05.002.
- PFUND, M., 2001: Topological Data Structure for a 3D GIS. – *Italy-Canada Workshop on 3D Digital imaging and modeling, applications of heritage, industry, medicine & land.*, Padova, Italy, 3.-4. April 2001.
- SAINZ, M. & PAJAROLA, R., 2004: Point-based rendering techniques. – *Computers & Graphics*, **28**(6): 869-879.
- VOSELMAN, G. & DIJKMAN, S., 2001: 3D Building Model Reconstruction from Point Clouds and Ground Plans. – *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Volume XXXIV-3/W4 Annapolis, MD, 22-24 Oct. 2001.

Bestandsaktualisierung von 3D-Stadtmodellen durch Analyse von 3D-Punktwolken

RICO RICHTER¹ & JÜRGEN DÖLLNER²

In dieser Arbeit wird ein Verfahren zur Fortführung und Aktualisierung virtueller 3D-Stadtmodelle auf Basis automatischer Auswertung von LiDAR-Daten vorgestellt. Scanner-Technologien (z. B. LiDAR) ermöglichen die regelmäßige und kosteneffiziente Erfassung von Städten und Metropolregionen durch Befliegungen oder terrestrische Aufnahmen. Die Konstruktion eines 3D-Stadtmodells ist hingegen im Allgemeinen aufwändig, so dass die Aktualisierung eines bereits bestehenden 3D-Stadtmodells aus wirtschaftlicher Sicht effizienter durchgeführt werden muss. Mit dem hier vorgestellten Verfahren ist es möglich, bestehende 3D-Stadtmodelle und erfasste LiDAR-Daten in Echtzeit zu visualisieren und Veränderungen im Datenbestand automatisiert zu ermitteln. Unterschiede zwischen der tatsächlichen Bebauung und des im 3D-Stadtmodell vorhandenen Datenbestandes werden so zuverlässig erkannt, so dass eine nachfolgende manuelle Bestandsaktualisierung durch 3D-Stadtmodellwerkzeuge fokussiert durchgeführt werden kann.

1 Einleitung

Die Erfassung von 3D-Daten durch z. B. LiDAR-Befliegungen wird zunehmend in regelmäßigen Abständen durchgeführt. Die resultierenden 3D-Punktwolken eignen sich aufgrund der hohen Abtastdichte und Genauigkeit für eine Bestandsaufnahme der aktuellen Bebauung und Struktur von Städten und Metropolregionen. In der Regel liegen bereits Fernerkundungsdaten aus vorherigen Erfassungen im Datenbestand vor, welche für die Aufbereitung und Konstruktion von geovirtuellen Umgebungen (GeoVEs) verwendet wurden (GRÖGER 2009). Da die Konstruktion eines 3D-Stadtmodells im Allgemeinen aufwändig ist und die Einbeziehung zahlreiche Datenquellen erfordert, ist eine Rekonstruktion des gesamten Modells auf Basis der neu erfassten 3D-Punktwolken im Hinblick auf Zeit und Kosten unwirtschaftlich. Es ist wirtschaftlich und verfahrenstechnisch hingegen effizienter nur solche Gebiete zu überarbeiten, in denen Veränderungen vorliegen, zumal sich Bebauung und Struktur in der Regel nur lokal begrenzt und zeitlich vereinzelt ändern. Die Aktualisierung und damit Fortführung wird mehr und mehr als eine entscheidende Grundaufgabe im nachhaltigen Management von GeoVEs und insbesondere 3D-Stadtmodellen betrachtet.

Im Kontext der LiDAR-basierten Datenerfassung stellt die Aufbereitung, Speicherung und Verarbeitung von massiven 3D-Punktwolken eine softwaretechnische und computergrafische Herausforderung dar. Eine zentrale Frage aus der Anwendungsperspektive besteht darin, ob der durch die LiDAR-Daten repräsentierte Ist-Zustand dem bereits vorliegenden Zustand des 3D-Stadtmodells entspricht bzw. wo hierbei Unterschiede vorzufinden sind. Die für den Nutzer interessanten Unterschiede entstehen im Allgemeinen durch bauliche Veränderungen. Bauwerke im 3D-Stadtmodell, welche nicht mehr in einer aktuellen 3D-Punktwolke enthalten sind, wurden in der Regel abgerissen und müssen aus dem 3D-Stadtmodell entfernt werden. Umgebaute oder neu entstandene Bauwerke, die in der 3D-Punktwolke erkannt werden, müssen zu dem 3D-Stadtmodell hinzugefügt werden.

1) Rico Richter, Hasso-Plattner-Institut, Universität Potsdam; E-Mail: rico.richter@hpi.uni-potsdam.de

2) Jürgen Döllner, Hasso-Plattner-Institut, Universität Potsdam; E-Mail: doellner@hpi.uni-potsdam.de

2 Aufbereitung von 3D-Stadtmodellen

Digitale 3D-Stadtmodelle sind weit verbreitet und werden beispielsweise zur Städteplanung, Katastrophensimulation und Datenvisualisierung eingesetzt. Das Erzeugen von detaillierten und qualitativ hochwertigen 3D-Stadtmodellen setzt eine aufwändige Aufbereitung mit verschiedenen 3D-Stadtmodellwerkzeugen voraus, welche zahlreiche Datenquellen (z. B. Luftbilder, Schrägluftbilder, Geländemodelle, 3D-Punktwolken und Bauwerksgrundrisse) benötigen. Um den manuellen Aufwand für die Konstruktion eines 3D-Stadtmodells zu verringern, werden die benötigten Daten weitgehend automatisiert erfasst, aufbereitet und verarbeitet (HU 2006). Wichtige Kriterien für die Qualität eines 3D-Stadtmodells sind die Genauigkeit, Vollständigkeit und Korrektheit der 3D-Geometrie, welche der tatsächlichen Bebauung einer durch das 3D-Stadtmodell repräsentierten Region entspricht.

Um die Bauwerksgeometrien eines 3D-Stadtmodells zu rekonstruieren, werden 3D-Punktwolken aus LiDAR-Befliegungen verwendet, welche ein exaktes Abbild der erfassten Region liefern (AMERI 2000, ZHOU 2008, LAFARGE 2010). In Kombination mit vorhandenen Bauwerksgrundrissen und durch das Erkennen von Strukturen (VOSSELMAN 2004, DORNINGER 2007) können 3D-Gebäuderekonstruktionsprogramme detaillierte Bauwerksmodelle aus 3D-Punktwolken generieren. Des Weiteren werden aus 3D-Punktwolken digitale Geländemodelle (DGM), Oberflächenmodelle (Digital Surface Modell, DSM) sowie Bauwerksstandorte abgeleitet (CHENG 2008).

Die Texturierung von Geländemodellen erfolgt durch die Verwendung von Luft- und Satellitenbildern (TANNER 1998, DÖLLNER 2000) sowie Schrägluftbildern für Fassaden von Bauwerken (FRUEH 2004).

3 Aktualisierung von 3D-Stadtmodellen

Durch LiDAR-Befliegungen werden in regelmäßigen Abständen Städte und Regionen flächendeckend digital erfasst. Neu erfasste LiDAR-Daten repräsentieren den Ist-Zustand der Bebauung und sollen möglichst effizient in den bereits vorhandenen Datenbestand sowie daraus abgeleitete GeoVEs integriert werden. Aufgrund von lokal begrenzt auftretenden baulichen Veränderungen ist in der Regel nur eine punktuelle Aktualisierung und Rekonstruktion des 3D-Stadtmodells erforderlich.

Die zentrale Fragestellung besteht darin, welche Bauwerke im 3D-Stadtmodell aufgrund baulicher Veränderungen aktualisiert werden müssen. Die baulichen Veränderungen und damit verbundenen Anpassungen im Datenbestand des 3D-Stadtmodells lassen sich in drei Kategorien einteilen.

- Entfernen von abgerissenen Bauwerken
- Anpassen von veränderten Bauwerken
- Hinzufügen von neu entstandenen Bauwerken

Die erfassten Daten zeichnen sich besonders durch ihre Massivität aus, da bei LiDAR-Befliegungen oft mehrere hundert Gigabyte Daten erzeugt werden. Die Algorithmen für das Auffinden von Veränderungen müssen deshalb im Hinblick auf die benötigte Rechenzeit effizient arbeiten, um die Analyse großer Datenmengen durchführen zu können.

3.1 Auffinden von veränderten Bauwerken

Um baulich veränderte und abgerissene Bauwerke zu finden, wird die aus den LiDAR-Daten gewonnene 3D-Punktwolke mit den im Datenbestand vorhandenen Bauwerksgrundrissen verglichen. Für jeden Grundriss werden alle Punkte, die sich auf bzw. über dem Grundriss befinden, ermittelt. Dabei können sowohl ungeordnete Punkte aus LiDAR-Daten, als auch rasterisierte Punkte aus einem abgeleiteten Oberflächenmodell (DSM) verwendet werden. Für diese Punkte wird die Höhendifferenz zum bereits vorhandenen digitalen 3D-Geländemodell (DGM) gebildet. Folglich lässt sich die aktuelle Höhe des Bauwerkes, welches durch den Grundriss in seiner Lage beschrieben ist, aus den LiDAR-Daten ableiten. Diese Höhe wird mit der Bauwerkshöhe des im Datenbestand vorhandenen Modells abgeglichen. Stimmen beide Höhen überein (Abb. 1 (a)), ist das Bauwerksmodell im Datenbestand aktuell. Stimmen sie nicht überein, sind Rückschlüsse auf bauliche Veränderungen oder einen Abriss des Bauwerkes zu ziehen. Ein geringer Höhenunterschied zwischen dem DGM und dem Ausschnitt aus der 3D-Punktwolke deuten auf ein abgerissenes Bauwerk hin (Abb. 1 (c)). Liegt die Punktmenge signifikant über dem DGM, stimmt jedoch nicht mit der Bauwerkshöhe im Datenbestand überein, lassen sich Rückschlüsse auf bauliche Veränderungen ziehen (Abb. 1 (b)). Alle Grundrisse im Datenbestand, welche nicht die gewünschte Übereinstimmung mit den neu erfassten LiDAR-Daten haben, werden so erfasst und dargestellt.

Die Visualisierung der erkannten Bauwerke erfolgt im Gesamtkontext des vorhandenen Datenbestandes und kann durch den Nutzer individuell konfiguriert werden. Abbildung 2 (a) zeigt die 3D-Punktwolke und Bauwerksgrundrisse für die zu analysierende Region. Optional können auch Luftbilder und das DGM dargestellt werden. In Abb. 2 (b) ist die reduzierte 3D-Punktwolke dargestellt, die für die Berechnung verwendet wird. Die Parameter und Grenzwerte für das Klassifizieren von veränderten Bauwerken können interaktiv angepasst werden, so dass alle Bauwerke mit unzureichender Übereinstimmung gegenüber dem Datenbestand hervorgehoben werden (Abb. 2 (c)).

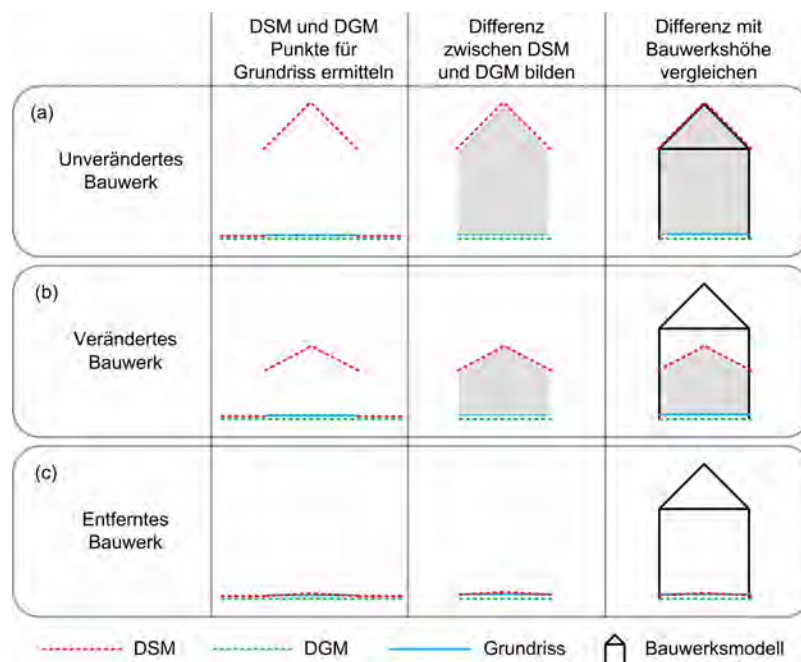


Abb 1: Schematische Darstellung zum Auffinden von baulich veränderten Bauwerken



Abb. 2: Darstellung der Ergebnisse beim Auffinden von Bauwerken mit Veränderungen.

3.2 Auffinden von neuen Bauwerken

Das Auffinden von Bauwerken, welche nicht durch das 3D-Stadmodell repräsentiert werden, ist aufwändiger als das Finden von veränderten Bauwerken. Der Grund dafür ist die Größe der zu analysierenden LiDAR-Daten, die nicht auf die Bereiche der bereits vorhandenen Bauwerksgrundrisse eingeschränkt werden können.

Beim Auffinden von neuen Bauwerken werden die gesamten LiDAR-Daten oder das daraus abgeleitete DSM mit dem Geländemodell (DGM) aus dem Datenbestand abgeglichen, indem die Höhendifferenz gebildet wird. Dieser Abgleich ermöglicht eine Verringerung der zu untersuchenden Datenmenge, da alle Punkte, die nicht oder nur geringfügig oberhalb des DGMs liegen, Bodenpunkte sind und in der Regel keine Bauwerke darstellen. Abbildung 3 (a) skizziert diesen Vorgang, bei dem nur die Punkte der 3D-Punktwolke mit einer Mindesthöhe gegenüber dem DGM verarbeitet werden.

Bauwerke heben sich durch planare Flächen von Vegetation ab. Diese Flächen werden innerhalb der 3D-Punktwolke gesucht, indem die Lage jedes Punktes zu räumlich angrenzenden Punkten analysiert wird. Alle benachbarten Punkte die in einer Ebene liegen werden gruppiert. Aus diesen Punktgruppen lassen sich Umrisspolygone ableiten, die in der Regel ab einer Mindestgröße die Dachflächen eines Bauwerkes repräsentieren. Dicht beieinander liegende Umrisspolygone mit gemeinsamen Kanten gehören in der Regel zu einem Dach, so dass ein Gesamtpolygon mit dem dazugehörigen Grundriss abgeleitet werden kann (Abb. 3(b)).

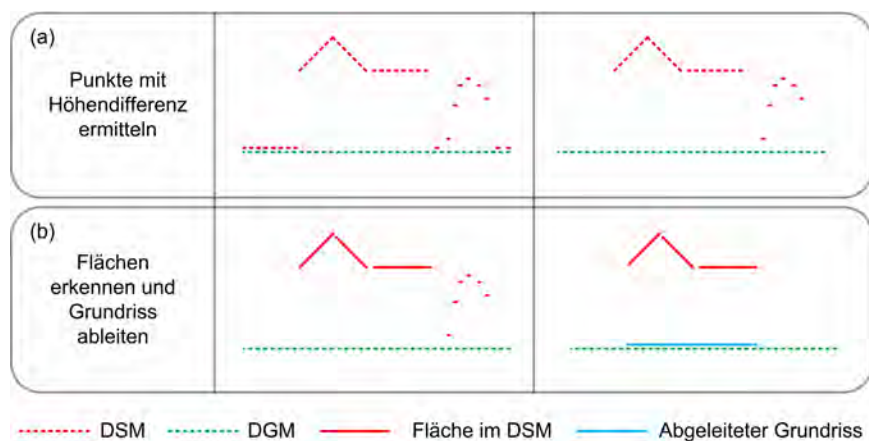


Abb. 3: Schematische Darstellung zum Auffinden von Bauwerksgrundrissen in 3D-Punktwolken

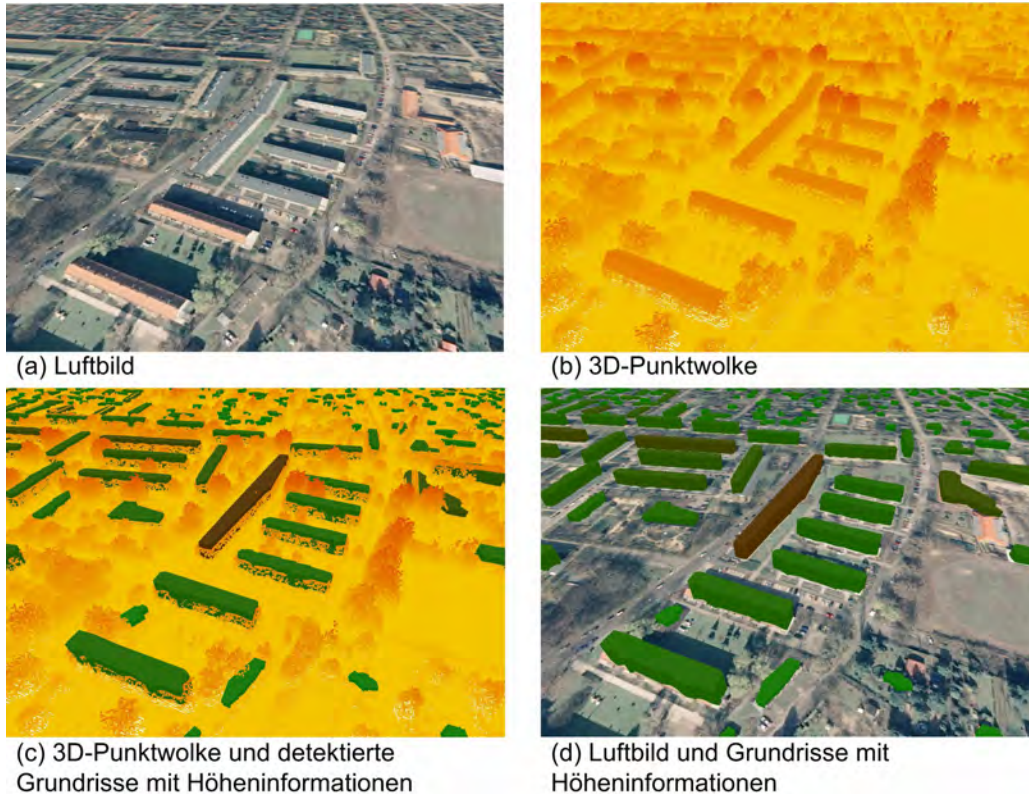


Abb. 4: Darstellung der Ergebnisse beim Auffinden von Bauwerksgrundrissen in 3D-Punktwolken

Die Ergebnisse des Verfahrens sind in Abb. 4 dargestellt. Die Analyse wurde für einen Datensatz ohne Bauwerksgrundrisse im Datenbestand durchgeführt, so dass für jedes Bauwerk Grundrisse erkannt werden. In Abb. 4 (a) ist das Luftbild dargestellt und Abb. 4 (b) zeigt die gesamte 3D-Punktwolke. Die aus den Daten abgeleiteten Bauwerksgrundrisse mit den ermittelten Bauwerkshöhen werden in Abb. 4 (c) und 4 (d) im Gesamtkontext der vorhandenen Fernerkundungsdaten dargestellt.

Die Parameter für das Zusammenfügen von Umrisspolygonen sind konfigurierbar, um den Algorithmus an die Charakteristik der Datensätze anzupassen. Dicht bebaute Gebiete, wie sie oft in Innenstädten vorzufinden sind, erfordern geringe Abstandsschwellwerte für das Zusammenführen von Umrisspolygonen, da aneinander grenzende Bauwerke nicht zusammenhängend erkannt werden sollen. In Vorstadtregionen treten Bauwerke oft vereinzelt auf und haben zahlreiche Anbauten wie Garagen und Wintergärten. Aus diesem Grund ist das Zusammenführen von Umrisspolygonen von dicht beieinander liegenden Dachflächen erforderlich.

3.3 Verarbeitung von massiven LiDAR-Daten

Die erfassten LiDAR-Datensätze zeichnen sich durch ihre hohe Dichte von bis zu 100 Punkten/m² und der damit verbundenen Größe aus. Datensätze von einer erfassten Region beinhalten oft mehrere Milliarden Punkte und benötigen deshalb mehrere hundert Gigabyte Speicherplatz. Um diese Daten visualisieren, verwalten und effizient verarbeiten zu können sind Out-of-Core-Strategien erforderlich (RICHTER 2010). In einem Vorverarbeitungsschritt werden

die 3D-Punktwolken in eine räumliche Datenstruktur überführt (BARBER 2008). Diese Datenstruktur ermöglicht eine Verarbeitung unabhängig von der Größe des vorhandenen Hauptspeichers und ist lediglich durch die verfügbare Kapazität des externen Speichers (z. B. Festplatte) beschränkt.

Für das Auffinden von veränderten Bauwerken werden für jeden Bauwerksgrundriss die benötigten Daten aus der räumlichen Datenstruktur extrahiert und analysiert. Da die Anzahl und die Größe der Grundrisse in der Regel begrenzt ist, kann dieser Vorgang sequentiell für jedes Bauwerk auch für massive LiDAR-Daten effizient im Hinblick auf die Berechnungszeit durchgeführt werden.

Das Auffinden von neuen Bauwerken dauert aufgrund der Detektion von Flächen länger, so dass eine Reduktion der zu analysierenden 3D-Punktwolke bei massiven LiDAR-Daten erforderlich ist. Die Daten werden reduziert, indem bodennahe Punkte durch den Abgleich mit dem DGM sowie Punkte über bereits vorhandenen Bauwerksgrundrissen nicht analysiert werden. Besonders hochaufgelöste LiDAR-Daten können auf eine definierbare Genauigkeit reduziert werden, indem ein DSM mit einer festen Rastergröße aus den Daten abgeleitet wird, welches anschließend für die Analyse verwendet wird.

4 Aufbereitung der Ergebnisse

Die vorgestellten Verfahren zur Analyse von LiDAR-Daten wurden in ein Framework für die Visualisierung und Analyse massiver 3D-Punktclouds integriert, welches mit dem Ziel entwickelt wurde, verschiedene Geodaten für die Aufbereitung von 3D-Stadtmodellen zu visualisieren. Die gemeinsame Darstellung der Daten (DSM, DGM, 3D-Punktwolken, Luftbilder, 3D-Modelle, Bauwerksgrundrisse) ermöglicht eine Beurteilung und Abschätzung der Qualität und Aktualität von vorhanden und neu erfassten Daten. Die verschiedenen Datenquellen können in einer 3D-Darstellung exploriert und beliebig ein- und ausgeblendet sowie in ihrer Transparenz angepasst werden. Die durch die Analysen gefundenen Unterschiede zwischen dem Datenbestand und neu erfassten Datensätzen, die sich aufgrund von baulichen Veränderungen ergeben, werden aufbereitet und in die Visualisierung integriert (Abb. 2 (c) und Abb. 4 (c)). Alle Bereiche mit Veränderungen in der Bebauung können aus dem Gesamtdatenbestand extrahiert werden, so dass eine Aktualisierung des 3D-Stadtmodells durch 3D-Stadtmodellwerkzeuge vorgenommen werden kann.

5 Fazit

In dieser Arbeit wurde ein Verfahren zum Auffinden von Veränderungen in der Bebauung von Städten und Metropolregionen vorgestellt, das eine punktuelle Aktualisierung und Fortführung des entsprechenden 3D-Stadtmodells über ein Stadtmodell-CMS ermöglicht. Dabei werden mit dem Verfahren die lokal begrenzten einzelnen Änderungsbereiche automatisiert ermittelt, die dann mit Hilfe von spezialisierten Werkzeugen für die Konstruktion und Edition von 3D-Stadtmodellen weiterbearbeitet werden. Der Schwerpunkt dieser Arbeit lag auf der Erkennung und Visualisierung von Veränderungen der LiDAR-Daten im Gesamtkontext des vorhandenen Datenbestandes. Die ermittelten Unterschiede zum Datenbestand werden lokalisiert und aufbereitet, so dass durch die punktuelle Aktualisierung des 3D-Stadtmodells insbesondere eine aufwändige Neukonstruktion auf Basis des gesamten Datenbestandes vermieden werden kann.

6 Danksagung

Dieses Forschungsprojekt wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert und ist Teil der InnoProfile Nachwuchsforschergruppe 3D-Geoinformationen (www.3dgi.de). Die verwendeten Datensätze wurden von virtualcitySYSTEMS zur Verfügung gestellt. Wir danken außerdem dem HPI-Bachelorprojektteam „Werkzeug zur 3D-Analyse virtueller Stadtmodelle“ für die Beiträge zur Implementierung.

7 Literaturverzeichnis

- AMERI, B., & FRITSCH, D., 2000: Automatic 3D building reconstruction using plane-roof structures. Proc. of ASPRS annual conference, S. 22-26.
- BARBER, D. M., HOLLAND, D. & MILLS, J.P., 2008: Change detection for topographic mapping using three-dimensional data structures. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, S. 1177-1182.
- CHENG, L., GONG, J., CHEN, X. & HAN, P., 2008: Building boundary extraction from high resolution imagery and lidar data International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, S. 693-698.
- DÖLLNER, J., BAUMANN, K. & HINRICHS, K., 2000: Texturing Techniques for Terrain Visualization. VIS '00: Proceedings of the conference on Visualization '00, S. 227-234.
- DORNINGER, P. & NOTHEGGER, C., 2007: 3D Segmentation of Unstructured Point Clouds for Building Modelling. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science, S. 191-196.
- FRÜH, C., SAMMON, R. & ZAKHOR, A., 2004: Automated Texture Mapping of 3D City Models With Oblique Aerial Imagery. 3DPVT, S. 396-403.
- GRÖGER, G. & PLÜMER, L., 2009: Updating 3D city models: how to preserve geometric-topological consistency. Proceedings of the 17th ACM SIGSPATIAL International Conference on Advances in Geographic Information Systems, S. 532-535.
- HU, J., YOU, S. & NEUMANN, U., 2006: Integrating LiDAR, Aerial Image and Ground Images for Complete Urban Building Modeling. Third International Symposium on 3D Data Processing, Visualization, and Transmission, S. 184-191.
- LAFARGE, F., DESCOMBES, X., ZERUBIA, J. & PIERROT-DESEILLIGNY, M., 2010: Structural Approach for Building Reconstruction from a Single DSM. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, S. 135-147.
- RICHTER, R. & DÖLLNER, J., 2010: Out-of-Core Real-Time Visualization of Massive 3D Point Clouds. 7th International Conference on Virtual Reality, Computer Graphics, Visualisation and Interaction in Africa, to appear.
- TANNER, C. C. , MIGDAL, C. J. & JONES, M. T., 1998: The clipmap: a virtual mipmap. SIGGRAPH 98, S. 151-158.
- VOSELMAN, G., GROTE, B.G.H., SITHOLE, G. & RABBANI, T., 2004: Recognising Structure in Laser Scanner Point Clouds. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, S. 33-38.
- ZHOU, Q. & NEUMANN, U., 2008: Fast and extensible building modeling from airborne LiDAR data. Proceedings of the 16th ACM SIGSPATIAL international conference on Advances in geographic information systems, S. 1-8.

Geomatics Education in the Spirit of Bologna

STEPHAN WINTER AND CLIFF OGLEBY¹

Zusammenfassung: Ein schleppender und halbherziger Prozess der Einführung von Bologna-Empfehlungen stellen die Universitätsausbildung im deutschsprachigen Raum auf den Prüfstand. Die University of Melbourne unterzieht sich gerade aus anderen Motiven einer fundamentalen Umstellung auf eine zweistufige fünfjährige berufsqualifizierende Ausbildung, und beruft sich teilweise auf die Bologna-Empfehlungen. Gerade aus der Perspektive einer kleinen Fachrichtung, mit auch in Australien nicht berauschenden Studierendenzahlen, sehen wir im sogenannten 'Melbourne Model' eine Chance, Geodäsieausbildung neu zu positionieren, neu Nachwuchs zu begeistern, und Graduierte auf einen Markt zu entlassen, der von schnellen technologischen Veränderungen geprägt ist und bleiben wird. Wir stellen die Geodäsieausbildung im neuen 'Melbourne Model' vor, zeigen Chancen für die Disziplin auf, reflektieren über Verwandtes und Unterschiede zu deutschsprachigen Ansätzen, und suchen nach dem Geist von Bologna.

Abstract: A slow and half-hearted process of introducing the Bologna recommendations put the university education in the German speaking countries on trial. The University of Melbourne undergoes currently, for other reasons, a similar change to a two-tier five-year professional education program, and refers partly to the Bologna recommendations. Just from the perspective of a small discipline—Geomatics is the smallest engineering discipline at the University of Melbourne—we see a chance to reposition the Geomatics education, to inspire more school leavers to choose a career in Geomatics, and to educate graduates that are better prepared for a market that is and will be shaped by increasingly faster technological changes. In this paper we will present the Geomatics education in the new Melbourne Model, outline the opportunities for the discipline, reflect about the differences to the approaches taken in German-speaking countries, and seek the spirit of Bologna.

1 Introduction

The university education in the German speaking countries is on trial. The original recommendations of the *Bologna Declaration* were calling for an introduction of a common two-tier education of three years undergraduate and two years graduate studies (typically associated with a Bachelor / Master degree), and a recognition of qualifications and periods of study to create a European Higher Education Area (EUROPEAN MINISTERS OF EDUCATION 1999). These recommendations were based on the shared academic values and principles expressed in the *Magna Charta Universitatum*, which is also linked to Bologna (RECTORS OF EUROPEAN UNIVERSITIES 1988), and were aiming to foster mobility for students, teachers and researchers, with an eye on employability, but also on enriched education.

While the Bologna recommendations required for German speaking countries a substantial revision of their five year undergraduate programs (especially the Diplom-Ingenieur) the chance for rethinking university education has largely been missed. A slow and half-hearted process of introducing the Bologna recommendations has lead to even more rigid education programs than before, in an attempt to preserve qualities rather than to revisit graduate

¹ Department of Geomatics, The University of Melbourne, Victoria 3010, Australia, winter@unimelb.edu.au, cogleby@unimelb.edu.au

attributes. Students, but also many academics, find the way the recommendations are realized overburdening the curricula. This and lack of teaching quality has caused student demonstrations all over Europe². Giving the protesters a voice, Clemens Appich writes:

“Durch die zunehmende Kommodifizierung von Wissen bei gleichzeitiger Normierung und Standardisierung der Studien scheint die Universität nunmehr selbst an ihr Ende gekommen” (APPICH 2010b), and: “Im politischen Diskurs wird Bildung dadurch zu einem bloßen Mittel zur Erreichung marktwirtschaftlicher Ziele wie Wettbewerbsfähigkeit, Wachstum und Arbeitsmarkttauglichkeit. Das Recht auf Bildung und damit die Möglichkeit eines selbst bestimmten, den eigenen Vorstellungen und Neigungen entsprechenden Studiums sollen sich dem ‘allgemeinen’ Zweck – dem Wirtschaftswachstum – unterordnen.” (APPICH 2010a).

In response to these unrests a new recollection of the value of academic teaching appears for example in Germany’s *Lehroffensive*, as Annette Schavan admits:

“Allerdings haben wir in der Tat feststellen müssen, dass sich die Wertschätzung guter Lehre nicht automatisch ergibt. Darum ist jetzt eine konzertierte Aktion nötig. Nach jahrzehntelangen Debatten über die Unterfinanzierung der Lehre ist es höchste Zeit, dafür zu sorgen, dass sie nicht länger als Stiefkind der Hochschulen gilt.” (SPIEWAK and WIARDA 2010)

While the *Lehroffensive* addresses issues of better funding and quality of teaching it falls again short to address an underlying issue: what attributes should our graduates have in the world of the 21st century?

Quality of teaching is probably less an issue for small disciplines such as Geomatics. However, Geomatics is challenged for some time—in addition to, and independently from the Bologna reform—by declining enrolment numbers. Concern about long-term viability leads to a trend towards amalgamated departments and loss of independence. Gottfried Konecny argues that this trend has to be continued to improve quality of teaching and to raise student numbers:

“There is no doubt that education will fuel the professional development of geomatics, but the frustration is that there are too many programmes; in Germany alone there are nine universities offering degrees in the field, as well as fifteen academies. Consolidation is necessary to prevent further dilution of student numbers. We would benefit from having no more than four programmes in this country; that would not only strengthen the geomatics community, but would also ensure that students are offered a superior product.” (KONECNY 2009, p. 9).

This paper disputes these arguments. We will argue that it needs a more fundamental approach, a review of graduate attributes—i.e., an outcome-based or student-centered review of education—rather than a canonical catalogue of (well-taught) subjects—an input-based, or teacher-centered approach. And we will argue that a small discipline such as Geomatics can benefit largely from such a shift with regard to student numbers.

² See, for example, <http://bolognaburns.org/> or <http://www.unsereuni.at/> for some of the students’ issues and requests.

To make this argument we will compare the European reforms with the situation at the University of Melbourne. The University of Melbourne undergoes currently a fundamental change from mostly one-tier four-year professional education programs towards Bologna-compatible professional education programs. With no precedence in Australia for three-plus-two programs the university developed the so-called *Melbourne Model* (MCPHEE 2006). We will introduce the Melbourne Model, discuss how it realizes the spirit of the Bologna recommendations by a new balance of breadth and depth in the education, and illustrate how we develop Geomatics education within the Melbourne Model. We recognize in the Melbourne Model a chance to re-position the Geomatics education, to inspire more school leavers to choose a career in Geomatics, and to educate graduates that are better prepared for a market that is and will be shaped by increasingly faster technological changes. In contrast to Konecny we see the superior product provided by university education in the form of the graduates themselves: engineers who are able to confidently and competently lead in their profession and consider life-long learning as a necessity without saying.

2 The Spirit of Bologna

The *Magna Charta Universitatum* (RECTORS OF EUROPEAN UNIVERSITIES 1988) defines the role and vision of a university in the 21st century based on the European humanist traditions, and the *Bologna Declaration* (EUROPEAN MINISTERS OF EDUCATION 1999) and the following process³ set out to realize this vision in a European Higher Education Area. The focus of this process is on facilitating choice: “The Bologna process aims to create a European Higher Education Area by 2010, in which students can choose from a wide and transparent range of high quality courses and benefit from smooth recognition procedures.”⁴

As part of the process, at the Bergen Conference the ministers formed a framework for qualifications, comprising generic descriptors based on learning outcomes and competences⁵:

“Qualifications that signify completion of the second cycle [Master level] are awarded to students who:

- have demonstrated knowledge and understanding that is founded upon and extends and/or enhances that typically associated with the first cycle, and that provides a basis or opportunity for originality in developing and/or applying ideas, often within a research context;
- can apply their knowledge and understanding, and problem solving abilities in new or unfamiliar environments within broader (or multidisciplinary) contexts related to their field of study;
- have the ability to integrate knowledge and handle complexity, and formulate judgments with incomplete or limited information, but that include reflecting on social and ethical responsibilities linked to the application of their knowledge and judgments;

³ After Bologna (1999), ministers of the Bologna countries met in Prague (2001), Berlin (2003), Bergen (2005), London (2007), Leuven (2009) and Budapest/Vienna (2010).

⁴ http://ec.europa.eu/education/higher-education/doc1290_en.htm

⁵ http://www.bologna-bergen2005.no/EN/BASIC/050520_Framework_qualifications.pdf

- can communicate their conclusions, and the knowledge and rationale underpinning these, to specialist and nonspecialist audiences clearly and unambiguously;
- have the learning skills to allow them to continue to study in a manner that may be largely self-directed or autonomous.”

Investigating the Bologna graduate attributes, it is interesting to find the vocabulary of humanistic education, but also fairly general references to professional attributes. The attributes seem to deliberately aim for a particular equilibrium between education in the humanist tradition—on the essence of things—and education from a pragmatic or professional perspective—on the value of things (Figure 1).

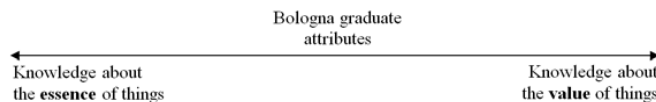


Figure 1: Bologna graduate attributes between humanist ideals and economic interests.

The two extremes are critically addressed by Liessmann, pointing to the uneasy connection between knowledge and (economic) power that comes in with the attachment of value to knowledge (LIESSMANN 2007):

„Ein Wert ist also etwas, das sich je nach Stimmungslage ändern kann, was sich nicht zuletzt im Schwanken von Preisen ausdrückt. [...] Dort, wo in der Moderne tatsächlich die Idee der Bildung als zentrale Aufgabe des Menschen proklamiert wurde, bei Wilhelm von Humboldt, war deshalb von Wert auch nicht die Rede gewesen. Für Wilhelm von Humboldt war Bildung die „letzte Aufgabe unseres Daseyns“ schlechthin, und er bestimmte diese in seiner Theorie der Bildung des Menschen mit einem denkwürdigen Satz: „Dem Begriff der Menschheit in unserer Person, sowohl während der Zeit unseres Lebens, als auch noch über dasselbe hinaus, durch die Spuren des lebendigen Wirkens, das wir zurücklassen, einen so großen Inhalt, als möglich, zu verschaffen“, eine Idee, die nichts anderes bedeutete, als eine „Verknüpfung unsres Ichs mit der Welt zu der allgemeinsten, regesten und freiesten Wechselwirkung.“

Liessmann concludes that Plato’s inquiry about the essence of things is currently, with the commoditization of education, turning into the inquiry what things are good for. In fact there is a risk that universities give in to market powers and look more after what is valued at the day than after educating about the essence of things. The Magna Charta takes a strong position here, and the Bologna recommendations aim to balance. But in the realization of the recommendations many think that the balance was lost (see above).

To get the balance back it needs a shift of thinking about curricula, and it needs giving up some valued material to create space for this shift. Curricula should account for both, the freedom of initiative of the individual student (for those who want to learn the essence), and the valued material for professional interests (for those who want to do business). Therefore graduate attributes are not only dependent on how knowledge is defined but also on the different interests of the recipients of knowledge.

Within contemporary universities these interests are perceived as competing, as reflected in Figure 1. This is also reflected in the tension between generic and professional graduate attributes, where professional graduate attributes are influenced by professional accreditation bodies (in Australia, e.g., Engineers Australia) and governmental quality assurance frameworks (in Australia, e.g., the Graduate Skills Assessment Test, which is also considered to be linked to university funding).

3 The Melbourne Model

Recently the University of Melbourne has reshaped its teaching, moving from 4-year professional degrees to 3+ 2-year professional degrees to align with the developing standards in Europe (MCPHEE 2006, p. 1). The extended time at university is matched by a new teaching paradigm of three years of broader undergraduate education, and two years of professional specialization. The undergraduate education is “characterized by both disciplinary depth and academic breadth” (DAVIS 2010, p. 12) being offered in only six broad degrees.

Thus the so-called Melbourne Model has two significant components: a component that focuses on broad knowledge and a component focusing on specialized, in-depth knowledge. The component conveying broad knowledge is the first and the longer component (and it still contains a disciplinary major). The component conveying specialized knowledge is the second and shorter one. The first one coincides with the notions on the left end of Figure 1; the second component coincides with the right end of Figure 1. To make this model viable the previously unrelated interests have to be reconciled to order to benefit both. This leads to assuming a nested structure rather than as irreconcilable opposites (Figure 2).

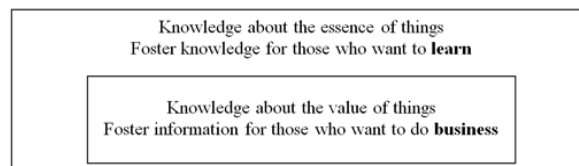


Figure 2: The poles may not be opposites, but nested.

By structuring the offered content in a nested way the University of Melbourne means offering synergies between the two interests, rather than competition. This structure presupposes that the learning for improving wisdom encompasses the learning for doing business, as students progress from a first degree into a professional Master degree. Only then the two contentious driving interests can both be utilized. Thus (professional) graduates from the University of Melbourne have more options: those learning for the essence of things may use the professional accreditation of the university as a means of social advancement, and those learning for doing business get choices for new orientation. Thus the Melbourne Model offers both social and intellectual flexibility.

The structure of the new generation three-year undergraduate degrees can be illustrated, for example, by the Bachelor of Environments (Figure 3). Notable are:

- The greater flexibility for students with regard of timing their vocational choices: they commit to a particular major incrementally over year 2 and year 3;

- the space for breadth throughout the three years: 25% of all subjects are reserved for subjects outside their degree program;
- the flexibility by a number of elective subjects within their degree program (contributing to the flexibility in switching between majors).

First year			
Benvs first-year subject	Benvs first-year subject	Benvs first-year subject	Breadth
Benvs first-year subject	Benvs first-year subject	Benvs first-year subject	Breadth
Second year			
Major subject	Major subject	Benvs elective subject	Breadth
Major subject	Major subject	Benvs elective subject	Breadth
Third year			
Major subject	Major subject	Benvs elective subject	Breadth
Major subject	Major subject	Major subject	Breadth

Figure 3: The skeleton of a new generation three-year undergraduate degree (Bachelor of Environments).

In the Vice Chancellor's words (DAVIS 2010, p. 12):

“A balance between traditional disciplinary depth and academic breadth enables students to access knowledge in a variety of ways whilst building strength in a specific field. Breadth studies allow students to learn research and reason in disciplines quite different from their specialty. This broadens their insights and enables them to explain and compare more easily the particular methodologies and paradigms of their chosen disciplines.”

The university has two distinct approaches to the 25% breadth component: one is the provision of university-wide units to be offered to all students; the other is the allocation of units within discipline streams as being available to all students. The university breadth units are focussed on being *interdisciplinary*, incorporating elements from a variety of streams to give students the ‘big picture’ (MCCALMAN *et al.* 2008). Their general theme is about ‘ways of knowing’ and cover topics like *An Ecological History of Humanity*, *Climate Change*, *Critical Thinking With Data*, *Food For A Healthy Planet* (UNIVERSITY OF MELBURNE 2009).

An example for a breadth subject from within discipline streams is the first year unit offered by Geomatics, *Mapping Environments*, which is available as breadth across campus as well as being an elective within the Bachelor of Environments degree. The approach taken in the design of this unit has been to both skill students in all aspects of spatial data, as well as to promote Geomatics as a viable major for those who get into contact with Geomatics themes for the first time or those who are undecided. To date around 10% of students enrolled in the unit have taken it as breadth, but the enrolment of students has doubled in the two years the unit has been offered.

A study of first year experiences (JAMES *et al.* 2010) finds evidence for an improvement of the transition from school to university. While now 88% of first year students say they are clear about their reasons to come to university—a sharp rise over the past 15 years—at the same time only 66% know the type of occupation they want. This means the flexibility of the Melbourne Model must suit them, and the breadth of the Melbourne Model must provide a stronger sense of purpose than the previous model of professional education.

Students prepared with such an undergraduate experience may choose to enter employment, depending on their aspirations, but most will move into graduate education. The graduate education completes their professional qualification, realizing the nesting of essential knowledge and practical skills:

“Graduate education cannot be viewed as a linear extension of undergraduate programs. Melbourne Model graduate programs differ significantly from undergraduate study in their depth and level of specialisation. Graduate programs are designed to directly prepare students either for specific professions or research studies.” (DAVIS 2010, p. 12)

The university is currently formulating their new graduate attributes based on outcomes (WINTER *et al.* 2009), separating between generic attributes (BARRIE 2007) and professional attributes as set by professional accreditation bodies. Based on the discussion so far, they will be aligned with the Bologna framework qualifications listed above, e.g., “have demonstrated knowledge and understanding that is founded upon and extends and/or enhances that typically associated with the first cycle, and that provides a basis or opportunity for originality in developing and/or applying ideas, often within a research context”. Expectations of professional bodies, as for example expressed by Allen (2006) for Engineers Australia, but also by EUR-ACE, are going conform with the broader, more flexible education, and outcome-based attributes.

A broader, more flexible education implies a culture and preparedness of graduates on one hand, and higher education institutions on the other hand, to provide for life-long learning. As expressed in the Bologna framework: “have the learning skills to allow them to continue to study in a manner that may be largely self-directed or autonomous.” (see above). Considering the Australian Engineering education in comparison to the Bologna process, Walther et al. write:

“In addition to achieving ‘in-depth technical competence’ the necessity to induce an understanding of ‘the social, economic and environmental consequences of professional activity’ is acknowledged as a centrepiece of engineering education. Engineers produced by future higher education programs are ‘attuned to the real concerns of communities’ such as the need for sustainable development and in order to interact with a wide variety of stakeholders they ‘must be better communicators’.” (WALTHER *et al.* 2005)

4 Geomatics in the Melbourne Model

The (small) discipline of Geomatics has some opportunities in such a framework:

- The first year is a common year, where students explore options and do not commit themselves to a particular major. This year can be used for promoting Geomatics to a larger cohort of students that are already enrolled at university and are already vaguely interested. This is a significant move forward from a situation where Geomatics has to be promoted to schools, or where school leavers have to have a clear idea about what Geomatics is. Our own generalist first-year subject, Mapping Environments, attracts currently 250+ students.

- The Geomatics major is offered in two new generation undergraduate programs, the Bachelor of Environments and the Bachelor of Science. The major consists of the same subjects; the differences are in the electives: students in Bachelor of Science would be exposed to more science subjects, while students in the Bachelor of Environments would be exposed to more subjects on environments topics.
- Adding to flexibility, the model also allows lateral entry into the Master program. Students without a major in Geomatics but any other first qualification can take the subjects of the major in one year, considering their first qualification as breadth, before entering the two-year Master programs.

The undergraduate program in Geomatics is shown in Figure 4.

First year			
Natural Environments	Governing Environments	B.Envs first-year subject	Calculus
Mapping Environments	B.Envs first-year subject	Reshaping Environments	Linear Algebra
Second year			
Surveying and Mapping	Applications of GIS	B.Envs elective	Breadth
Engineering Computation	Data Analysis	B.Envs elective	Breadth
Third year			
Imaging the Environment	Programming Geom Apps	B.Envs elective	Breadth
Comp Methods in Geom	Env Politics and Managem	Integrated Spatial Systems	Breadth

Figure 4: The Geomatics major in the Bachelor of Environments foundation degree.

Geomatics offers two Master degree programs within the framework of the Melbourne Model (meaning that they are coursework based and follow the 3+2 structure). The *Master of Engineering (Geomatics)* is a fully accredited degree with accreditation from the Surveyors Registration Board (Victoria), Engineers Australia and the Royal Institute of Chartered Surveyors. The second program, the *Master of Spatial Information Science*, has a more information technology focus and does not require a Geomatics major in an undergraduate program. It is accredited by the Royal Institute of Chartered Surveyors.

5 Discussion

The introduction of the Bologna-style Melbourne Model has been the most significant change at the University of Melbourne since the university was founded in 1856. It is not only a move from a 4-year professional education to 3+2 years professional education, but also an abandonment of classical consecutive, strictly disciplinary degrees as currently present at German speaking universities (WINTER *et al.* 2001), favouring a broader and more flexible model. We have argued that this is not only one way of realizing the spirit of Bologna—a way that addresses some of the issues of protesting students in Europe—but also a way where small disciplines find opportunities to promote themselves.

This year is the third year of the new generation programs, so 2011 will be the first year that the professional Masters degrees will be offered. And this means it is too soon to tell whether this change will be beneficial to the Geomatics program, although we have highlighted some unprecedented opportunities.

6 References

- ALLEN, M., 2006: Engineering Education into the Future: Changing the Culture, Higher Education Summit: Tomorrow's Universities - The Need for Change in Australia. Business / Higher Education Round Table, Melbourne, Australia.
- APPICH, C., 2010a: Bologna den Prozess machen! Kulturrisse - Zeitschrift für radikaldemokratische Kulturpolitik, 2010 (1): 4-6.
- APPICH, C., 2010b: Lasst es brennen! Kulturrisse - Zeitschrift für radikaldemokratische Kulturpolitik, 2010 (1): 7.
- BARRIE, S. C., 2007: A conceptual framework for the teaching and learning of generic graduate attributes. *Studies in Higher Education*, 32 (4): 439-458.
- DAVIS, G., 2010: Growing Esteem 2010, The University of Melbourne, Melbourne, Australia.
- EUROPEAN MINISTERS OF EDUCATION, 1999: The Bologna Declaration, Joint declaration of the European Ministers of Education, 19 June 1999.
- JAMES, R.; KRAUSE, K.-L.; JENNINGS, C., 2010: The First Year Experience in Australian Universities: Findings from 1994 to 2009, Centre for the Study of Higher Education, The University of Melbourne, and Griffith Institute for Higher Education, Griffith University.
- KONECNY, G., 2009: A Brilliant Career. *GIM International*, 23 (8): 6-9.
- LIESSMANN, K., 2007: Der Wert der Bildung und die Bildung von Werten, elib.at: eLibrary Projekt, Linz, Austria.
- MCCALMAN, J.; MUIR, L.; SOETERBOEK, C., 2008: Adventures with Breadth: A Story of Interdisciplinary Innovation, Centre for the Study of Higher Education, The University of Melbourne.
- MCPHEE, P., 2006: The Melbourne Model: Report of the Curriculum Commission, The University of Melbourne.
- RECTORS OF EUROPEAN UNIVERSITIES, 1988: The Magna Charta of Universities, Bologna, Italy.
- SPIEWAK, M.; WIARDA, J.-M., 2010: Mehr Ehre für die Lehre: Interview mit Bundesbildungsministerin Annette Schavan, *Die Zeit*.
- UNIVERSITY OF MELBOURNE, 2009. *Learn More About Breadth*.
<https://breadth.unimelb.edu.au/breadth/info/index.html>. Accessed 2 June 2010.
- WALTHER, J.; MANN, L.; RADCLIFFE, D., 2005: Global engineering education: Australia and the Bologna process. In: Radcliffe, D.; Humphries, J. (Eds.), 4th ASEE/AaeE Global Colloquium of Engineering Education Australasian Association for Engineering Education, Sydney, Australia, pp. 1-10.
- WINTER, S.; DENEHY, L.; JOUBERT, L., 2009: Graduate Attributes and the Melbourne Model, The University of Melbourne, Melbourne, Australia.
- WINTER, S.; FRANK, A. U.; BARTELME, N.; HAUSLEITNER, W.; Car, A., 2001: Situation und Trends der Geodäsie-Ausbildung in Österreich. In: Seyfert, E. (Ed.), *Photogrammetrie - Fernerkundung - Geoinformation: Geodaten schaffen Verbindungen*. Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung. Deutsche Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung, Konstanz, pp. 95-100.

Umsetzung des „Kerncurriculums Geoinformatik“ in der GI - Ausbildung

MATTHIAS MÖLLER¹

Zusammenfassung: Das Kerncurriculum Geoinformatik wurde von der Gesellschaft für Geoinformatik entwickelt und stellt die Kompetenzbereiche der Geoinformatik (GI) zusammenfassend in einem Werk dar. Die beteiligten Autoren kommen hauptsächlich aus den Geobereichen (Geodäsie, Geographie), der Informatik und der Kartographie, so dass beim Kerncurriculum von einem interdisziplinären Werk gesprochen werden kann in dem integrativ die Kompetenzen der Akteure berücksichtigt und gewürdigt sind.

Auf Basis des Kerncurriculums sollen nun erstmals einheitliche Inhalte für die Ausbildung in GI in den unterschiedlichen Ausbildungsstufen für die beteiligten Ausbildungseinrichtungen festgelegt werden. Dies reicht vom Schulunterricht in Erdkunde über den Lehrberuf bis zur Lehre an Hochschulen. Der Prozess der Umsetzung des Kerncurriculums und der Integration in die Ausbildung ist langwierig, stellt aber sicher, dass zukünftige Generationen von Geoinformatikern über ein standardisiertes Profil verfügen, das sie für den Berufsmarkt optimal qualifiziert.

1 Extended Abstract

Geoinformatik (GI) und Kartographie als die Geodaten verarbeitenden, analysierenden und visualisierenden Wissenschaften sind in der Ausbildung auf verschiedenen Hierarchiestufen (Schule, Lehre, Studium) inhaltlich vertreten. Zudem sind einige Ausbildungsrichtlinien gerade in einer Phase der Neustrukturierung, bzw. Überarbeitung. Hier ist insbesondere die Ausbildung im Lehrberuf zum Geomatiker/Geotechniker gemeint, die die klassische Lehre zum Kartographen ab August 2010 ablösen wird. In der universitären Lehrausbildung ist die Geoinformatik als Methode ein fester Bestandteil aller Studiengänge, die sich mit raumbezogenen Fragestellungen befassen. Hierzu zählen neben den Geowissenschaften wie Geodäsie, Geographie und Geologie auch Hydrologie, Biologie/Ökologie und integrative Studiengänge wie die Systemwissenschaften. Letztlich bleibt als große Gruppe in der universitären Lehre die Ausbildung zum Lehramt für verschiedene Schulformen. Mit der Umsetzung der Bologna Beschlüsse und der Einrichtung von Bachelor- und darauf aufbauenden Master-Studiengängen an deutschen Universitäten stellt sich nun die Frage, wie ein Studium, ggf. mit der Vertiefung in der Geoinformatik, ausgestaltet sein kann? Wo liegen die Unterschiede nach Fachrichtung und Hochschulart (Fachhochschule und Universität) in der Ausbildung und wie gestaltet sich das Berufsfeld der zukünftigen Absolventen?

Das Kerncurriculum der Geoinformatik (KC) eine solide, (Geo-) Fächer übergreifende Basis und Anleitung für eine koordinierte Ausbildung in der Geoinformatik. Das KC ist unter der Leitung der Gesellschaft für Geoinformatik (GFGI) von einem Kreis interdisziplinärer Geowissenschaftler und Informatiker ausgearbeitet und von Schiewe und Koppers (2009) zusammengestellt worden. Ziel des KC ist es, einheitliche Rahmenrichtlinien und Kompetenzprofile für eine fächerübergreifende Lehre der GI auf allen Ausbildungsebenen zu definieren.

In die Konzeption des Lehrberufs zum Geomatiker als Spezialisierung des Medientechnikers sind große Teile des KC bereits eingeflossen und werden praktisch umgesetzt. Die universitäre Lehre unterteilt sich in Bachelor- und Masterstudiengänge; im Bachelor wird die allgemeine Methodenkompetenz in Form von Basismodulen gelehrt, die Geoinformatik steht hier neben Kartographie, Ingenieurmathematik und Geo-Statistik. Als eigenständiger Master Studiengang wird die GI Ausbildung an mehreren Hochschulen in Deutschland auch mit internationaler Ausrichtung angeboten, jeweils mit unterschiedlichen Gewichtungen auf diese Teildisziplinen: Mathematik, Informatik, Geowissenschaften, Geodäsie, sonstiges. In der LA Ausbildung ist bislang keine konkrete Umsetzung des KC erfolgt, wäre aber hier ganz besonders wünschenswert; denn nur durch die zukünftigen LehrerInnen kann der Nachwuchs für das Thema interessiert und für ein Studium gewonnen werden.

Der Vortrag gibt einen Überblick über den aktuellen Stand der Umsetzung der KC Inhalte in bestehende Lehrkonzepte, zeigt Defizite auf und gibt Lösungsvorschläge für eine bessere Integration des KC in die Lehre auf den unterschiedlichen Ausbildungsebenen.

2 Literatur- und Quellenverzeichnis

SCHIEWE, J. & KOPPERS, L., 2009: Kerncurriculum Geoinformatik Vs. 1.3.
http://www.gfgi.de/GfGI_Kerncurriculum-Geoinformatik.pdf (04.06.2010).

Der internationale Masterstudiengang »M.Sc. Geodesy and Geoinformation Science« an der Technischen Universität Berlin

Erfahrungen nach Durchlauf der ersten Kohorte

BERND STARY, ALEXANDRA LORENZ, GERHARD KÖNIG & THOMAS H. KOLBE¹

Zusammenfassung: Mit dem Wintersemester 2006/07 wurde die Lehre des neuen internationalen Masterstudiengangs »M.Sc. Geodesy and Geoinformation Science« am Institut für Geodäsie und Geoinformationstechnik aufgenommen. Die Unterrichtssprache ist Englisch. Die Einbindung des Studiengangs in die Forschungsregion Berlin-Brandenburg ist insbesondere gekennzeichnet durch eine enge Zusammenarbeit mit dem Helmholtz-Zentrum Potsdam, Deutsches GeoForschungsZentrum (GFZ) und dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) in Berlin-Adlershof, die in dem Studiengang mit jeweils einer S-Professur eingebunden sind. Zudem etabliert sich gerade im Großraum Berlin die geowissenschaftliche Koordinierungsplattform Geo.X. Durch diese enge Verbindung mit den Großforschungseinrichtungen, die sich auch im Fächerangebot des Masterprogramms widerspiegelt, besitzt der Studiengang ein Alleinstellungsmerkmal von internationaler Bedeutung. Im Erfahrungsbericht wird ein Überblick über Organisation, Struktur und Lehrformen des Studiengangs gegeben. Er beleuchtet kritisch die durch die Umstellung auf das B.Sc./M.Sc. System entstandenen Probleme sowohl für die Studierenden, als auch für die Lehrenden. Er informiert über die Komplexität des Auswahlverfahrens und berichtet über auftretende organisatorische Herausforderungen insbesondere bei der Handhabung von Bewerbungen aus dem Ausland. Die Befragung der Absolventinnen und Absolventen des ersten Jahrgangs zeigen, dass diese in attraktive Berufsfelder gelangen konnten, um dort Ihr Spezialwissen erfolgreich einzubringen. Bereits jetzt kann die Attraktivität des Studiengangs an der großen Zahl von Bewerberinnen und Bewerber gemessen werden und daran, dass die Zielgruppenstärke von 30 Studierenden pro Jahrgang erstmals im Jahr 2009 erreicht wurde.

1 Einführung

Die Technische Universität Berlin hat im Juni 2004 beschlossen, dass der bisherige Diplomstudiengang »Vermessungswesen« zum Wintersemester 2004/05 eingestellt und durch einen Masterstudiengang für das Forschungs- und Lehrgebiet Geoinformationssysteme (GIS) ersetzt werden soll. Um auch auf internationaler Ebene konkurrenzfähig zu sein, wurde vom Institut für Geodäsie und Geoinformationstechnik der internationale englischsprachige Masterstudiengang »M.Sc. Geodesy and Geoinformation Science« konzipiert. Die ersten Studierenden wurden zum Wintersemester 2006/2007 immatrikuliert und schlossen ihr Studium größtenteils im Jahr 2009 nach einer ca. fünfsemestrigen Studiendauer ab.

¹ Bernd Stary, Alexandra Lorenz, Gerhard König, Thomas H. Kolbe:
Technische Universität Berlin, Straße des 17. Juni 135, 10623 Berlin, bernd.stary@tu-berlin.de

2 Strukturwandel in der Geodäsie und Geoinformation

Die aktuellen technologischen Entwicklungen auf den Gebieten der geodätischen Sensorik und Satellitenmesstechnik haben zu einer starken Veränderung im Berufsbild des Geodäten geführt. Spezielle Satellitenmissionen zum Monitoring des Gesamtsystems »Erde-Mensch« erfordern die Fähigkeit zu interdisziplinärer Forschungstätigkeit in international besetzten Teams.

Forschungsfelder, die das aktuelle Berufsbild des Geodäten prägen sind die Planetengeodäsie, die sich auch durch Ihre Erfassung und Visualisierung der Oberflächen von Mars und Mond bereits großer Beliebtheit erfreut, sowie die Schaffung einheitlicher räumlicher Bezugssysteme. Hierbei wird in den nächsten Jahren neben der Nutzung des amerikanischen GPS (Global Positioning System) insbesondere die Weiterentwicklung und Nutzung des europäischen Satellitennavigationssystems GALILEO im Vordergrund stehen. Diese aktuellen und zukünftigen Forschungs- und Anwendungsgebiete spiegeln sich im neuen Masterstudiengang wider.



Abbildung 1: Unterschiedliche Maßstäbe geodätischer Fachdisziplinen

Einen weiteren dramatischen Wandel im Berufsbild des Geodäten hat die Entwicklung der modernen Informations- und Kommunikationsgesellschaft mit ihrem stetig steigenden Bedarf an Geodaten, also Informationen über Objekte und Sachverhalte sowie deren Raumbezug, mit sich gebracht. Waren Geodaten noch vor wenigen Jahren »gehütete Schätze« in den Archiven der Vermessungsverwaltungen, so sind sie heutzutage durch den Einsatz Geographischer Informationssysteme (GIS) einer breiten Nutzerschicht zugänglich. Geodaten bilden eine wesentliche Grundlage des planerischen Handelns. Ihre Verfügbarkeit ist maßgebliche Voraussetzung für Standort- und Investitionsentscheidungen. Damit sind Geodaten ein Wirtschaftsgut ersten Ranges. Diese aktuellen und zukünftigen Forschungs- und

Anwendungsgebiete finden im Masterstudiengang an der TU Berlin Berücksichtigung und nehmen im Curriculum einen breiten Raum ein.

3 Der Masterstudiengang »M.Sc. Geodesy and Geoinformation Science«

3.1 Grundsätzliches

Der Masterstudiengang »*M.Sc. Geodesy and Geoinformation Science*« zeichnet sich durch eine enge Verzahnung von Geodäsie und Geoinformationstechnik aus und wird von folgenden am Institut angesiedelten zukunftsorientierten Professuren getragen

- Methodik der Geodäsie und Geoinformationstechnik
- Geodäsie und Ausgleichsrechnung
- Satellitengeodäsie und Erdsystemforschung – (S-Professur mit dem GFZ)
- Planetengeodäsie – (S-Professur mit dem DLR)
- Präzisionsnavigation und –ortung – (Gastprofessur)

Durch die Mitwirkung institutsübergreifender Fachgebiete am Masterstudiengang wird der Forderung nach einer starken Vernetzung der Studienangebote Rechnung getragen. Im Wesentlichen sind dies die Fachgebiete Computer Vision & Remote Sensing und Angewandte Geophysik. Die entstehenden Synergieeffekte bilden auch die Grundlage für neue interdisziplinäre Forschungsaktivitäten.

Die Unterrichtssprache ist Englisch.

3.2 Zielgruppe

Das Studienangebot richtet sich an nationale und internationale Bewerberinnen und Bewerber, die einen ersten berufsqualifizierenden Hochschulabschluss (Diplom, B.Sc.) erworben haben und durch den Masterabschluss die Befähigung erlangen wollen, zukünftig als Entscheidungsträger und leitende Wissenschaftler auf den Gebieten

- Geoinformationstechnik
- Geodätische Raumverfahren und Navigation
- Ingenieurgeodäsie und Ausgleichsrechnung
- Computer Vision und Fernerkundung

tätig werden wollen.

3.3 Akkreditierung

Der Masterstudiengang wurde 2008 für den deutschsprachigen Raum sowohl mit dem Siegel des Akkreditierungsrates des ASIIN e.V., als auch mit dem europäischen Gütesiegel EUR-ACE® für qualitativ hochwertige Studiengänge aus dem ingenieurwissenschaftlichen Bereich akkreditiert. Zunächst konnte die Akkreditierungskommission den Studiengang nicht als konsekutiv einordnen, da – aufgrund des an der Technischen Universität fehlenden Bachelor Angebotes im Bereich

Geodäsie und Geoinformationstechnik und durch die mögliche Aufnahme von Studierenden auch aus nicht geodätischen Fachrichtungen – der konsekutive Charakter nicht deutlich genug erkennbar schien. Aufgrund des Auswahlverfahrens, der inhaltlichen Nähe geodätischer Forschung zu Nachbardisziplinen wie Geographie, Kartographie aber auch dem Bauingenieurwesen und der Informatik wurde nach abschließender Diskussion der Studiengang als konsekutiv und mehr forschungsorientiert eingestuft.

3.4 Zulassungsverfahren

Voraussetzung für den Zugang zum Masterstudiengang »*M.Sc. Geodesy and Geoinformation Science*« ist ein Diplom- oder Bachelorabschluss in einer einschlägigen Grundlagen- oder Anwendungsdisziplin mit Bezug zur Geodäsie und/oder Geoinformationstechnik (z. B. Geodäsie, Kartographie, Bauingenieurwesen, Informatik, etc.) oder eine gleichwertige Qualifikation. Die Aufnahme des Studiums kann direkt nach dem ersten berufsqualifizierenden Hochschulabschluss erfolgen und bedarf nicht des Ablegens zusätzlicher Prüfungen.

Der Studiengang ist für 30 Studierende ausgelegt, aber nicht zulassungsbeschränkt. Die Bewerberinnen und Bewerber unterliegen somit nicht dem universitären Auswahlverfahren. Deshalb endet die Bewerbungsfrist am 1. Oktober eines jeden Jahres, also kurz vor Beginn des Programms Mitte Oktober. Dies ermöglicht auch Nachzüglern bei entsprechender Qualifikation noch kurzfristig die Bewerbung und bei entsprechendem Platzangebot die Immatrikulation. Dies ist insbesondere für Studierende von Vorteil, die entweder ihre Studierendenvisa recht kurzfristig erhalten, oder aber erst im Sommer ihren ersten berufsqualifizierenden Abschluss erwerben.

Die Prüfung der Bewerbungsunterlagen im Hinblick auf Vollständigkeit und Rechtmäßigkeit erfolgt zunächst durch den eingetragenen Verein UNI-ASSIST e. V., der im November 2003 als Verein von deutschen Hochschulen, der Hochschulrektorenkonferenz (HRK) und vom Deutschen Akademischen Austauschdienst (DAAD) gegründet wurde, um die Zulassung ausländischer Studieninteressierter einfacher, effizienter, kostengünstiger und vor allem kundenfreundlicher zu gestalten. Zunächst beschränkte sich die Tätigkeit von UNI-ASSIST e. V. auf Serviceleistungen für internationale Studienbewerberinnen und -bewerber, damit sich diese in einem einheitlichen Verfahren an beliebig vielen UNI-ASSIST Hochschulen in Deutschland bewerben können. Nach einer erst kürzlich vollzogenen Umstrukturierung der universitären Zulassungsstelle werden nunmehr auch die Unterlagen deutscher Bewerberinnen und Bewerber bei UNI-ASSIST e. V. geprüft. Dieses sinnvoll erscheinende Instrument der einheitlichen formalen Prüfung von Bewerbungsunterlagen ist aber nach unserer Erfahrung aufgrund der teilweise nicht zeitnahen Bearbeitung der Unterlagen oftmals besonders für ausländische Studierende ein Hinderungsgrund rechtzeitig das Studium aufnehmen zu können. Außerdem werden hier auch Bewerberinnen und Bewerber dem Bearbeitungsprozess unterworfen, die ganz offensichtlich die fachliche Qualifikation zur Aufnahme des Studiengangs nicht mitbringen. Es ist davon auszugehen, dass hier unnötigerweise bei 25% der Bewerberinnen und Bewerber Prüfungen erfolgen. Um dies zu umgehen werden wir dafür, dass Antragsteller parallel zur Bewerbung bei UNI-ASSIST e. V. ihre Unterlagen direkt an uns senden, um durch fachliche Vorabprüfung frühzeitig erkennen zu können, ob eine Kandidatin oder ein Kandidat überhaupt geeignet ist, das Studium aufzunehmen.

Nach erfolgreicher Prüfung durch UNI-ASSIST e. V. werden die Bewerbungsunterlagen offiziell an den Prüfungsausschuss des Studiengangs übermittelt. Dieser entscheidet über die Zulassung auf der Grundlage einer fachlichen Prüfung der eingereichten Bewerbungsunterlagen. Im Falle erkennbarer aber nicht gravierender fachlicher Defizite kann die Zulassung unter Auflagen ausgesprochen werden. Dies war jedoch aufgrund der Vorkenntnisse der meisten Bewerberinnen und Bewerber, der oben erwähnten Vorabprüfung und wegen der hohen Zahl an Bewerbungen bisher nicht nötig.

3.5 Studierende der ersten Jahrgänge

Besonders positiv fällt die Zusammensetzung der ersten Jahrgänge auf. 50% der Studierenden sind deutscher, 25% europäischer und 25% außereuropäischer Herkunft. Dies ist Ausdruck einer gesunden Internationalität in einer sich globalisierenden, auch wissenschaftlichen Welt. Der Anteil weiblicher Studierender liegt bei ca. 25%. Dieser Anteil ist im Gegensatz zum ehemaligen Studiengang des Diplom Vermessungswesens (50% weibliche Studierende) deutlich niedriger, kann aber dadurch erklärt werden, dass der Frauenanteil besonders bei den internationalen Studierenden eher gering ist. Die Bandbreite der vertretenen Fachabschlüsse der Neuimmatrikulierten ist groß, beschränkt sich aber auf Themen mit dem gewünschten Bezug zur Geodäsie und/oder der Geoinformationstechnik. So sind ca. 25% der eingeschriebenen Studierenden Geodäten und 25% (Geo-)informatiker. Die restlichen Studierenden kommen aus den Fächern Kartographie, Geographie, Mathematik, Geologie, Bauingenieurwesen, Umweltwissenschaft und Physik. Diese Heterogenität stellt eine besondere Herausforderung an das Lehrpersonal dar, da trotz intensiver Prüfungen oftmals nicht erkennbare Defizite der Bewerber insbesondere in Mathematik und der vertieften Kenntnis von Programmiersprachen deutlich werden. Im ersten Semester werden deshalb, oft unter hohem Betreuungsaufwand, unterschiedliche Eingangsqualifikationen der Studierenden auf ein einheitliches Niveau gebracht, um das Fundament für die wissenschaftliche Ausbildung im Vertiefungsbereich zu legen. Hier aber zeigen sich dann die Vorteile des heterogenen Erfahrungshintergrunds, die die Interdisziplinarität der Ausbildung wesentlich stärkt. Insbesondere daran, wie sich die Studierenden durch Ihre unterschiedliche Vorbildung fachlich gegenseitig unterstützen können, erkennt man den Wert einer derartigen Gruppenzusammensetzung. Diese bildet das Ziel einer Ausbildung zum interdisziplinären Arbeiten und Forschen in internationalen Teams direkt ab. Für die Lehrenden ist es einerseits eine Herausforderung mit den unterschiedlichen methodischen Ansätzen und damit verbundenen Fragestellungen der Fachdisziplinen konfrontiert zu werden, stellt aber andererseits besonders in Seminaren und Projekten eine deutliche Bereicherung dar.

3.6 Struktur des Masterstudiengangs Geodesy and Geoinformation Science

Die Struktur des viersemestrigen Masterstudiengangs »*M.Sc. Geodesy and Geoinformation Science*«, der insgesamt 120 Credit Points (CP) nach dem ECTS (European Credit Transfer System) umfasst, ist in Abbildung 2 dargestellt.

Im ersten Semester wählen die Studierenden aus einem vorgegebenen Fächerkatalog Module aus, in denen ihnen die inhaltliche Basis für die weitergehenden Studien vermittelt, und ein Einblick in die möglichen Vertiefungsrichtungen gegeben wird.

1. FACHSEMESTER	2. FACHSEMESTER	3. FACHSEMESTER	4. FACHSEMESTER
GRUNDLAGEN	VERTIEFUNGSRICHTUNG		MASTERARBEIT
Geoinformation Technology Statistics and Estimation Theory Geodetic Reference Systems Geodatabase Systems Computer Vision Geophysics	A – Geoinformation Technology B – Space Geodesy and Navigation C – Engineering Surveying and Estimation Theory D – Computer Vision and Remote Sensing		
	Seminar: Research within your specialization field	Project: Practical work within your field of specialisation	
	OPTIONALE WAHL		
30 Leistungspunkte	60 Leistungspunkte		30 Leistungspunkte

Abbildung 2: Die Struktur des Masterstudiengangs „M.Sc. Geodesy and Geoinformation Science“

Im zweiten und dritten Semester wählen die Studierenden von den vier Vertiefungsrichtungen *Geoinformation Technology*, *Space Geodesy and Navigation*, *Engineering Surveying and Estimation Theory* und *Computer Vision and Remote Sensing* eine aus. In dieser müssen sie den Großteil der CP sammeln. Aus den drei nicht gewählten Richtungen muss ebenfalls eine Mindestanzahl von Studienleistungen erbracht werden, so dass eine Abwahl von Vertiefungsrichtungen nicht möglich ist. Durch das breite Angebot von insgesamt vier Vertiefungsbereichen in Verbindung mit einem hohen Anteil von Wahlpflichtfächern und freien Wahlfächern wird den Studierenden eine individuelle Profilbildung ermöglicht. Darüber hinaus können sie einen Teil der CP aus anderen an der Universität angebotenen Fachdisziplinen erwerben. Dies ermöglicht den Studierenden ganz im Sinne eines *studium generale*, sich auch mit universitären Angeboten außerhalb der gewählten Fachdisziplin zu beschäftigen.

Den Abschluss des Studiums bildet das vierte Semester, in dem die Studierenden innerhalb von sechs Monaten eine Masterarbeit anfertigen.

3.7 Modularisierung

Gemäß den Beschlüssen der Bologna-Erklärung sind Lehrinhalte zu bündeln und in Modulen mit jeweils nur einer Prüfungsleistung zusammen zu fassen, um die Gesamtzahl von Prüfungsleistungen zu reduzieren. Wegen der Vielfalt des hier angebotenen Studienprogramms sind Module entstanden, die auf einander aufbauend komplexe thematische Inhalte vermitteln. In der Regel bestehen diese aus

zwei Lehrveranstaltungen, von denen die erste (zweites Studiensemester) eher grundlegenden Charakter hat, also besonders für Studierende geeignet sind, die sich in dem jeweiligen Fachthema nicht spezialisieren. Die zweite Lehrveranstaltung solcher Module (drittes Studiensemester) vermittelt eher fachspezifisch tiefergehende Inhalte, und richtet sich an Studierende, die in diesem Fachthema vertiefen wollen. Aus der nachvollziehbaren Sicht einiger Studierender stellt diese Modularisierung einen Nachteil dar, da man trotz Wahlfreiheit immer nur komplette Module wählen kann. Eine rein inhaltliche Entscheidung für separate Kurse, also einzelne Modulbestandteile, ist grundsätzlich nicht möglich. Zur Umgehung dieses Problem arbeiten wir mit separat zu beantragenden sogenannten „Teilleistungsanerkennungen“. Diese stellen zwar einen zusätzlichen bürokratischen Aufwand dar und widersprechen dem Modularisierungsgedanken, sind aber aus rein fachlichen Sicht unverzichtbar. Der Studiengang „*M.Sc. Geodesy and Geoinformation Science*“ bietet darüber hinaus seit einem Jahr auch „künstliche“ Module an, die die häufigsten angefragten und sinnvollen Kurskombinationen (zwei Kurse aus jeweils unterschiedlichen Modulen) zusammenfassen. Diese Module stoßen bei den Studierenden der Nichtspezialisierungsfächer auf sehr große Akzeptanz.

3.8 Studienverlauf, Studienabschluss

Die ersten Studierenden haben Ihr Studium im Jahr 2009 nach einer Studiendauer von rund fünf Semestern abgeschlossen. Nach der Graduierung von ca. zwölf Studierenden scheint dies die durchschnittliche Studienverlaufsdauer zu sein. Hierbei muss berücksichtigt werden, dass die meisten Studierenden neben ihrem Studium aus wirtschaftlichen Gründen einer Erwerbstätigkeit nachgehen müssen und deshalb in ihrem vierten Semester einige bisher nicht erbrachte Studienleistungen nachholen. Damit verschiebt sich die Anfertigung der Masterarbeit um ein Semester. Der Idealfall einer Tätigkeit als studentische Hilfskraft in unserem Institut kann nur für eine begrenzte Anzahl von Studierenden ermöglicht werden. Auch die Entscheidung für ein Auslandssemester „kostet“ in der Regel den schnellen Studienabschluss, da die Studierenden im Ausland neben dem Belegen anrechenbarer Kurse auch anderweitige Erfahrungen sammeln wollen und müssen.

Die Absolventinnen und Absolventen finden nach erfolgreichem Studienabschluss in der Regel direkt im Anschluss in die Berufstätigkeit. So haben unsere Studierenden z.B. Forschungsstellen am Helmholtz-Zentrum Potsdam, GeoForschungszentrum (GFZ) im Bereich globaler Navigationssysteme GNSS, oder am Museum für Naturkunde Berlin in der Impaktforschung gefunden. Einige Absolventen werden in naher Zukunft an unserem Institut ihre Doktorarbeiten anfertigen und hier promovieren. Eine weitere Absolventin hat eine Anstellung in einem beratenden Unternehmen der Geoinformationsbranche gefunden. Von der ersten Kohorte der Studierenden ist keiner arbeitslos gemeldet.

4 Einbindung des Studiengangs in die Forschungsregion Berlin Brandenburg / Zusammenarbeit mit Gesellschaften und Verbänden

Die Einbindung des Studiengangs in die Forschungsregion Berlin-Brandenburg ist – neben der Attraktivität Berlins als modernem Schmelztiegel verschiedenster Kulturen – von entscheidender Bedeutung für seine Attraktivität. Mehr als 50% der Studierenden der ersten 4 Jahre gaben an, sich wegen der Forschungslandschaft für den Standort Berlin entschieden zu haben. Hier sind die

Kooperationen des Instituts für Geodäsie und Geoinformationstechnik mit dem GeoForschungsZentrum Potsdam, dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt in Berlin-Adlershof, den Verwaltungsbehörden und großen Versorgungsunternehmen zu nennen. Insbesondere die Großforschungseinrichtungen sind für den Studiengang ein Alleinstellungsmerkmal von internationaler Bedeutung.

Anfang 2010 haben sich die Geowissenschaften in der Region um Berlin in der Koordinierungsplattform Geo.X (www.geo-x.net) zusammengeschlossen und bieten vielfältige Ansatzmöglichkeiten zum Brückenschlag zu anderen Fachdisziplinen. Institutionsübergreifend arbeitet man hier an Lösungsstrategien für das Management des Systems Erde–Mensch. Das Institut für Geodäsie und Geoinformationstechnik ist integraler Bestandteil dieser gemeinsamen Plattform von Freier Universität Berlin, Humboldt-Universität zu Berlin, Museum für Naturkunde Berlin, Technischer Universität Berlin, Universität Potsdam und Deutschem GeoForschungsZentrum. Durch diesen Zusammenschluss realisieren die Geowissenschaften in Potsdam und Berlin eine stärkere, gemeinsame Handlungsfähigkeit in Bezug auf Forschung, Lehre, Nutzung der wissenschaftlichen Infrastruktur sowie Transfer der Wissenschaft in die Öffentlichkeit. Hiervon profitieren die Studierenden unmittelbar. Einerseits sind sie durch die Nähe zu den anderen geowissenschaftlichen Einrichtungen der Region immer auch über aktuelle Forschungsinhalte informiert. Andererseits ergeben sich aus dieser Kooperation verstärkt wissenschaftliche Fragestellungen, die von den Studierenden im Rahmen von Projekt- und Masterarbeiten bearbeitet werden können

Die Lehr- und Forschungstätigkeit im Masterstudiengang »*M.Sc. Geodesy and Geoinformation Science*« wird aber auch durch die Zusammenarbeit mit wissenschaftlichen Gesellschaften und Fachverbänden ergänzt. Hervorzuheben ist ein gemeinsam mit dem Deutschen Verein für Vermessungswesen (DVW e.V., Landesverein Berlin-Brandenburg), der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation (DGPF) und der Deutschen Gesellschaft für Kartographie (DGfK) veranstaltetes wöchentliches geodätisches Kolloquium, bei dem sowohl Wissenschaftler, als auch Vertreter der Wirtschaft und des freien Berufs zu aktuellen Entwicklungen im Kontext von Geodäsie und Geoinformationstechnik Stellung beziehen.

Darüber hinaus besteht eine enge Zusammenarbeit mit diversen ausländischen Universitäten wie der Istanbul Technical University in der Türkei, der University of Melbourne in Australien, den asiatischen Hochschulen Tongji-Universität Shanghai aus China oder der südkoreanischen Pusan National University. Die Kooperationen erstrecken sich hierbei auf eine Zusammenarbeit in Projekten, die gemeinsame Veranstaltung von Workshops und Tagungen sowie den Austausch von Studierenden und Mitarbeitern. Studierende des ersten Jahrgangs haben, ganz im Sinne des Bolognaprozesses, ein Auslandssemester (Calgary, Canada, bzw. Melbourne, Australien) in Ihren Studienverlauf eingebaut.

5 Zusammenfassung

Mit dem englischsprachigen Masterstudiengang »*M.Sc. Geodesy and Geoinformation Science*« stellt sich die Technische Universität in angemessener Weise den aktuellen und zukünftigen Fragestellungen in Geodäsie und Geoinformationstechnik. Durch die Konzeption eines englischsprachigen Studienangebots stellt sich dieser Wissenschaftszweig bewusst dem internationalen Wettbewerb der Universitäten und schafft dazu ein attraktives Studienangebot, das die internationale Wettbewerbsfähigkeit der Studierenden aus dem Inland stärkt und zudem ein attraktives Studienangebot für Studierende aus dem Ausland darstellt. Dies drückt sich auch in der Tatsache aus, dass der Studiengang im Vergleich mit fachlich ähnlich ausgerichteten Masterstudiengängen im deutschsprachigen Raum über die größte Anzahl von Studierenden verfügt. Noch ist aufgrund der noch geringen Anzahl von Absolventinnen und Absolventen eine abschließende Beurteilung der Vermittelbarkeit der Studierenden in den Arbeitsmarkt nicht möglich, aber die bisherigen Absolventinnen und Absolventen finden offensichtlich direkt im Anschluss an das Studium zum »*M.Sc. Geodesy and Geoinformation Science*« interessante Berufs- und Tätigkeitsfelder.

VERÄNDERUNGSDETEKTION IN KRISENREGIONEN

SASCHA KLONUS¹, DANIEL TOMOWSKI¹, MANFRED EHLERS¹, ULRICH MICHEL², PETER REINARTZ³

Zusammenfassung: Die Veränderungsdetektion ist ein Verfahren zum Erfassen von Veränderungen an Objekten oder Phänomenen zwischen unterschiedlichen Zeitpunkten. Die Ursachen für Veränderungen können natürlicher, aber auch anthropogener Art sein. Die Zeit, die zwischen einem Zustand (T1) zu einem anderen veränderten Zustand (T2) vergeht, kann mehrere Jahre betragen (z.B. klimatische oder geologische Veränderungen), saisonal begrenzt (z.B. Veränderungen der Landnutzung) oder kurzfristig sein (z.B. Veränderung durch Naturkatastrophen). Insbesondere bei den Veränderungen, die durch Katastrophen verursacht werden, kommt es zu starken infrastrukturellen und damit auch humanitären Schäden. Zur Schadensbegrenzung sowie zur Planung und Koordination von Hilfsmaßnahmen ist eine schnelle Erfassung und Visualisierung von Veränderungen in Krisengebieten eine entscheidende Voraussetzung. Durch die Etablierung neuer Satelliten mit hohen zeitlichen und räumlichen Auflösungsvermögen können solche kurzfristigen Veränderungen erfasst werden. Durch die Beurteilung von Schäden an Gebäuden, Straßen und Brücken lassen sich die am stärksten betroffenen Gebieten bestimmen. Daher wurden unterschiedliche Algorithmen konstruiert, die diese Schäden automatisch detektieren und Änderungen in den spektralen Werten nur sekundär berücksichtigen, da sich diese durch unterschiedliche Beleuchtungsverhältnisse, Fruchtfolgen etc. verändern. In der Vergangenheit wurde eine Vielzahl von Methoden zur Analyse von Veränderungen entwickelt und getestet. Dieser Artikel beschreibt Ansätze, um Veränderungen durch Filterung im Frequenzraum zu detektieren. Vier unterschiedliche Verfahren, die auf einer isotropen Bandpassfilterung im Frequenzraum basieren, wurden untersucht. In einem ersten Schritt wurden die Bandpassfilter identifiziert, welche die benötigten Informationen für die Veränderungsanalyse beinhalten. Auf die bitemporalen Bilder T1 und T2 werden diese Bandpassfilter dann angewandt. Beim ersten Verfahren werden diese gefilterten Bilder im Frequenzraum subtrahiert und dann in den Ortsraum transformiert. Beim zweiten Verfahren findet eine Korrelation im Frequenzraum mit nachfolgender Transformation in den Ortsraum statt. Für das dritte und vierte Verfahren werden die gefilterten Bilder zunächst in den Ortsraum transformiert. Beim dritten Verfahren werden dann über eine Korrelation die Veränderungen abgeleitet. Das vierte Verfahren verwendet einen Kantenfilter um diese Informationen zu extrahieren. Anschließend werden die Ergebnisse aller Verfahren noch mittels Schwellwerten binärisiert und durch morphologische Verfahren verbessert. Als letztes Verfahren wird eine segmentbasierte Veränderungsanalyse vorgestellt. Dabei werden vor der Veränderungsanalyse beide Datensätze segmentiert und die Korrelationen zwischen den Segmenten bestimmt. Die Methoden werden anhand von Daten aus der Krisenregion Darfour exemplarisch verdeutlicht. Das Ergebnis zeigt, dass die besten Resultate mit der Kantendetektion und der Segmentkorrelation erreicht werden.

1) Institut für Geoinformatik und Fernerkundung, Universität Osnabrück, Barbarastraße 22b, 49076 Osnabrück; E-Mail: sklonus, dtomowski, mehlens@igf.uni-osnabrueck.de

2) Pädagogische Hochschule Heidelberg, Czernyring 22/11-12, 69120 Heidelberg, E-Mail: michel@ph-heidelberg.de

3) Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Institut für Methodik der Fernerkundung, Münchner Straße 20, 82234 Oberpfaffenhofen-Wessling; E-Mail: peter.reinartz@dlr.de

1 Einleitung

Am 12. Januar 2010 fand ein Erdbeben in Haiti statt. Erste Hilfsmaßnahmen beinhalteten die Bereitstellung von Fernerkundungsdaten, die zur Generierung von Karten und Entwicklung von Applikationen führten, die im Krisenfall von Nutzen sind. Die Daten die von Digital Globe und dem LAIS (Laboratory for Imaging Algorithms and Systems) des RIT (Rochester Institute of Technology) bereitgestellt wurden, sind insbesondere für die Veränderungsanalyse vom Nutzen. Für Hilfskräfte ist es notwendig zu erfahren, welche Straßen noch zu benutzen sind, und an welchen Stellen die größten Schäden an der Infrastruktur eingetreten sind. Diese Informationen zu liefern ist die Aufgabe der Veränderungsanalyse. Eine Übersicht über bestehende Verfahren zeigen MAS (1999) oder LU (2003). Generell kann gesagt werden, dass kein Verfahren dem anderen überlegen ist. Es existiert vielmehr für unterschiedliche Anwendungen eine große Anzahl an Verfahren. Die unterschiedlichen Methoden besitzen dabei nach NIEMEYER & NUSSBAUM (2006) einen unterschiedlichen Grad an Flexibilität, Robustheit, Praktikabilität und Signifikanz. Die Verfahren können nach MAS (1999) in drei Kategorien eingeordnet werden: Verfahren zur Bildverbesserung, multitemporale Analysen und Post-Klassifikationsvergleiche. Andere Entwicklungen kombinieren diese Verfahren und zeigen komplett neue Ansätze (LU 2003).

Die hohe Anzahl publizierter wissenschaftlicher Ergebnisse von kombinierten und neuen Verfahren zur Veränderungsanalyse ist vielfältig und zeigt deren Bedeutung als Forschungsgegenstand. An dieser Stelle sollen nur einige genannt werden: PRAKASH & GUPTA (1998) kombinieren das Image-Differencing mit Vegetationsindizes; LU ET AL. (2005) verbinden Image-Differencing mit einer PCA. Bei den neuartigen Verfahren zur Veränderungsanalyse verwenden DAI & KHORRAM (1999) neuronale Netzwerke; FOODY (2001) sowie NEMMOUR & CHIBANI (2006) nutzen Fuzzy basierte Verfahren zur Veränderungsanalyse. Andere Ansätze verwenden objektbasierte Veränderungsansätze (siehe z.B. IM ET AL. 2008, LOHMANN ET AL. 2008).

2 Untersuchungsgebiet Shangil (Darfour)

Das Untersuchungsgebiet liegt im westlichen Teil des Sudan. Das Dorf Shangil Tobay liegt im Norden Darfours und ist eines von 17 Dörfern in dieser Region, das seit 2004 mehrmals attackiert und zerstört wurde. Die verwendeten multispektralen Daten wurden vom Satelliten Quickbird 2 mit einer Bodenpixelgröße von 2,40 m aufgenommen. Diese Bilder wurden von Digital Globe für die von Amnesty International verwaltete Webseite www.eyesondarfur.org bereitgestellt. Abb. 1 zeigt einen Ausschnitt aus der Quickbird 2 Szene. Links ist die Szene vom 10.03.2003 zu sehen, die das Dorf zu diesem Zeitpunkt darstellt, rechts die Szene wurde am 18.12.2006 aufgenommen und zeigt das Dorf nach einer Attacke. Einige Gebäude wurden komplett zerstört, von anderen Gebäuden stehen offensichtlich noch die Grundmauern, die allerdings - wahrscheinlich durch Brand - dunkler und damit kontrastreicher geprägt sind.

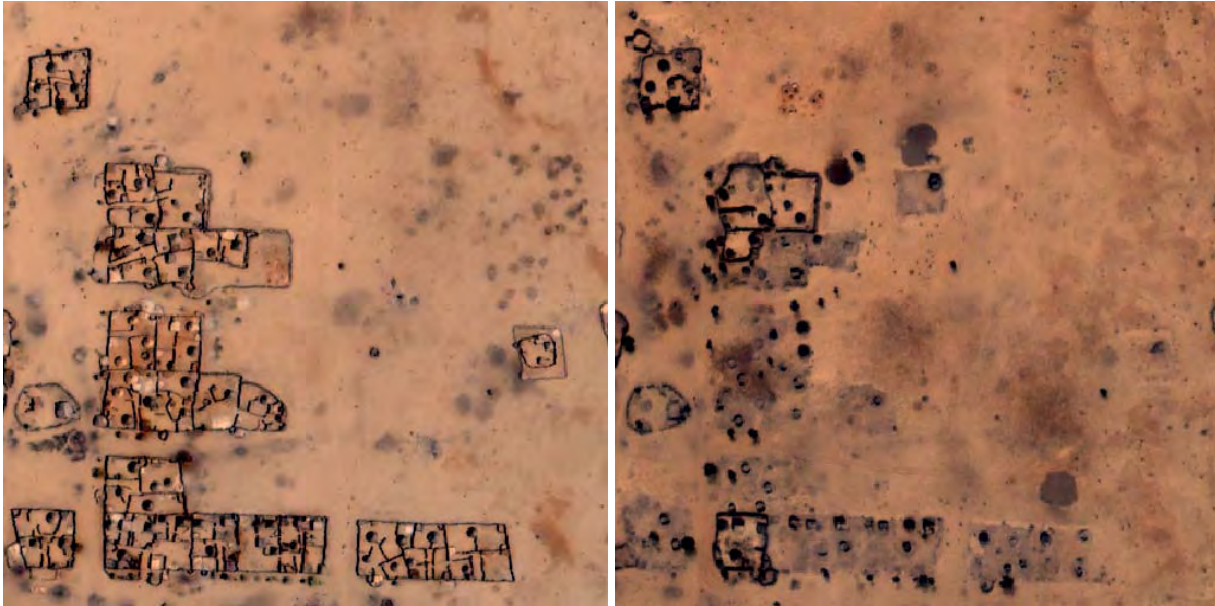


Abb. 1: Ausschnitt der Quickbird 2 Szene (Echtfarbenkombination) des Dorfes Shangil vor der Zerstörung am 10.03.2003 (links) und nach der Zerstörung am 18.12.2006 (rechts). Bilder mit Genehmigung von Digital Globe (©Digital Globe 2003 und ©Digital Globe 2006).

3 Veränderungsanalyse basierend auf Filterung im Frequenzraum

Im folgenden werden vier Verfahren dargestellt, die auf einer adaptiven Bandpassfilterung im Frequenzraum basieren. Die Basis für diese Verfahren ist dabei jeweils die gleiche und wird in Abb. 2 schematisch dargestellt. In einem ersten Schritt werden aus den multispektralen Bildern künstliche panchromatische Daten erzeugt. Der Wert im Ausgangsbild wird dabei durch Mittelwertbildung der Eingangsdaten errechnet, also bei 3 Kanälen: $(r + g + b)/3$. Dieses Bild wird anschließend mittels einer *Fast Fourier Transform* (FFT) in den Frequenzraum überführt (BRIGHAM 1997, OPPENHEIM & SCHAFFER 1975). In einem weiteren Schritt werden unterschiedliche Bandpassfilter entworfen, um zu untersuchen, in welchen Frequenzen die benötigten Informationen für die Veränderungsanalyse zu finden sind.

Filter dienen dazu, erwünschte von unerwünschten Informationen zu trennen. Für die Veränderungsanalyse von Gebäuden sind Kanten in den Bildern von T1 und T2 die Untersuchungsobjekte, daher dient die Analyse des Fourierspektrums zum Entwurf von kantenverstärkenden Bandpassfiltern. In einem ersten Schritt werden dabei Bandpassfilter erzeugt, die nur jeweils eine Frequenz beinhalten. Diese werden dann sukzessive erweitert, um geeignete Bandpassfilter zu bestimmen.

Für das Untersuchungsgebiet wurde dabei herausgefunden, dass sowohl die niederfrequenten als auch die hochfrequenten Anteile für die Veränderungsanalyse wichtig sind. In den niedrigen Frequenzen konnte so die Zonen für das Gebiet Shangil identifiziert werden, die einzelne Gebäude mit eingezäunten Arealen enthielten. In den höheren Frequenzen konnte dagegen die genaue Lage der Gebäude und Objekte bestimmt werden. In den höchsten Frequenzen existierte allerdings nur Rauschen, sodass keine objektrelevante Information extrahiert werden konnte. Die

Frequenzen nahe der Nullfrequenz entsprachen im Wesentlichen den niederfrequenten Grauwertschwankungen, die für die Veränderungsanalyse nicht verwendet werden konnten. Bei sehr engen Bandpassfiltern tritt das Problem des Gibb'schen Phänomens (Oszillation im Ortsbereich) auf. Um die dadurch entstehenden Artefakte zu vermeiden, wurde zum Einen ein breiterer Bandpassfilter eingesetzt und zum Anderen dieser mit einer glättenden Fensterfunktion multipliziert.

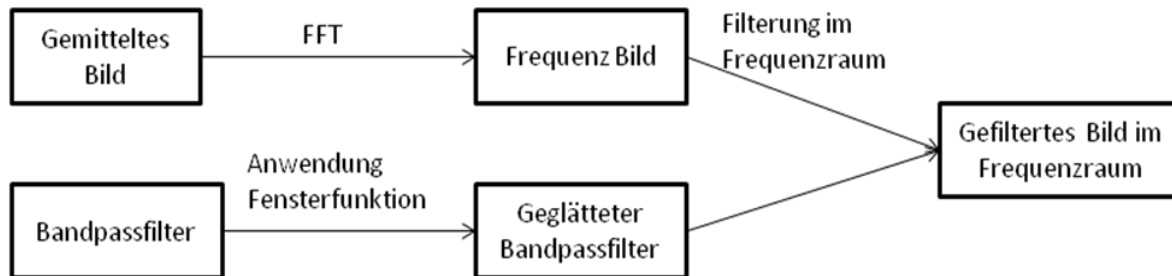


Abb. 2: Darstellung der Operationen, die als Basis für die nachfolgenden Analysen dienen, in den folgenden Abbildungen als Teil A bezeichnet.

Bei der Anwendung einer Fensterfunktion bleiben nur die Werte innerhalb des Fensters ohne Veränderung erhalten. Das Ergebnis wird daher durch die Größe und Art des Filters bestimmt. Die Größe des Filters wird mit einem Radius der Ortsfrequenzen (*cut-off* Frequenz) festgelegt. Die Ortsfrequenz ist die Anzahl der Perioden einer sinusförmigen Verteilung je Längeneinheit. In der Literatur tauchen unterschiedliche Arten von Fensterfunktionen auf. In dieser Studie wurde ein Hanningfenster verwendet (BRIGHAM 1997, EHLERS & KLONUS 2004, OPPENHEIM & SCHAFER 1975). Die Anwendung dieser Fensterfunktion auf den Bandpassfilter erzeugt einen geglätteten Bandpassfilter, der so gut wie keine Artefakte im Ortsraum hervorruft. Ist der Bandpassfilter erstellt, wird dieser mit dem Frequenzspektrum des Eingabebildes multipliziert. Die weiteren Operationen bestehen aus insgesamt vier unterschiedlichen Verfahren, die auf diesem Grundprinzip aufbauen.

3.1 Subtraktion im Frequenzraum

Das erste Verfahren wendet den oben beschriebenen Teil A auf die beiden Eingangsdaten T1 und T2 an. Das Ergebnis bzw. die gefilterten Bilder werden dann im Frequenzraum voneinander subtrahiert. Das subtrahierte Frequenzspektrum wird dann mit einer inversen FFT zurück in den Ortsraum transformiert (Abb. 3).



Abb. 3: Subtraktion im Frequenzraum nach Bandpassfilterung

Um die Kanten aus dem subtrahierten Bild zu extrahieren, müssen unterschiedliche Operationen durchgeführt werden. In einem ersten Schritt werden über Schwellwerte im Histogramm des Graustufenbildes einige der Kanten extrahiert. Dieses Kantenbild wurde dann binär abgespeichert, wobei der Grauwert 1 den Kanten entspricht, die sich verändert haben, und 0 Gebiete repräsentiert, die nur Pseudoveränderungen oder keine Veränderungen zeigen.

In einem nächsten Schritt werden dann unterschiedliche digitale Operationen angewandt (Majoritätsfilter, morphologisches Öffnen und Schließen). Als geeignete Verfahren erwiesen sich für die untersuchte Bildszene ein 5x5 Majoritätsfilter sowie morphologisches Öffnen und Schließen in einer quadratischen 3x3 Matrix.

3.2 Korrelation im Frequenzraum

Ein weiteres Verfahren stellt die Korrelation im Frequenzraum dar. Dafür werden erneut die bandpassgefilterten Szenen von T1 und T2 verwendet. Die Korrelation berechnet sich aus der Kovarianz und den Varianzen der Eingangsdaten.

Beste Ergebnisse wurden dabei durch eine Korrelation in einer 7x7 Matrix erzielt. Nach der Berechnung der Korrelation zwischen den bandpassgefilterten Frequenzspektren von T1 und T2 wurden die beiden Szenen addiert. In einem nächsten Schritt fand die Auswahl von Frequenzen statt, die eine Korrelation unterhalb eines Grenzwertes von 0,3 aufwiesen. Das Frequenzspektrum wurde danach mit einer inversen FFT zurück in den Ortsraum transformiert (Abb. 4).

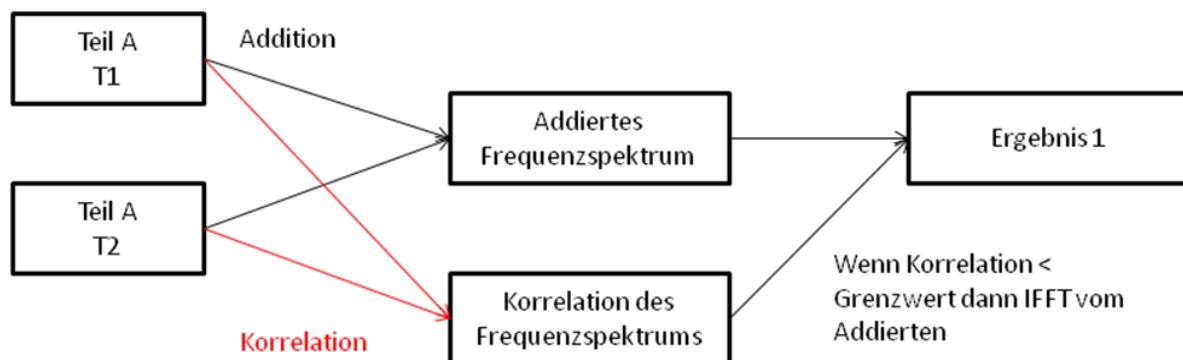


Abb. 4: Korrelation im Frequenzraum

3.3 Korrelation im Ortsraum

Bei dem dritten Verfahren werden die bandpassgefilterten Fourierspektren zunächst mit einer inversen FFT zurück in den Ortsraum überführt. Anschließend werden die beiden Szenen korreliert (Abb. 5).

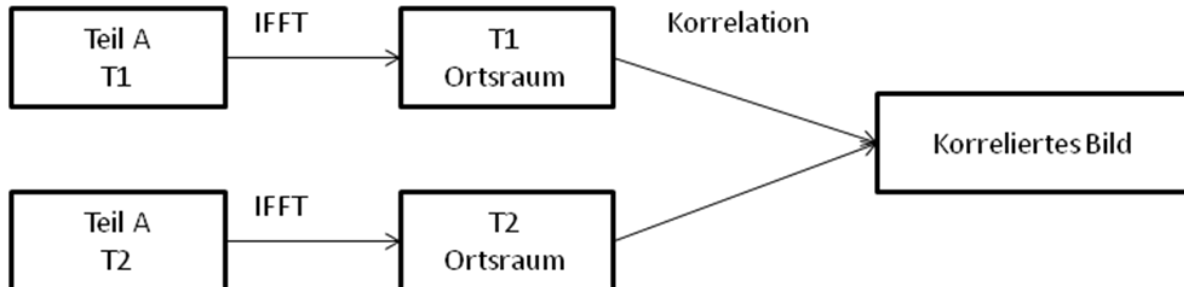
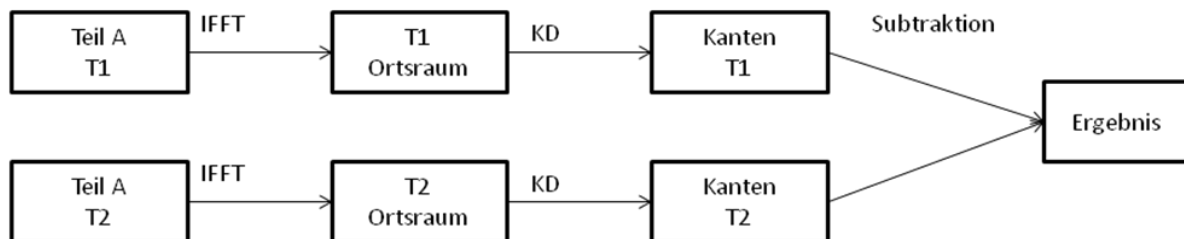


Abb. 5: Korrelation im Ortsraum

3.4 Kantendetektion im Ortsraum

Für dieses Verfahren werden zunächst die bandpassgefilterten Fourierspektren mit einer inversen FFT in den Ortsraum transformiert. Anschließend wird auf beide Bilder im Ortsraum ein Kantendetektionsoperator angewandt (Abb. 6). Die besten Ergebnisse zeigte der Kantenoperator von CANNY (1986). Auch hier werden zur Verbesserung der Ergebnisdarstellung anschließend morphologische Operatoren (Öffnen und Schließen) eingesetzt.



KD = Kantendetektion

Abb. 6: Kantendetektion im Ortsraum

4 Veränderungsanalyse unter Nutzung von Segmentierungsverfahren und Korrelation

Dieses Verfahren basiert auf einer Segmentierung der Eingangsdaten der Zeitpunkte T1 und T2. Für dieses Segmentierungsverfahren wurde ein Segmentierungsalgorithmus entwickelt, der auf der euklidischen Distanz basiert (PRIDDY & KELLER 2005). Nach der Segmentierung der Szenen T1 und T2 werden zunächst die Segmente von T1 ausgewählt. Für jedes Segment wird die Korrelation der Werte von T1 und T2 berechnet und diesem Segment zugewiesen. Anschließend

wird für die Segmente von T2 dieser Prozess wiederholt. Segmente mit einer hohen Korrelation enthalten nur geringe oder keine Veränderungen. Segmente mit einer niedrigen Korrelation enthalten Veränderungen. Im nächsten Schritt wird ein Schwellwert bestimmt, sodass ein Binärbild entsteht, welches Veränderungen durch den Grauwert 1 und keine Veränderungen durch den Grauwert 0 kodiert.

Ein Problem, das auftreten kann, wenn lediglich z.B. T1 segmentiert wird, ist, dass im T2 Bild Objekte nicht mehr auftreten und diese daher einem größeren Segment zugeordnet werden. Dieses Segment zeigt dann Veränderungen an, die sich allerdings nicht auf das gesamte Segment beziehen, sondern lediglich auf einen Teil dieses Segmentes. Um dieses Problem zu vermeiden, werden beide Szenen unabhängig voneinander segmentiert sowie anschließend die Korrelation in beide Richtungen (T1-T2 und T2-T1) berechnet (Abb. 7). Dadurch sind zumindest in der einen segmentierten Szene kleine Segmente vorhanden, welche die Strukturen korrekt abbilden. Durch konditionale Operationen kann geschlossen werden, ob in einem größeren Segment in der einen Szene kleinere Segmente in der anderen Szene liegen. Durch das anschließende Setzen von Schwellwerten im Histogramm kann das Ergebnis dann noch verbessert werden.

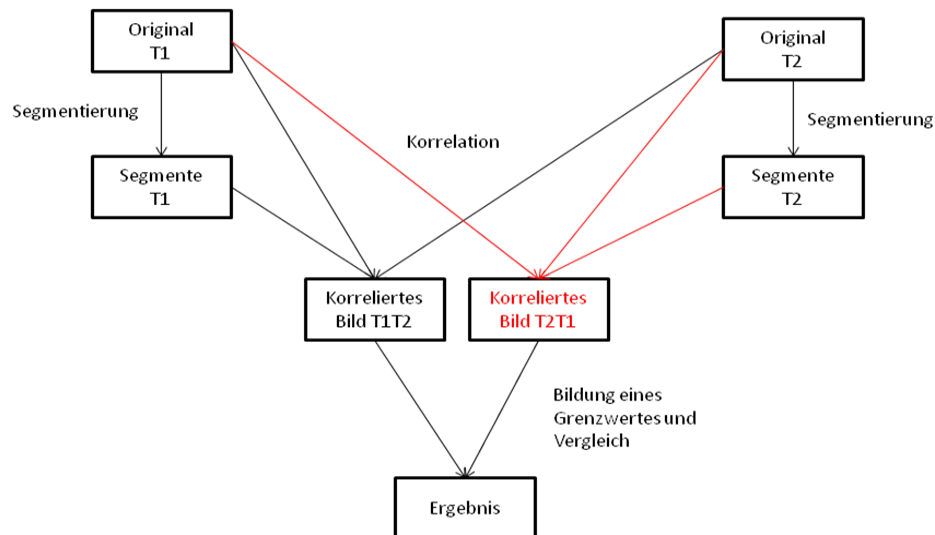


Abb. 7: Veränderungsanalyse unter Nutzung von Segmentierungsverfahren und Korrelation

5 Ergebnisse der Veränderungsanalysen

Die Ergebnisse der Veränderungsdetektion der fünf unterschiedlichen Verfahren zeigen Abbildungen 8 – 10. Die Verfahren, die auf der Korrelation im Frequenzraum (Abb. 8 b) und im Ortsraum (Abb. 9 a) basieren, zeigen viele Veränderungen nicht an, indizieren aber häufig Pseudoveränderungen. Morphologische Verfahren bzw. Majoritätsfilter brachten hier keine Verbesserungen. Das gleiche gilt für andere Fenstergrößen bei der Korrelation bzw. andere Schwellwerte bei der Binärisierung. Die anderen drei Verfahren (Abb. 8a, 9b und 10) zeigen durchweg bereits im ersten Ansatz akzeptable Ergebnisse.

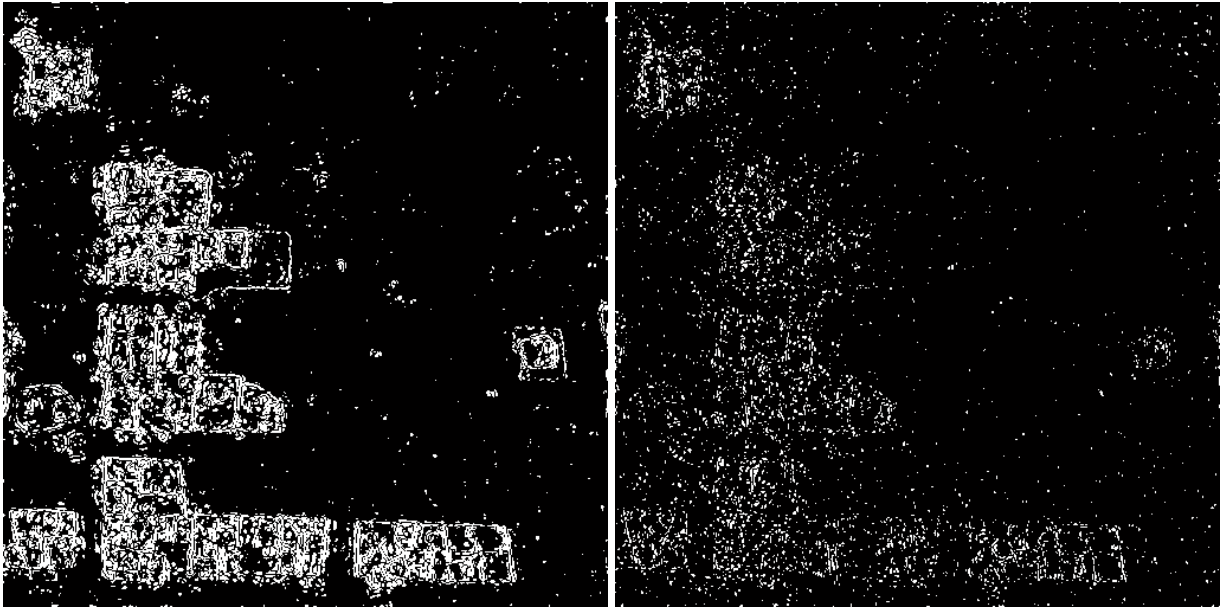


Abb. 8: a) Ergebnis der Subtraktion im Frequenzraum (links) und b) Ergebnis der Korrelation im Frequenzraum (rechts)

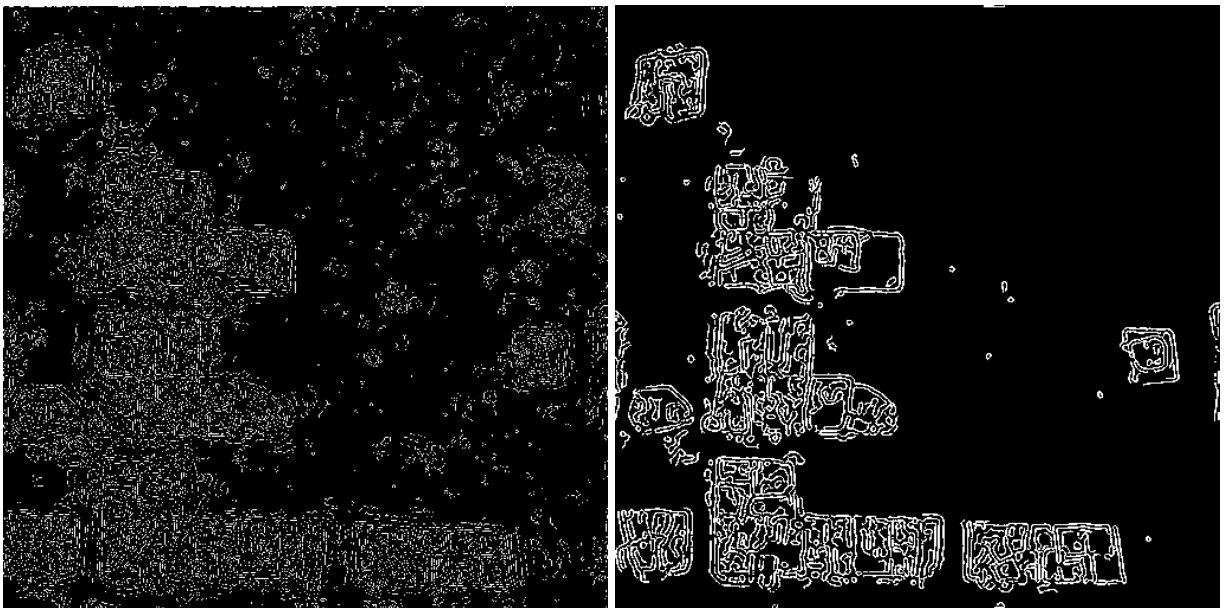


Abb. 9: a) Ergebnis der Korrelation im Ortsraum (links) und b) Ergebnis der Kantendetektion im Ortsraum (rechts)

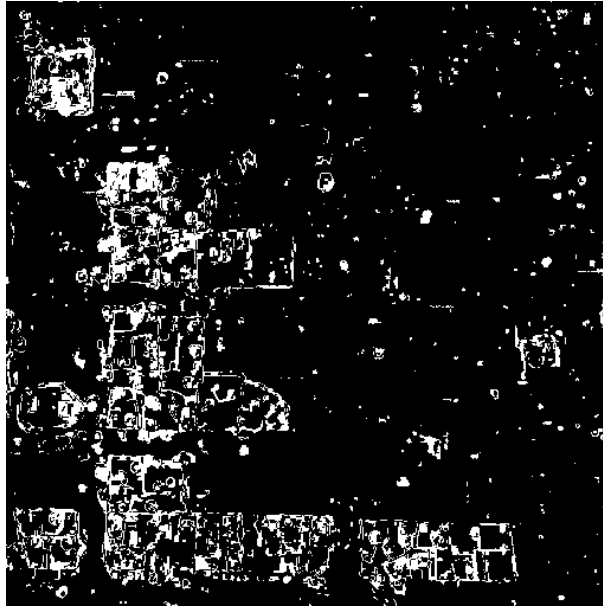


Abb. 10: Ergebnis der Veränderungsanalyse über Segmentierung und Korrelation

Das Verfahren über Segmentierung und Korrelation (Abb. 10) zeigt zwar ebenfalls noch viel Pseudochange an, allerdings können hier die Grenzwerte noch optimiert werden. Auch die Subtraktion im Frequenzraum (Abb. 8 a) weist noch relativ viel Pseudochange auf, in Kombination mit der Kantendetektion könnten die Ergebnisse aber noch verbessert werden. Die Kantendetektion im Ortsraum (Abb. 9 b) besitzt insgesamt die besten Ergebnisse, alle Gebäude können erkannt werden und nur drei Objekte zeigen Pseudochange an.

6 Zusammenfassung

Fünf unterschiedliche Verfahren zu Erkennung von Veränderungen an Gebäuden wurden in diesem Artikel vorgestellt. Insbesondere das Verfahren zur Kantendetektion nach Frequenzraum-basierter Bandpassfilterung zeigt eine hohe Genauigkeit. Die Ergebnisse von Korrelation im Frequenzraum und im Ortsraum sind nicht akzeptablen Ergebnisse und werden nicht weiter verfolgt. Dagegen können die übrigen Verfahren (Subtraktion im Frequenzraum und Segmentierung mit Korrelation) noch durch Anpassung der Grenzwerte und morphologische Operationen optimiert werden. Zudem sollten diese Verfahren noch auf andere und größere Testgebiete angewandt werden. In einem weiteren Schritt erhoffen wir uns robustere Ergebnisse durch eine kombinierte Anwendung mehrerer Verfahren.

7 Literaturverzeichnis

- BRIGHAM, E.O., 1997: FFT Anwendungen – Oldenbourg Verlag, München.
CANNY, J., 1986: A computational approach to edge detection. Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, **8** (6), S. 679-698.

- DAI, X. & KHORRAM, S., 1999: Remotely Sensed Change Detection Based on Artificial Neural Networks. *Photogrammetric engineering & remote sensing*, **65** (10), S. 1187–1194.
- EHLERS, M. & KLONUS, S., 2004: Erhalt der spektralen Charakteristika bei der Bildfusion durch FFT basierte Filterung. *Photogrammetrie-Fernerkundung-Geoinformation (PFG)*, **6**, S. 495–506.
- FOODY, G.M., 2001: Monitoring the magnitude of land-cover change around the southern limits of the Sahara. *Photogrammetric engineering & remote sensing*, **67** (7), S. 841–847.
- IM, J., JENSEN, J.R. & TULLIS, J.A., 2008: Object-based change detection using correlation image analysis and image segmentation. *International journal of remote sensing*, **29** (1-2), S. 399–423.
- LOHMANN, P., HOFFMANN, P. & MÜLLER, S., 2008: Updating GIS by object-based change detection. In J. Schiewe & M. Ehlers (Eds.), *gi-reports@igf - Geoinformatics paves the Highway to Digital Earth: On the occasion of the 60th birthday of Professor Manfred Ehlers* **8**, S. 81–86.
- LU, D., MAUSEL, P., BRONDÍZIO, E. & MORAN, E., 2003: Change detection techniques. *International journal of remote sensing* **12**, S. 2365–2407.
- LU, D., MAUSEL, P., BATISTELLA, M. & MORAN, E., 2005: Land-cover binary change detection methods for use in the moist tropical region of the Amazon: a comparative study. *International journal of remote sensing*, **26** (1), S. 101–114.
- MACLEOD, R.D. & CONGALTON, R.G., 1998: A quantitative comparison of change-detection algorithms for monitoring eelgrass from remotely sensed data. *Photogrammetric engineering & remote sensing*, **3**, S. 207–216.
- MAS, J.F., 1999: Monitoring land-cover changes: a comparison of change detection techniques. *International journal of remote sensing* **1**, S. 139–152.
- NEMMOUR, H. & CHIBANI, Y., 2006: Fuzzy neural network architecture for change detection in remotely sensed imagery. *International journal of remote sensing*, **27** (3-4), S. 705–717.
- NIEMEYER, I. & NUSSBAUM, S., 2006: Automatisierte Detektion, Klassifizierung und Visualisierung von Veränderungen auf der Grundlage von Fernerkundungsdaten. In *Tagungsband des 7. Geokinematischen Tages vom 11. und 12. Mai 2006 in Freiberg*, Editor: I. NIEMEYER, A. SROKA & R. WITTENBURG (Glückauf, Essen, 2006), S. 248–257.
- OPPENHEIM, A.V. & SCHAFER, R.W., 1975, *Digital Signal Processing*, Prentice Hall Inc., Englewood Cliff, New Jersey.
- PRAKASH, A. & GUPTA, R.P. 1998: Land-use mapping and change detection in a coal mining area - a case study in the Jharia coalfield, India. *International journal of remote sensing*, **19** (3), S. 391–410.
- PRIDDY, K.L. & KELLER, E.K., 2005: *Artificial Neural Networks - An Introduction*, Spie Press, Bellingham, Washington, USA.

Evaluation of the RapidEye red edge channel for improving land-use classifications

CHRISTIAN SCHUSTER¹, MICHAEL FÖRSTER¹ & BIRGIT KLEINSCHMIT¹

Zusammenfassung: Eine der vielversprechendsten Entwicklungen zur Verbesserung von Landnutzungsklassifikationen ist die Erweiterung multispektraler Satellitensensoren um einen Red-Edge-Kanal, dessen elektromagnetisches Spektrum zwischen 680 - 740 nm sich als sehr sensitiv bezüglich des pflanzlichen Chlorophyllgehaltes erwiesen hat. Der seit 2009 operierende deutsche Satellit RapidEye stellt das Red-Edge-Spektrum erstmals in einem Satelliten getragenen Sensor operationell zur Verfügung. Ziel dieser Forschungsarbeit ist die Evaluierung der Potentiale des RapidEye Red-Edge-Kanals zur Landnutzungs-klassifikation der Stadt Potsdam und seiner ruralen Umgebung. Auf Basis einer Aufnahme im Juli 2009 wurden überwachte Landnutzungsklassifikationen mittels Support Vector Machine und Maximum Likelihood durchgeführt. Dabei fanden die Kanäle des RapidEye Sensors mitsamt verschiedener abgeleiteter Indizes (z. B. NDVI-Red-Edge) in Form eines 29-Layer-Stacks Eingang in die Klassifikation. Als GroundTruth diente eine Biotoptypen-kartierung, aus der unabhängige Zufallsstichproben zur Trainierung und Validation für 16 Klassen extrahiert wurden. Der Klassifikationsprozess wurde sowohl mit als auch ohne Red-Edge-Information vollzogen, um Unterschiede feststellen und die Klassifikationsgüte vergleichen zu können. Erste Ergebnisse zeigen, dass die Red-Edge-Information die Klassifikationsgüte erhöht. Die höchsten positiven Effekte werden für Klassen der Offenland-vegetation erreicht, insbesondere für Strauchvegetation. Bei einigen Klassen tritt eine Verschlechterung ein. In Tendenz zeichnet sich ab, dass unter Einbezug des Red-Edge-Kanals Vegetationsklassen eher besser, urbane Bebauungsklassen dagegen eher schlechter klassifiziert werden. Der Rapid-Eye Red-Edge-Kanal und daraus abgeleitete Indizes können Landnutzungsklassifikationen für ausgewählte Klassen also verbessern.

1 Introduction

Land-use / land-cover is a critical variable that links important parts of the human and physical environment (FOODY & MATHUR 2004). The question of “what is where” on the Earths’ surface is regarded as first level ecological question (CURRAN 2001). Satellite remote sensing can deliver accurate and up-to-date land-use classifications for land resource planning, studies of biodiversity, the global or regional biogeochemical cycle or environmental change (CHEHBOUNI ET AL. 2008, FOODY & MATHUR 2004, FRIEDL ET AL. 2006). However, there is still a strong need and high technical potential to improve the accuracy of classification results or the detail in thematic classification depths.

To this end, technical parameters of satellites and sensors as well as image classification processes are subject to constant development. With respect to the technical parameters in optical

1) Technische Universität Berlin, Straße des 17. Juni 145, EB 5, 10623 Berlin; E-Mail: christian.schuster@tu-berlin.de, michael.foerster@tu-berlin.de & birgit.kleinschmit@tu-berlin.de

remote sensing, spatial, temporal, radiometric and spectral resolution are the major topics worked on. Regarding the latter, development heads towards the establishment of image spectroscopy sensors as well as the introduction of additional bands in broad-band multi-spectral sensors. Here, the wavelength between the visible red and the near infrared, the so called red edge spectrum (680 nm to 740 nm) is particularly focused on. Because of its sensitivity with regard to the chlorophyll content of plants, it is used for identifying vegetation stress or crop nutrition diagnostic (e.g. HORLER 1983, DAWSON & CURRAN 1998, MUTANGA & SKIDMORE 2007). However, due to the lack of data, so far no studies exist that evaluate the influence of the red edge channel in high-resolution multi-spectral satellites for land-use classifications on the landscape scale. Since early 2009 the German RapidEye satellite represents the first high-resolution multi-spectral satellite operationally providing the red edge spectrum. Hence, it is the objective of this study to explore and evaluate the benefit of the RapidEye red edge channel for land-use classifications. Related research questions are:

1. Are land-use classifications based on multi-spectral RapidEye satellite data sensitive for the red edge channel or red edge derived indices respectively?
2. Is the sensitivity dependent on different land-use classes?
3. Does the incorporation of the red edge spectrum lead to a class-specific or even general improvement of classification results?

Therefore, land-use classification were performed using two different sets of spectral channels and derived indices as feature input – one that includes and one that excludes the red edge band. The results were compared with respect to overall and class-specific classification accuracy. Moreover, two different classification algorithms, Support Vector Machine and Maximum Likelihood, were applied.

2 Material and Methods

2.1 Study site

The study-site covers the Nature conservation heathland area Döberitzer Heide and the surrounding rural and urban area of Potsdam, located west of Berlin in north-eastern Germany. Its total extent of about 660 km² stretches from 52.55°N / 12.88°E (UL) to 52.30°N / 13.22°E (LR). Due to its former long-term military use, the Döberitzer Heide was protected from fragmentation and transformation into agricultural land. Nowadays it represents a rich mosaic of heathland, grassland, humid meadows and wood on dominantly sandy soils and rather flat terrain. Apart from this central natural open landscape, major land-use units within the surrounding research area are forest, urban or rural settlements and agriculture.

2.2 Data

The data used for this study consists of optical RapidEye satellite imagery as well as digital biotope maps and selective vegetation field mapping for ground validation. RapidEye is a commercial optical Earth observation mission. It represents a constellation of five mini-satellites and provides high-resolution multi-spectral imagery in five optical bands in the 400 - 850 nm range. Delivering imagery since February 2009, it represents the first space-born sensor to operationally provide the red edge spectrum (690 - 730 nm) in addition to the standard channels

of multi-spectral satellite sensors. The satellites are placed equally-spaced in a single sun-synchronous orbit at an altitude of 630km. The swath width is 77 km, the revisit time is 5.5 days and the ground sampling distance 6.5 m (both at nadir) (SANDAU 2010). The data was ordered as Level 1B, so that potential distortion caused by radiometric resampling to 5 m pixel size (Level 3A) is avoided. The acquisition date of the scene used for this study is around 11 a.m. on July 27th 2009. The delivered scene is free of cloud or haze. It was geo-referenced using a QuickBird scene and digital topographic maps. For the generation of classification training and validation samples, the digital biotope maps from 2004 at scale 1:10,000 were employed and supplemented by data from an intensive vegetation field mapping campaign on selected sites in July 2009.

2.3 Spectral data analysis

For the image preprocessing feature extraction, 24 spectral indices were calculated from the spectral channels of the RapidEye scene to broaden the feature input for the classification process. Special focus is given to the calculation of new indices that incorporate the red edge

Tab.1: List of spectral features. Red edge features for as part of the red edge stack are marked in grey.

Group	No.	Spectrum / Index calculation
Original channels VIS-NIR	1	blue
	2	green
	3	red
	4	rededge
	5	NIR
NDVI	6	$(\text{NIR} - \text{red}) / (\text{NIR} + \text{red})$
	7	$(\text{rededge} - \text{red}) / (\text{rededge} + \text{red})$
	8	$(\text{rededge} - \text{green}) / (\text{rededge} + \text{green})$
	9	$(\text{NIR} - \text{rededge}) / (\text{NIR} + \text{rededge})$
Ratio matrizes	10	$\text{NIR} / \text{rededge}$
	11	NIR / red
	12	$\text{NIR} / \text{green}$
	13	NIR / blue
	14	$\text{rededge} / \text{red}$
	15	$\text{rededge} / \text{green}$
	16	$\text{rededge} / \text{blue}$
	17	$\text{red} / \text{green}$
	18	red / blue
19	$\text{green} / \text{blue}$	
Differenz matrices	20	$\text{NIR} - \text{rededge}$
	21	$\text{NIR} - \text{red}$
	22	$\text{NIR} - \text{green}$
	23	$\text{NIR} - \text{blue}$
	24	$\text{rededge} - \text{red}$
	25	$\text{rededge} - \text{green}$
	26	$\text{rededge} - \text{blue}$
	27	$\text{red} - \text{green}$
	28	$\text{red} - \text{blue}$
29	$\text{green} - \text{blue}$	

spectrum. The spectral indices range from the classic vegetation index NDVI with adaptations to the red edge channel (e.g. NDVI RedEdgeRed) to different ratios and difference matrices as listed in Tab. 1. Together with the five original spectral channels the derived indices are joined to a 29 - layer stack (red edge stack) as classification input file, which is reduced to a 17 - layer stack (no red edge stack) for the classification without red edge channel and indices.

As ground truth data digital biotope maps were employed to aggregate static land-use classes for the study area, supplemented by data for selected sites from the vegetation field mapping campaign. The aggregated land-use classes comprise 16 classes of natural open landscape (dry grassland, bush vegetation, herbaceous perennial plants, sandy open soils, moor and swamp vegetation), water bodies, agricultural areas (crops and meadows), forest (deciduous and coniferous) and urban classes (impervious surfaces, open housing, housing blocks, row housing, streets, railways). The total samples for each class are distributed over the

research area and comprise 500 to 800 pixels, from which sub-samples are collected during training and validation in the classification process.

For the supervised classification two different classification algorithms were employed: Support Vector Machine (SVM) and Maximum Likelihood (ML). SVM-based approaches are non-parametric and represent a rather recent development in image classification. SVMs fit an optimal hyper-plane between classes and require only small sets of training samples (FOODY & MATHUR 2004). For this study, the recently developed open source software and ENVI-plugin imageSVM was used (van der Linden 2009). The Maximum Likelihood algorithm is a robust parametric approach in remote sensing image classification (FOODY & MATHUR 2004). Both classification procedures were applied five times using different pairs of training and validation sub-samples. According to the “good rule of thumb” (CONGALTON 1991), such training and validation sub-samples comprise 100 pixels for each class, selected through stratified random sampling. It was decided not to apply post classification processes like majority filtering for the enhancement of classification results, since this study focuses on the mere result of the pixel classification only to evaluate the red edge. Finally, an accuracy assessment of the classification results was performed. For the final description and illustration of results, the F1-measure was calculated so that both producer’s as well as user’s accuracy are considered. The deviation of results for (a) when red edge is included and (b) when it is excluded is compared.

3 Results

With respect to the research questions of this study major results are summarized as follows:

1. In general, land-use classifications based on multi-spectral satellite data are sensitive for the red edge channel or red edge derived indices respectively.
2. The sensitivity strongly depends on different land-use classes.
3. The incorporation of the red edge channel may lead to a slight general improvement of classification results. The effect on the classification accuracy of individual classes may be positive or negative.

Results from the Support Vector Machine classification indicate that the overall accuracy is 72.0 % when the red edge channel and indices are included as input features, while the overall accuracy is 71.7 % when the red edge channel and indices are excluded (Fig. 1). Consequently, the incorporation of the red edge only leads to a very slight improvement of the general classification result. Yet, the range in class-specific accuracies is large and the sensitivity to the red edge depends on the investigated class. Tab. 2 illustrates that most classes are positively affected by the inclusion of the red edge channels and indices. 10 classes are positively, 5 classes are negatively influenced. While the red edge deviation for most classes is lower than 3%, meadow (+5.64 %), herbaceous perennial plants (+4.13 %) and bush vegetation (+3.74 %) show distinct positive, moor and swamp vegetation (-5.20 %) and open housing (-7.65 %) distinct negative deviation. The overall red edge deviation spread range is 13.29 %.

Magnitudes of the overall accuracy when Maximum Likelihood was applied are 64.1 % with and 63.5 % without red edge and derived indices, so that the general red edge effect is regarded as obviously positive (Fig.1). Again, the red edge sensitivity depends on the investigated land-use

Tab. 2: Integrated results and red edge deviations for Support Vector Machine and Maximum Likelihood with and without red edge.

Land-use class	SVM (F1-measure in %)			ML (F1-measure in %)		
	incl. red edge	excl. red edge	deviation	incl. red edge	excl. red edge	deviation
deciduous forest	82.05	82.58	- 0.64	71.12	66.09	+7.60
coniferous forest	97.37	95.49	+1.97	95.05	95.03	+0.02
moor and swamp vegetation	60.00	63.29	- 5.20	50.78	49.46	+2.67
herbaceous perennial plants	48.18	46.27	+4.13	37.76	36.91	+2.32
dry grassland	66.21	65.00	+1.87	62.56	60.82	+2.86
bush vegetation	49.33	47.55	+3.74	33.92	29.77	+13.93
cropland	88.89	87.66	+1.41	76.39	75.00	+1.85
meadow	63.09	59.72	+5.64	50.00	49.42	+1.18
sandy open soils	84.27	84.61	- 0.40	77.11	75.28	+2.42
water bodies	100.00	100.00	0.00	100.00	100.00	0.00
sealed surfaces	93.51	91.61	+2.07	90.86	88.06	+3.18
housing blocks	59.70	58.99	+1.20	47.36	46.00	+2.97
open housing	55.78	60.40	- 7.65	47.46	52.31	- 9.26
row housing	36.09	35.77	+0.90	27.04	29.60	- 8.65
streets	74.42	76.47	- 2.69	68.33	69.30	- 1.39
railways	92.52	91.16	+1.49	90.36	92.84	- 2.67
Overall accuracy	72.0	71.7	+0.4	64.1	63.5	+1.0

class. A clear majority of 11 individual classes are positively, only 4 of them are negatively affected (Fig. 2). Results report relatively strong red edge deviations for bush vegetation (+13.93 %), deciduous forest (+7.60 %), row housing (- 8.65 %), and open housing (-9.26 %). The overall range is 23.19 % (Tab. 2).

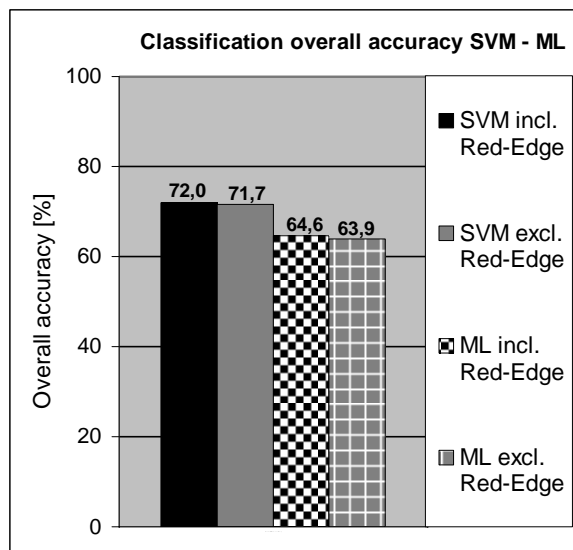


Fig.1: Classification overall accuracies for Support Vector Machine and Maximum Likelihood with and without red edge.

A comparison of the results for both algorithms shows that the overall accuracy is about 8 % higher for SVM than for ML. While for some classes, the classification accuracy difference between SVM and ML is rather similar (coniferous forest, dry grassland, sealed surfaces, railways), it differs considerably for most others (in particular bush vegetation, meadow and housing classes). Yet, both results follow the same class specific pattern (Tab. 2, Fig. 2). Regarding red edge deviations, the trend shows the same direction (positive or negative) for 11 classes, while it is converse for only 5 classes (Tab. 2). The most similar and strong deviations in magnitude are observed for open housing (-7.65% (SVM))

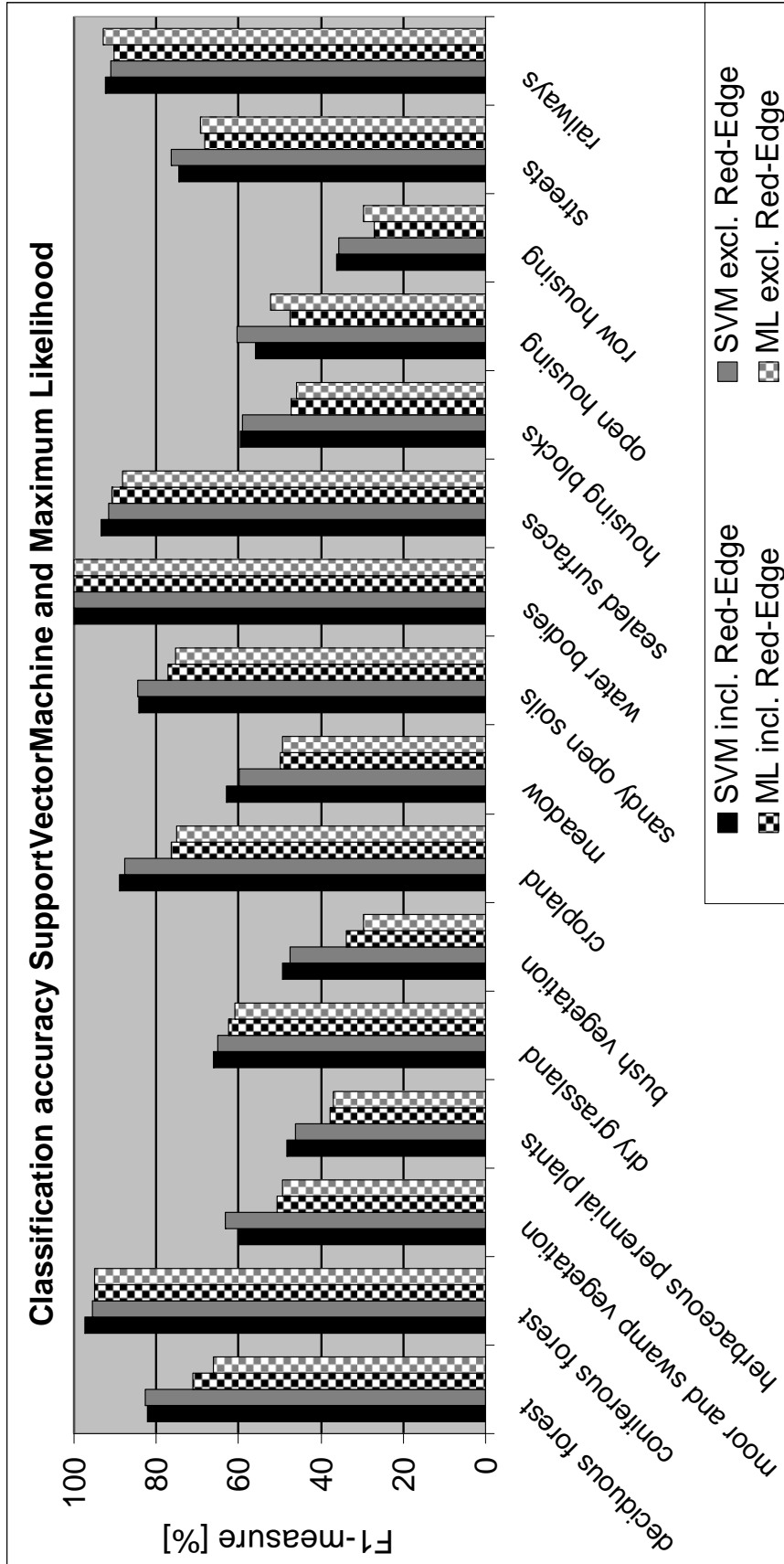


Fig. 2: Classification results for Support Vector Machine and Maximum Likelihood including and excluding red edge features.

compared to -9.26% (ML)) with a strong negative trend as well as bush vegetation (+3.74% (SVM) compared to 13.93% (ML)), where the incorporation of the red edge induces a clearly positive effect. Contrarily, the most obvious differences in red edge effects are reported for deciduous forest, moor and swamp vegetation and row housing. Differences are generally stronger when ML is applied (overall accuracy +1 % instead of +0.4 %; total deviation range 23.19 % compared to 13.29 %).

4 Discussion

The comparison of results with and without red edge impact reveals that the red edge induces a slightly higher overall accuracy of results. This observation is supported by the results of both classification algorithms employed.

Most classes are positively affected by the inclusion of the red edge channels and related indices; however, the red edge effect strongly depends on the investigated land-use class. Highest and clearly positive effects are gained for classes of open landscape vegetation, e.g. for bush vegetation. This observation matches the expectations from related literature research, as the red edge spectrum is known as specifically sensitive for vegetation chlorophyll content (e.g. HORLER 1983, DAWSON & CURRAN 1998, MUTANGA & SKIDMORE 2007). Forest classes also show slightly positive response, while the sensitivity of artificial surface classes are rather level. Classification accuracy mainly decreases when the observed land-use class does not comprise considerable vegetation chlorophyll, as it is the case for streets. Then, the incorporation of the red edge features does not provide additional valuable information but rather confuses the classification algorithm instead.

Although both SVM and ML based results indicate a general trend in class-specific classification accuracies, SVM-results are distinctly more accurate in particular for heterogeneous classes due to its non-parametric character. While the general trend in red edge deviation is rather similar, too, few exceptions from this observation exist, which could potentially be traced back to relatively strong variations of the results observed for individual training and validation sample pairs.

5 Conclusion

With respect to the major research objective of this study, results indicate that land-use classifications generally benefit from the RapidEye red edge channel. It can be stated that the RapidEye red edge channel represents a useful feature for land-use classifications, particularly in relation to vegetated surfaces. Thus the primary goal of this study is satisfactorily addressed.

Nevertheless, the interpretation of these results can only be regarded as preliminary, since further research is necessary to widen the application on other landscape constellations. With respect to the significance of class-specific results, distinct statements should be based on an increased number of classification iterations with changing training and validation sample pairs.

Future research should additionally encompass an examination of feature importance, so that the most important red edge indices can be selected in view of reduced feature input and further improved classification accuracy.

6 Acknowledgements

This study was conducted within the CARE-X project coordinated by the Technical University of Berlin. The project is funded by the German National Space Agency DLR (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.) on behalf of the German Federal Ministry of Economy and Technology based on the Bundestag-resolution 50EE0923. We acknowledge the DLR for the delivery of RapidEye images as part of the RapidEye Science Archive - proposal 319. The authors thank Annett Frick (Luftbild Umwelt Planung, Potsdam) for the ground truth data and fruitful discussions as well as Andreas Rabe and Sebastian van der Linden (Humboldt University of Berlin) for their currently developed software imageSVM and related support.

7 Literature

- CHEHBOUNI, A., ESCADAFAL, R., DUCHEMIN, B., BOULET, G., SIMONNEAUX, V., DEDIEU, G., MOUGENOT, B., KHABBA, S., KHARROU, H., MAISONGRANDE, P., MERLIN, O., CHAPONNIERE, A., EZZAHAR, J., ER-RAKI, S., HOEDJES, J., HADRIA, R., ABOURIDA, A., CHEGGOUR, A., RAIBI, F., BOUDHAR, A., BENHADJ, I., HANICH, L., BENKADDOUR, A., GUEMOURIA, N., CHEHBOUNI, A.H., LAHROUNI, A., OLIOSSO, A., JACOB, F., WILLIAMS, D.G. & SOBRINO, J.A., 2008. An integrated modelling and remote sensing approach for hydrological study in arid and semi-arid regions: the SUDMED Programme. *International Journal of Remote Sensing*, 29, 5161-5181.
- CONGALTON, R.G. 1991. A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment* 37, 35-46.
- CURRAN, P.J., 2001. Imaging spectrometry for ecological applications. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 305-312.
- DAWSON, T.P. & CURRAN P.J., 1998. A new technique for interpolating the reflectance red edge position. *International Journal of Remote Sensing* 11, 2133-2139.
- FOODY, G.M. & MATHUR, A., 2004. A relative evaluation of multiclass image classification by Support Vector Machines. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 6, 1335-1343.
- FRIEDL, M.A., SULLA-MENASHE, D., TAN, B., SCHNEIDER, A., RAMANKUTTY, N., SIBLEY, A. & HUANG, X., 2006. MODIS Collection 5 global land cover: Algorithm refinements and characterization of new datasets. *Remote Sensing of Environment*, 100, 223-236.
- HORLER, D.N.H., DOCKRAY, M., BARBER, J. & BARRINGER, A.R., 1983. Red edge measurements for remotely sensing plant chlorophyll content. *Advances in Space Research* 3, 273-277.
- MUTANGA, O. & SKIDMORE, A.K., 2007. Red edge shift and biochemical content in grass canopies. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 62, 34-42.
- SANDBAU, S., 2010. Status and trends of small satellite missions for Earth observation. *Acta Astronautica* 66, 1-12.
- VAN DER LINDEN, S. & HOSTERT, P., 2009. The influence of urban surface structures on the accuracy of impervious area maps from airborne hyperspectral data. *Remote Sensing of Environment* 113, 2298-2305.

DESECURE - Satellitengestützte Kriseninformation für Deutschland

MONIKA GÄHLER¹, FELIX STRACKE¹

Zusammenfassung: Mit der weltweiten Zunahme von Naturkatastrophen, humanitären Notsituationen und zivilen Gefahrenlagen steigt auch der Bedarf an zeitnaher, präziser und flächendeckender Lageinformation. DeSecure ist ein Verbundprojekt mit dem Ziel der Verbesserung der Verfügbarkeit satellitengestützter Kriseninformation in Deutschland und geht einher mit dem Ausbau der GMES Aktivitäten auf europäischer Ebene. Der gesamte relevante Produktionszyklus von satellitengestützter Information (Satellitendatenempfang, Prozessierung, Informationsextraktion und -bereitstellung) wurde im Rahmen des Projektes DeSecure analysiert und an entscheidenden Stellen verbessert. Die erreichten Verbesserungen in den Bereichen Datenempfang und Vorverarbeitung der Satellitenbilddaten, der Optimierung der Schnittstellen zwischen den einzelnen Akteuren, der Datenauswertung sowie der Dissemination der Daten über interaktive Kartenanwendungen werden exemplarisch dargestellt.

1 Krisenlageinformationen mit Hilfe von Satellitendaten

Weltweit treten verschiedenste Arten von Naturkatastrophen und vom Menschen verursachte Krisen auf. In Krisen liegen die Herausforderungen insbesondere in der schnellen Bereitstellung der relevanten Information und im Zusammenwirken aller Beteiligten. Somit steigt mit der weltweiten Zunahme von Naturkatastrophen, humanitären Notsituationen und zivilen Gefahrenlagen auch der Bedarf an zeitnaher, präziser und flächendeckender Lageinformation.

Diese aktuellen und umfassenden Informationen können inzwischen zum großen Teil durch Analyse von satellitengestützten Fernerkundungsdaten bereitgestellt werden und wertvolle Informationen im Bereich der Naturkatastrophen-Vorsorge, -Frühwarnung und -Ausbreitung sowie auch zur Schadensabschätzung nach Katastrophen, zur schnellen Übersicht akuter Ereignisse und zum Beobachten von Wiederaufbaumaßnahmen liefern.

Darüber hinaus sind Strukturen und Kapazitäten notwendig, die eine schnelle Aufnahme und verlässliche Aufbereitung der Satellitendaten ermöglichen. Vor diesem Hintergrund hat das DLR das Zentrum für satellitengestützte Kriseninformation (ZKI) als Service des Deutschen Fernerkundungsdatenzentrums (DFD) eingerichtet. Seine Aufgabe ist die schnelle Beschaffung, Aufbereitung und Analyse von Satellitendaten bei Natur- und Umweltkatastrophen, für humanitäre Hilfsaktivitäten und für die zivile Sicherheit (vgl. VOIGT ET AL 2007) sowie die Bereitstellung der extrahierten Krisenlageinformation in aufbereiteten Produkten (vgl. Abb. 1). Die bei den Analysen verwendeten Daten, werden über verschiedene Mechanismen bereitgestellt, z.B. die "International Charter on Space and Major Disasters" oder über den Auf- bzw. Ausbau der GMES (Global Monitoring for Environment and Security)- Aktivitäten auf europäischer Ebene.

Die Entwicklung des ZKI auf deutscher Seite ging einher mit dem Ausbau der GMES (Global Monitoring for Environment and Security)- Aktivitäten auf europäischer Ebene. Um das enorme

¹ Dr. Monika Gähler und Felix Stracke: DLR-DFD, Abteilung Zivile Kriseninformationen und GeoRisiken, Postfach 1116, 82234 Wessling. Email: Vorname.Nachname@dlr.de

Potential der Erdbeobachtung auch zur Unterstützung politischer Entscheidungsträger und Behörden auf europäischer, nationaler, regionaler und lokaler Ebene optimal nutzen zu können, wurde diese gemeinsame Initiative für globale Umwelt- und Sicherheitsbeobachtung (GMES) der Europäischen Kommission und der europäischen Raumfahrtagentur ESA ins Leben gerufen. Nach dem Aufbau der GMES-Kapazitäten bis zum Ende 2011 sollen die GMES Dienste in den operationellen Betrieb sowie eine evolutionäre Weiterentwicklung übergeführt werden. Dies wird zunächst durch GMES Kerndienste für Land, Ozean und Notfallkartierung geschehen.

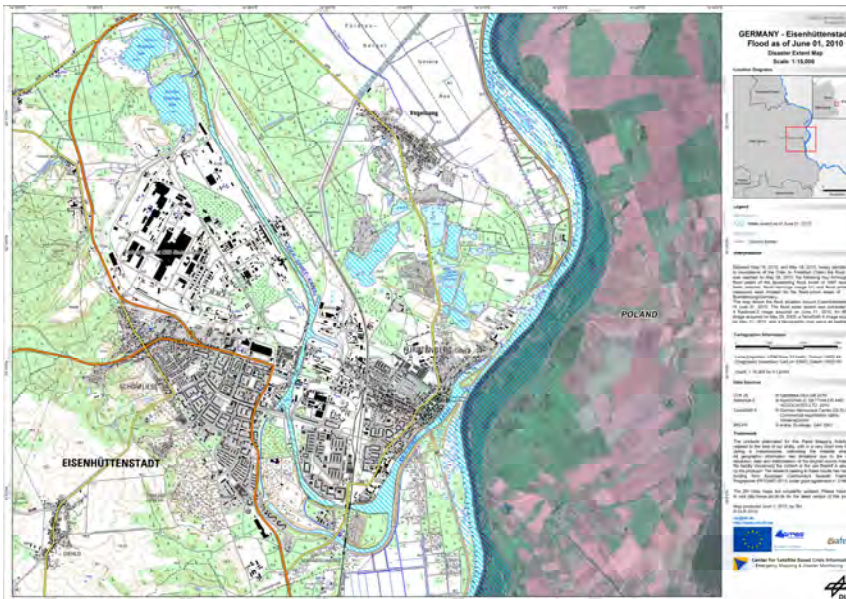


Abb. 1: Karte einer DLR-ZKI Notfallkartierung der Oderflut im Juni 2010

Um die europäischen GMES-Aktivitäten und nationale Kapazitäten in der Informationserzeugung und -bereitstellung besser koppeln zu können, wurden die nationalen Projekte DeCOVER, DeMARINE und DeSecure initiiert. Die Projekte werden über das DLR Raumfahrtmanagement aus dem nationalen Raumfahrtprogramm gefördert.

2 Übergeordnete Ziele und Partner des Verbundprojektes

Insbesondere sollte durch DeSECURE (Laufzeit: Januar 2007 – April 2010) eine schnellere Bereitstellung höherwertiger Produkte an die Nutzer erzielt werden. Hierfür wurden neben einer Nutzeranalyse der gesamte Produktionszyklus – von der Satellitenprogrammierung, dem Empfang und der Datenvorverarbeitung bis hin zur Analyse und Produkterstellung sowie –auslieferung (vgl. Abb. 2) analysiert und an entscheidenden Stellen verbessert. Ein weiteres Ziel lag in der Stärkung der in Deutschland verfügbaren methodisch-technischen Notfallkartierungskapazitäten und Konsolidierung der starken deutschen Position auf europäischer Ebene durch u.a. 1. Prozessoptimierung in existierenden Einrichtungen (,ZKI'- Service des DFD); 2. Ausdehnung und Einrichtung von Kapazitäten in Partner-Institutionen; 3. Weiterentwicklung von Analysemethoden innerhalb des Konsortiums; 4. Optimierung der Schnittstellen zwischen den Partnern aus Forschung & Industrie.

Ein Schwerpunkt von DeSecure war es demnach auch, die deutschen Anforderungen, Bedürfnisse sowie Kapazitäten für den Bereich der satellitengestützten Krisenlageinformation zu identifizieren, zu definieren sowie weiterzuentwickeln und so die deutschen Interessen gebündelt in die GMES – Aktivitäten auf europäischer Ebene einfließen zu lassen. Dabei stand zum Einen die Integration der deutschen Sensoren TerraSar-X und RapidEye in Krisenkartierungen im Fokus. Hierdurch sollten diese Sensoren den deutschen und europäischen Nutzern besser bekannt gemacht werden. Zum Anderen wurden durch Universitäten und Industriepartner technisch operative Analysemethoden geschaffen, die u.a. die Anwendungsentwicklung sowie Vermarktung der Daten und Informationsprodukte, auch über den Krisensektor hinaus, stärken. Die wichtigsten Weiterentwicklungen aus DeSecure werden im Folgenden in Auszügen zusammenfassend dargestellt (vgl. Kapitel 3.1 – 3.5).

Neben dem Deutschen Fernerkundungsdatenzentrum waren das Institut für Methodik der Fernerkundung des DLR sowie die Industriepartner Definiens, GAF, Infoterra, PRO DV und RapidEye sowie die technischen Universitäten Berlin und München beteiligt.

3 DeSecure Ergebnisse

3.1 Nutzerbasis & Nutzeranforderungen

In DESECURE wurden auf bundesdeutscher Ebene die wichtigsten Akteure im Kontext Zivilschutz und ziviler Sicherheit in Deutschland sowie deren jeweilige Betätigungsfelder und Arbeitsweisen erfasst. Diese Informationen über (potentielle) Nutzer im Kontext satellitengestützter Kriseninformation sind für das Verständnis der speziellen Anforderungen an Kriseninformationsprodukte unabdingbar. Die Nutzeranalyse fokussierte dabei insbesondere auf übergeordnete Institutionen, die auf Bundesebene bzw. europäischer Ebene aktiv sind und eng mit den jeweiligen Institutionen der Länder zusammenarbeiten und entsprechende Informationen weitergeben (z.B. Gemeinsames Melde- und Lagezentrum des Bundesamtes für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe (GMLZ) sowie das Monitoring and Information Centre der Europäischen Kommission (MIC)). In diesem Zusammenhang sei darauf hingewiesen, dass DeSecure sich primär mit für Deutschland relevanten Fragestellungen befasste, aber deutsche Nutzer auch bei internationalen Aktivitäten (z.B. Auswärtiges Amt, THW, DRK) unterstützt werden. Des Weiteren wurden (mögliche) Anforderungen von privaten Bedarfsträgern betrachtet. Aus diesen Informa-

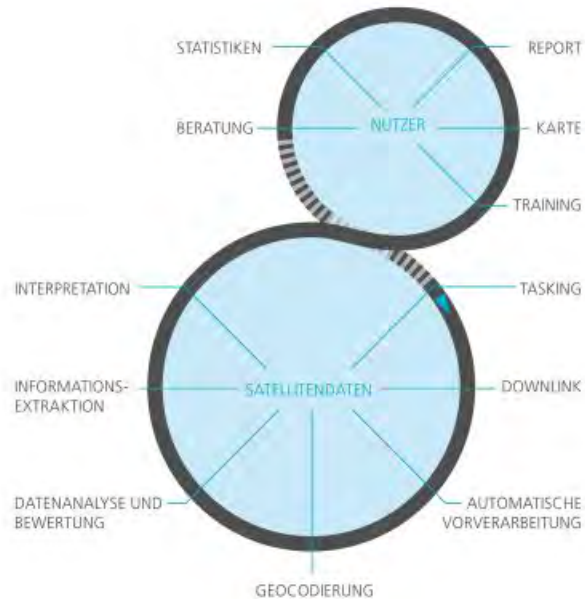


Abb. 2: Arbeitsablauf im Notfallkartierungskontext

tionen konnten allgemeine Anforderungen an die Genauigkeit, die Aktualität und zeitliche Bereitstellung, die Objektivität sowie Anforderungen an Datenformate und Standardisierung der bereitgestellten Produkte für die Verbesserung satellitengestützter Kriseninformation abgeleitet werden.

Als problematisch erwies sich bei der Nutzeranalyse, dass einige Nutzer (noch) nicht in der Lage waren, spezifische Anforderungen an satellitengestützte Kriseninformation zu formulieren, da das Potential von aktuellen Satelliteninformationen noch nicht bekannt genug war. Diejenigen Nutzer, die bereits Erfahrungen mit dieser Art der Information besaßen, formulierten sehr hohe, zum Teil unterschiedliche Ansprüche:

Die Anforderungen der privaten und öffentlichen Bedarfsträger weisen viele Gemeinsamkeiten auf, insbesondere bzgl. der Anwendungsfelder und der Datenakquisition (Erfassungszeitraum, geogr. Ausdehnung, Sensortyp und Sensoreinstellungen), so dass eine verstärkte Zusammenarbeit voraussichtlich deutliche Synergien hervorrufen kann. Unterschiede sind bei den Nutzergruppen sowie den benötigten Auswertzeitpunkte zu verzeichnen.

Für die Nutzer öffentlicher Bedarfsträger ist vor allem die zeitnahe Bereitstellung der gewünschten Information von grundlegender Bedeutung. Übersichtskarten von dem Einsatzgebiet (Referenzkarten) werden vom Nutzer ca. 6 Stunden nach der Anfrage benötigt. Erste Schadensinformationen sollten - je nach Entfernung des Einsatzgebietes - nach ca. 24 bis 36 Stunden zur Verfügung stehen. Selbst wenn eine Lieferung der Informationen in Echtzeit auch mittelfristig nicht erreicht werden kann, ist es von außerordentlicher Bedeutung Liefertermine möglichst präzise zu kommunizieren, damit die Informationen im Arbeitsfluss der Nutzer (z.B. Vorbereitung von Briefings) berücksichtigt werden können. Nutzer privater Bedarfsträger benötigen ebenfalls Schadensinformation, die zeitnah erfasst, jedoch nicht unbedingt zeitnah ausgewertet werden muss. Die Anforderungen an die Genauigkeit (Lagegenauigkeit, inhaltliche/thematische Genauigkeit) ist vom jeweiligen Einsatzziel abhängig.

Die Anforderungen der Nutzer an das Kartenmaterial sind ebenfalls sehr heterogen. Nahezu jeder der berücksichtigten Nutzer hat spezifische Anforderungen an die Kartengestaltung, gültige -maßstäbe und -signaturen. Daher sollten die gelieferten Daten eine gewisse Generizität besitzen und gegebenenfalls mit eigenen Daten verschnitten werden können. Zudem sollte eine individuelle, auf den Nutzer zugeschnittene Visualisierung möglich sein. Die Auslieferung und die Datenformate müssen sich deshalb an internationalen Standards orientieren. Es ist naheliegend sich dabei auf die Standards zu stützen, die durch die Europäische Kommission in der INSPIRE Richtlinie definiert werden. Des Weiteren ist eine Beschreibung der ausgelieferten Daten durch Metadaten unverzichtbar. Diese liefern dem Nutzer standardkonform alle benötigten Informationen für eine korrekte Interpretation der Daten.

3.2 Zeitnahe Satellitendatenbeschaffung und Datenhandhabung

Die krisenrelevanten Prozessierungsketten der deutschen Satelliten RapidEye und TerraSAR-X wurden hinsichtlich der Nah-Echtzeit Bereitstellung von Daten analysiert und optimiert. Hierbei konnten verschiedene technische sowie organisatorische Optimierungsansätze identifiziert und entsprechende Lösungen umgesetzt werden. So wurden für beide Satelliten an den bereitstellenden Institutionen „special order scenarios“ eingeführt, mit denen nun sehr schnell Daten im Krisenkontext geordert und ausgeliefert werden können. Diese neuen Mechanismen wurden bereits

bei einer großen Anzahl von Krisenkartierungen, u.a. in die operationelle Arbeit des ZKI integriert. Darüber hinaus sind seit Sommer 2009 diese deutschen Sensoren Datenlieferant für den derzeitigen prä-operationellen GMES Kerndienst (SAFER) und erweitern somit neben den Aktivitäten des ZKI die deutschen Kapazitäten in der europäischen GMES Initiative.

3.3 Optimierte Vorverarbeitung von Satellitendaten

In DESECURE wurde an der Optimierung der Vorverarbeitung von Satellitendaten in mehreren Bereichen gearbeitet. Ein großer Arbeitsbereich lag in der Optimierung der Orthorektifizierung von optischen sowie SAR Daten. Darüber hinaus wurden Methoden für das Matching von optischen und SAR Satellitendaten sowie eine physikalisch basierte Methode zur räumlichen Verbesserung multispektraler Satellitendaten entwickelt. Bei allen Methodenentwicklungen wurde die Nah-Echtzeit Tauglichkeit, als Grundlage für den Einsatz im Bereich satellitengestützter Kriseninformation, berücksichtigt.

Als Beispiel für die Entwicklungen im Bereich der räumlichen Verbesserung multispektraler Daten sei an dieser Stelle die vom DLR entwickelte RESOLUTION erwähnt (s. Abb. 3). Diese Methode verwendet einen physikalisch-mathematischen Ansatz für die Auflösungsverbesserung, bei dem die Energiebilanz erhalten bleibt. Hierdurch bleibt die Möglichkeit der weiteren Analyse des Ergebnisses mit Methoden der Fernerkundung erhalten.



Abb. 3: Beispiel für das Ergebnis der räumlichen Verbesserung einer multispektralen IKONOS Szene (rechts, 1m räumliche Auflösung) (links: IKONOS Ausschnitt, Mitte links: panchromatischer Kanal mit 1m räumlicher Auflösung, Mitte rechts: multispektrale Kanäle mit 4m räumlicher Auflösung)

3.4 Krisenrelevante Informationsextraktion

Die Weiterentwicklung der (semi-)automatisierten Informationsextraktion aus hochauflösenden Satellitenbildern stellte eines der zentralen Ziele dieses Projektes dar und wurde vor allem vom DLR, Infoterra, RapidEye sowie den Technischen Universitäten Berlin und München bearbeitet. Neben der Entwicklung von operativen Verfahren zur Gewinnung semantischer Information aus Bilddaten mittels semi- und vollautomatischer Extraktionsansätze hat vor allem auch die Förderung der Grundlagenforschung im methodischen Bereich eine hohe Bedeutung. Für umfassende Informationen zu diesen Entwicklungen sei auf das Heft 6, 2010 der PFG verwiesen, welches im Herbst dieses Jahres erscheinen wird. Neben der Adaption, Weiterentwicklung und Effizienzsteigerung bestehender Algorithmen wurden in beträchtlichem Umfang technisch-methodische Neuentwicklungen mit starkem aber nicht ausschließlichem Bezug zu krisenrelevanten Fragestellungen in folgenden Bereichen vorgebracht

- 1) Statistische und trainierte Segmentierungsalgorithmen mit dem Schwerpunkt der Veränderungsdetektion insbesondere zur Flutkartierung
- 2) Objektkategorisierung und Aggregation mittels automatisierter und nutzergestützter Verfahren mit dem Schwerpunkt der Schadensdetektion
- 3) Automatische Lineamentextraktion und Netzbildung mit dem Schwerpunkt der Straßenextraktion

In den Bereichen wurden jeweils mehrere Ansätze verfolgt, aus denen im Folgenden jeweils ein Ergebnis beispielhaft beschrieben wird.

Im Bereich der statistischen und trainierten Segmentierungsalgorithmen mit dem Schwerpunkt der Veränderungsdetektion wurden verschiedene Verfahren u.a. zur segment- und wissensbasierten Klassifikation von Vorher – Nachher Daten, zur objektbasierten Change Detection und Klassifikation entwickelt sowie das Rückstreuverhalten von Siedlungsstrukturen untersucht. Da Krisenlageinformationen zu Hochwasserereignissen zu den meist angefragten satellitenbasierten Kriseninformationsprodukten gehört, wurde hier ein thematischer Fokus bei den Entwicklungen in den genannten Bereichen gesetzt. Sowohl von Industrie- als auch Forschungspartnern wurden Methoden zur operationellen Flutkartierung (weiter-)entwickelt (vgl. Abb. 4). Hierbei wurden sie von der Definiens AG mit professionellem Consulting unterstützt.

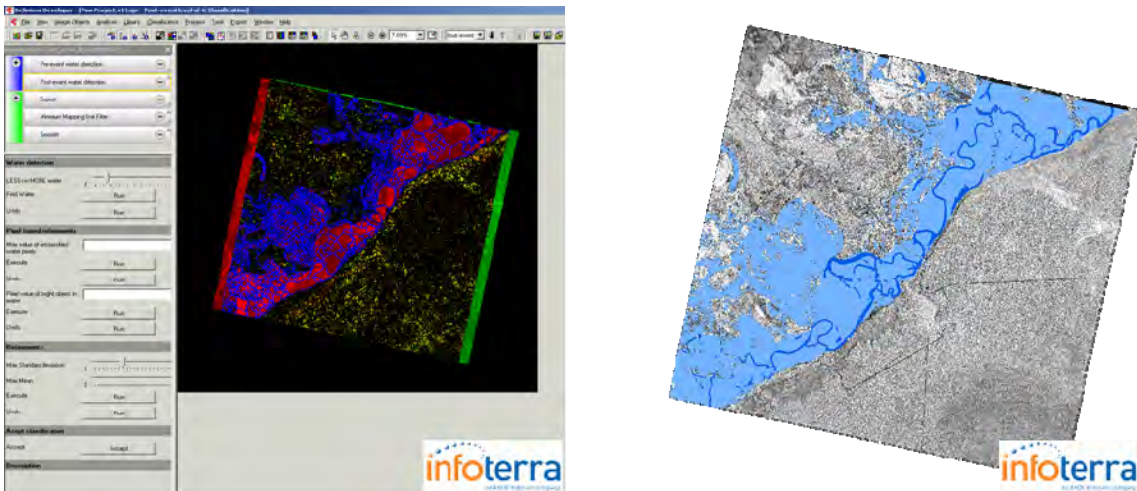


Abb. 4: Screenshots der von Infoterra in Definiens implementierten Module zur Flutkartierung mit Segmentierungsergebnis (links) und das dazugehörige Klassifikationsergebnis (rechts) (Flutkartierung Namibia, Caprivi Region 2009 auf Basis von TerraSAR-X Spotlight Szenen)

Im Bereich der Objektkategorisierung und Aggregation mittels automatisierter und nutzergestützter Verfahren hat das DLR eine Methode zur interaktiven Bildelementeaggregation entwickelt. Diese wird als Basis für eine spätere Entwicklung eines Unterstützungssystems für die schnelle (Vor-) Klassifikation von hochauflösenden optischen Satellitenbildern dienen. Die Methode ermöglicht die schnellen Methoden der Bildverarbeitung mit dem Bildverständnis eines Bildinterpreten für die Analyse hochauflösender optischer Satellitenbilder zu kombinieren. Durch den Aspekt der Interaktivität wird neben einem hohen Maß an Flexibilität auch eine hohe Übertragbarkeit auf Bereiche außerhalb der zivilen Kriseninformation gewährleistet. Das Schema des methodischen Ansatzes ist Abb. 5 zu entnehmen.

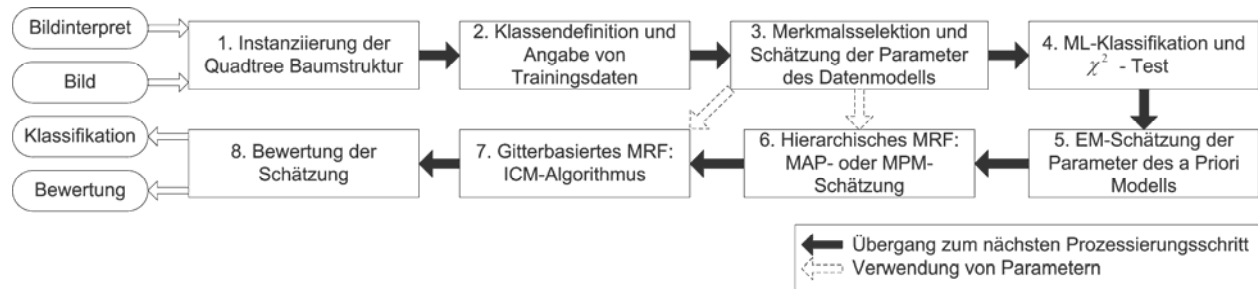


Abb. 5: Schema der Methode zur interaktiven Bildelementeaggregation

Darüber hinaus wurden in diesem Bereich wichtige methodische Entwicklungen im Bereich der generischen Objektmodellierung und automatischen Objektextraktion entwickelt.

Im Kontext der Arbeiten zur automatischen Lineamentextraktion wurde von der TU - München eine Methode entwickelt, die Straßennetze extrahiert und deren Befahrbarkeit auf Basis von hochauflösenden Satellitendaten bewerten kann, z.B. im Falle von Überflutungen in der Caprivi Region in Namibia (Frühjahr 2009), (s. Abb. 6).

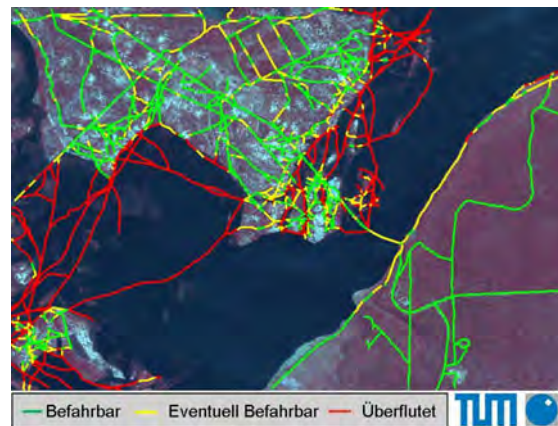


Abb. 6: Strassenextraktion und Befahrbarkeitsanalyse auf Basis SPOT 5, Flut Namibia 2009

3.5 STANDARDISIERTE UND OPTIMIERTE BEREITSTELLUNG VON SATELLITENGESTÜTZTEN KRISENINFORMATIONSPRODUKTEN

Ein weiterer wichtiger Arbeitsbereich von DeSecure lag in der Optimierung und Standardisierung der Bereitstellung von satellitengestützter Kriseninformation. Dies umfasste die Darstellungsoptimierung von Satellitenbildern durch synoptische Visualisierung von optischen und Radardaten, die Standardisierung der Kartenerstellung, die digitale Bereitstellung ziviler Krisenprodukte über interaktive Kartenanwendungen (2D) und sowie Nah-Echtzeit 3D Visualisierungen, die Verfahrensentwicklung für eine Verbesserung der Auffindbarkeit durch Einbindung von Krisenprodukten in Geoportale (z.B. GeoPortal Bund) und die Erstellung von Referenzdaten für Einsätze im Bundesgebiet.

Die digitale Bereitstellung von Krisenlageinformationen über interaktive 2D oder 3D Anwendungen bietet gerade im Krisenkontext einen deutlichen Mehrwert: Während Karten die Information i.d.R. fokussiert präsentieren und bei der Erstellung der Bedarf im Gelände nicht zwingend bekannt ist, bieten interaktive Anwendungen dem Nutzer Möglichkeiten, die dargebotene Information entsprechend der aktuell vorliegenden Anforderungen zu explorieren, zu analysieren, entsprechende Synthesen zu ziehen und die Ergebnisse sich selbst oder anderen zu präsentieren (z.B. mittels print on demand) (MACEACHREN & KRAAK 1997). Diese Flexibilität bei der dynamischen Wissensgenerierung auf Nutzerseite kann für die Planung und / oder Unterstützung von Einsätzen im zivilen Krisenbereich von hoher Bedeutung sein. Die Verwendung von Web Services (WMS, WFS, REST, SOAP) zur Datenbereitstellung für interaktive Anwendungen ist

darüber hinaus die Grundlage für die schnelle Bereitstellung aktualisierter Informationen. Für die Bereitstellung von Krisenlageinformation über interaktive 2D Kartenanwendungen am ZKI, wurde zunächst die Anforderungen potentieller Nutzer sowie des ZKI an interaktive Kartenanwendungen sowie die technischen und personellen Rahmenbedingungen am ZKI analysiert. Auf Basis dieser Analyse erfolgte die Konzeption und Implementierung der Bereitstellung interaktiver Kartenanwendungen in den Prozeß der Notfallkartierungen am ZKI. Die meisten Web Clients (z.B. OpenLayers, Mapbender, ESRI Sample Flex Viewer, etc.) boten zum Zeitpunkt der Analyse bereits die vom Nutzer geforderten Funktionalitäten zur interaktiven Exploration (zoomen, pannen, identify, Ein- Ausblendung von Karteninhalten etc.). Für die Produzenten (ZKI) bestanden folgende Anforderungen: Ein Klient inkl. der Services muss im Kontext einer Notfallkartierung in weniger als 4 Stunden nach Auswertung der Satellitendaten online gehen. Somit muss eine einfache und schnelle Bereitstellung und Konfiguration der Services sowie der Klienten (über CMS DRUPAL) gewährleistet sein. Hierfür ist eine optimale Integration der Konfiguration / Bereitstellung in den bestehen Notfallkartierungsprozess erforderlich.

Auf Basis dieser Analysen wurde eine Lösung entwickelt, die im Wesentlichen auf ESRI Technologie basiert. Die Serviceerstellung erfolgt unter Nutzung von ArcGISServer, der eine sehr schnelle Bereitstellung von Daten als Services innerhalb weniger Mausklicks ermöglicht und verschiedene Schnittstellen (z.B. REST, SOAP, WMS, WFS, WCS, KML) unterstützt sowie nahtlos in den derzeitigen Workflow am ZKI integrierbar ist. Aufgrund der einfachen Konfigurationsmöglichkeiten über xml, der integrierten Funktionalitäten, der einfachen Erweiterbarkeit über das modulare WIDGET Konzept und ästhetischer Aspekte wurde eine angepasste Version des ESRI Sample Flex Viewer als Client ausgewählt (vgl. Abb. 7). Das CMS DRUPAL wurde für eine schnelle und einfache Konfiguration der Klienten erweitert.

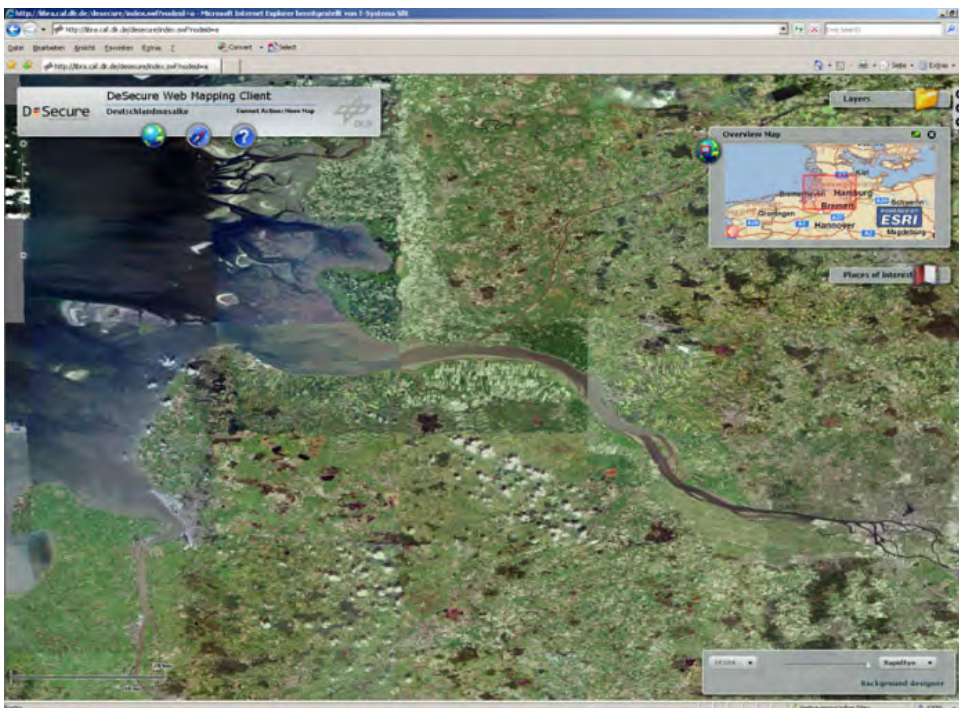


Abb. 7: Interaktive DeSecure Kartenanwendung der Deutschlandmosaik (IRS P6, RapidEye)

Im Vergleich zur im vorherigen Abschnitt dargestellten Lösung, ermöglichen interaktive 3D Nah-Echtzeit Anwendungen einen intuitiveren Zugang zu den dargebotenen Krisenlageinformation sowie erweiterte Möglichkeiten zur Informationsaufbereitung und Exploration. Es wurden verschiedene Softwarelösungen evaluiert, ein Konzept für die Nah-Echtzeit Bereitstellung erstellt und dieses für mehrere Einsatzszenarien beispielhaft implementiert (vgl. Abb. 8). Hierfür existieren erhöhte Anforderungen an die technische Infrastruktur, demnach sind 3D Nah-Echtzeit Szenarien vor allem für den Einsatz in Lagezentren geeignet.

Darüber hinaus wurden Verfahrenswege konzipiert und beispielhaft implementiert, die eine Anbindung der Krisenlageinformation des ZKI an das GeoPortal Bund ermöglichen. Hierfür werden ISO 19139 konforme Metadatensätze semiautomatisch erzeugt, die dann über verschiedene Wege (direktes Einpflegen oder CSW Services) im GeoPortal Bund registriert werden können.

Als Referenzdatensätze für mögliche Kriseneinsätze auf bundesdeutschem Gebiet wurden zwei komplette Deutschlandmosaiken (IRS P6, RapidEye) im Rahmen von DeSecure generiert.

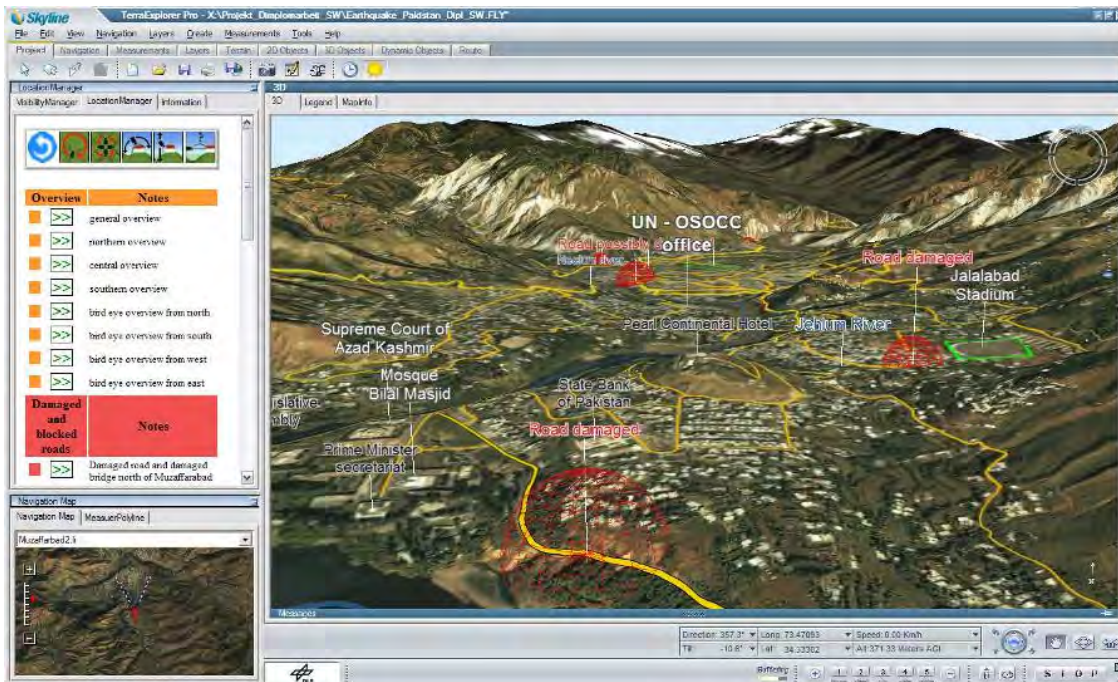


Abb. 8: Interaktives 3D Nah-Echtzeit Szenarios mit Daten des Erdbebens von Pakistan 2008

4 Fazit und Ausblick

Erdbeobachtung kann zunehmend einen wertvollen Beitrag zur Katastrophenvorsorge und zum -management leisten, der sowohl Entscheidungsträgern aber auch vor allem den Einsatzkräften vor Ort zu Gute kommt. Sowohl die räumliche als auch zeitliche Auflösung, insbesondere neuer Sensoren, erfüllen immer mehr die Nutzeranforderungen an eine hohe zeitliche Auflösung und geometrische Genauigkeit von Krisenlageinformation. Entscheidend für eine Nah-Echtzeitfähigkeit ist dabei die Optimierung des gesamten Notfallkartierungsprozesses, von der Aufnahme bis zur Produktbereitstellung. Um satellitengestützte Kriseninformation die Erdbeobachtung zivile und humanitäre Anwendungen unterstützen kann dauerhaft zu institutionalisieren, sind vor

allem auch Strukturen (z.B. Finanzierungs- und Einsatzstrategien) zu entwickeln, die einen derartigen Service gewährleisten können. Im Folgenden sind einige in DeSecure erfolgte Verbesserungen aufgeführt:

- Notfallkartierungsprozess erweitert:
 - Integration von RapidEye und TerraSAR-X-Daten u.a. in den derzeitigen prä-operationellen GMES Kerndienst (SAFER) als Datenanbieter
 - Schnellere Bereitstellung von besseren Kriseninformationsprodukten
 - Erfolgreiche Einbindung einer 3D Explorationskomponente
 - Effiziente Integration der Bereitstellung interaktiver Kartenanwendungen
- Einrichtung von Kapazitäten in Partner-Institutionen sowie schnellere Analysetechniken in existierenden Einrichtungen (DLR- ZKI)
- Festigung des Netzwerkes im Bereich ziviler Kriseninformation in der BRD

Weitere Optimierungspotentiale werden in folgenden Punkten gesehen:

- Operationelle Arbeit erfordert insbesondere im Kontext GMES eine stetige Verbesserung und Anpassung an Methoden, Sensoren, Schnittstellen, Geschwindigkeit und Bedienbarkeit
- Weitere Operationalisierung der entwickelten Methoden (nur teilweise möglich)
- Workflow an Schnittstellen optimierbar
- Erhöhung der Informationstiefe von Notfallkartierungsprodukten u.a. durch die Kombination mit (externen) Geodaten sowie weiteren Informationen
- Erweiterung der Expertise für Produkte und Services für den gesamten Desasterzyklus

5 Literaturverzeichnis

- GÄHLER, M. & HINZ, S. et al. (2010): PFG Sonderheft DeSecure, Heft 6, 2010.
- MAC EACHREN, A. M. & KRAAK, M. J. (1997): Exploratory cartographic visualization: Advancing the agenda. *Computers & Geosciences*, **23** (4): S. 335-343
- VOIGT, S., KEMPER, T., RIEDLINGER, T., KIEFL, R., SCHOLTE, K., MEHL, H., 2007: Satellite image analysis for disaster and crisis-management support. – In: *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **45** (6), S. 1520-1528.

Aufbau und Aktualisierung des Objektbereichs Bodenbedeckung im Digitalen Landschaftsmodell – Status und operationelles Umsetzungskonzept

CHRISTINE RESSL¹, WILFRIED RAIN²

Durch den Zwang zur Kostenreduktion in der öffentlichen Verwaltung werden immer wieder Möglichkeiten gesucht, Datenbestände zu konsolidieren. Im Geoinformationsbereich ist es die Bodenbedeckung, welche historisch gewachsen sowohl im Kataster als auch in topographischen Karten geführt wird. Diese soll zu einer universellen Datenebene zusammengefasst und regelmäßig aktualisiert werden. Aus digitalen Orthophotos werden mittels objektorientierter Bildanalyse Indikatoren generiert, die in unterschiedlichen Plausibilitätsstufen auf mögliche Veränderungen im Altbestand der Bodenbedeckung hinweisen und den Sachbearbeiter in seiner interaktiven Erhebungstätigkeit bestmöglich unterstützen. Neben der Beschleunigung des Gesamtprozesses kommt der Vollständigkeit der Ergebnisse und der Dokumentationsmöglichkeit des Aktualisierungsprozesses im Sinne eines Qualitätsmanagementsystems besondere Bedeutung zu.

1 Einleitung

Durch den Zwang zur Kostenreduktion, aber auch um den aktuellen Ansprüchen und Anforderungen an einen modernen und aktuellen Datenbestand der Bodenbedeckung gerecht zu werden, gibt es im Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen (BEV) schon seit längerem Aktivitäten zu Aufbau und Aktualisierung des Objektbereichs Bodenbedeckung im Digitalen Landschaftsmodell (DLM) (RIES ET AL., 2007). Dadurch wird in Zukunft die historisch gewachsene Führung von Datenbeständen der Bodenbedeckung sowohl im Kataster als auch in den topographischen Karten konsolidiert. Für den neuen Datenbestand soll eine flächendeckende und regelmäßige Aktualisierung sichergestellt werden, welche mit den vorhandenen bzw. tendenziell sinkenden Personalressourcen im BEV bewältigt werden kann. Überdies sind im zukünftigen operationellen Prozess die Anforderungen aus dem Qualitätsmanagementsystem hinsichtlich begleitender Dokumentation und Nachvollziehbarkeit der Arbeitsschritte zu berücksichtigen.

Unter diesen Rahmenbedingungen ist der Einsatz eines automationsunterstützten Prozesses naheliegend. In RIES ET AL. (2007) und STEINNOCHER ET AL. (2007) ist das Prinzip des automationsunterstützten Verfahrens näher beschrieben; im Folgenden wird nur eine kurze Zusammenfassung gegeben und die Erweiterung des Verfahrens um eine Relevanzprüfung zur Optimierung der Indikatorenkarte für mögliche Veränderungen vorgestellt. Der

¹ Christine Ressler: Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen (BEV), Abteilung Fernerkundung, Schiffamtsgasse 1-3, A-1025 Wien, email: christine.ressl@bev.gv.at

² Wilfried Rain: Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen (BEV), ITZ - Informations- und Telearbeitszentrum Hollabrunn, Dechant Pfeifer-Straße 3, A-2020, Hollabrunn, email: wilfried.rain@bev.gv.at

automationsunterstützte Prozess wurde im Vermessungsamt Liezen einer Evaluierung unterzogen, wobei besonders darauf Wert gelegt wurde, die zukünftigen Arbeitsprozesse möglichst realitätsnah zu simulieren. Die Evaluierungsergebnisse werden präsentiert und die abgeleiteten Erkenntnisse und Aspekte für die weitere Entwicklung und Umsetzung des Prozesses für den österreichweiten operationellen Einsatz diskutiert.

2 Automationsunterstütztes Verfahren

Im Wesentlichen lässt sich der zukünftige Arbeitsprozess zu Aufbau und Aktualisierung der Bodenbedeckung in zwei Arbeitsschritte unterteilen, erstens die automatische Ableitung einer Indikatorenkarte für möglichen Veränderungen in der Bodenbedeckung und zweitens die gezielte und interaktive Überarbeitung des bestehenden Datenbestandes der Bodenbedeckung unter Zuhilfenahme der im ersten Schritt erzeugten Indikatoren für Veränderungen.

2.1 Automatische Ableitung der Indikatorenkarte für Veränderungen

Die Grundlage für diesen Schritt (siehe Abb. 1) bilden aktuelle digitale Farb-Orthophotos des BEV mit $25 \times 25 \text{ cm}^2$ Pixelgröße. Mittels objektorientierter Klassifizierung werden die Orthophotos (Abb. 1a) zunächst segmentiert (Abb. 1b) und anschließend klassifiziert (Abb. 1c), wobei die Klassenbildung nur wenige Klassen beinhaltet, die aber auf Basis von Farb-Orthophotos sehr sicher abgeleitet werden können (z.B. baumartige, wiesenartige, graue, helle, blaue, rote Objekte). Dies berücksichtigt die Tatsache, dass die Bodenbedeckungsklassen häufig auch Nutzungsinformationen beinhalten. Aus Orthophotos können daher nicht unmittelbar die Klassen des österreichischen Datenbestandes der Bodenbedeckung generiert werden. So kann ein aus dem Orthophoto sehr sicher abgeleitetes „rotes Objekt“ ein rotes Ziegeldach eines Gebäudes, der rote Belag eines Sportplatzes oder eines Radweges sein. Ziel der Klassifizierung ist es daher, zwar wenige und sehr allgemein gehaltene Klassen, diese aber möglichst sicher abzuleiten.

Danach wird die Klassifizierung aus dem aktuellen Orthophoto dem Altstand der Bodenbedeckung (Abb. 1d) gegenüber gestellt. Mit Hilfe eines Bewertungsschlüssels (Abb. 2) wird jeder auftretenden Kombinationen aus aktueller Klassifizierung und bestehender Bodenbedeckung jeweils eine der Plausibilitätsstufen „identisch“, „plausibel“, „fraglich“ und „unterschiedlich“ zugewiesen. Als Ergebnis erhält man Indikatoren für mögliche Veränderungen (Abb. 1e). Die Plausibilitätsstufen „fraglich“ und „unterschiedlich“ geben Hinweis auf mögliche Veränderungen in der Bodenbedeckung. Diese sind für eine nachfolgende interaktive Überarbeitung vorgesehen.

Man erkennt in Abb. 1e, dass diese Indikatoren für mögliche Veränderungen „pixelgenau“ abgeleitet werden. Das heißt, trifft nur ein einziges als z.B. „wiesenartiges Objekt“ klassifiziertes Pixel auf z.B. eine „Straßenanlage“ im Altstand der Bodenbedeckung, so wird hier der sehr kleinen Verschneidungsfläche gemäß dem Bewertungsschlüssel die Plausibilitätsstufe „unterschiedlich“ zugewiesen (Verdacht, dass Straßenanlage entfernt wurde). Diese kleine Fläche würde auch für die nachfolgende interaktive Bearbeitung vorgemerkt werden. Ebenso entstehen bei bestehenden Gebäuden häufig schmale Säume um das gesamte Gebäude mit Plausibilitätsstufe „unterschiedlich“. Diese Säume entstehen durch den im Orthophoto enthaltenen Bildsturz bzw. dadurch, dass im Orthophoto das gesamte Dach abgebildet wird, und

im Datenbestand der Bodenbedeckung das aufstrebende Mauerwerk von Gebäuden eingetragen ist. Trifft nun die als z.B. „rotes Objekt“ klassifizierte Dachfläche im Bereich des Traufenüberstandes auf die Bodenbedeckungs-Klasse „Baufläche begrünt“, wird dieser Kombination gemäß dem Bewertungsschlüssel die Plausibilitätsstufe „unterschiedlich“ zugewiesen. Es entsteht ein schmaler, das bestehende Gebäude umrandender Saum, der grundsätzlich für die nachfolgende Überarbeitung vorgemerkt wird.

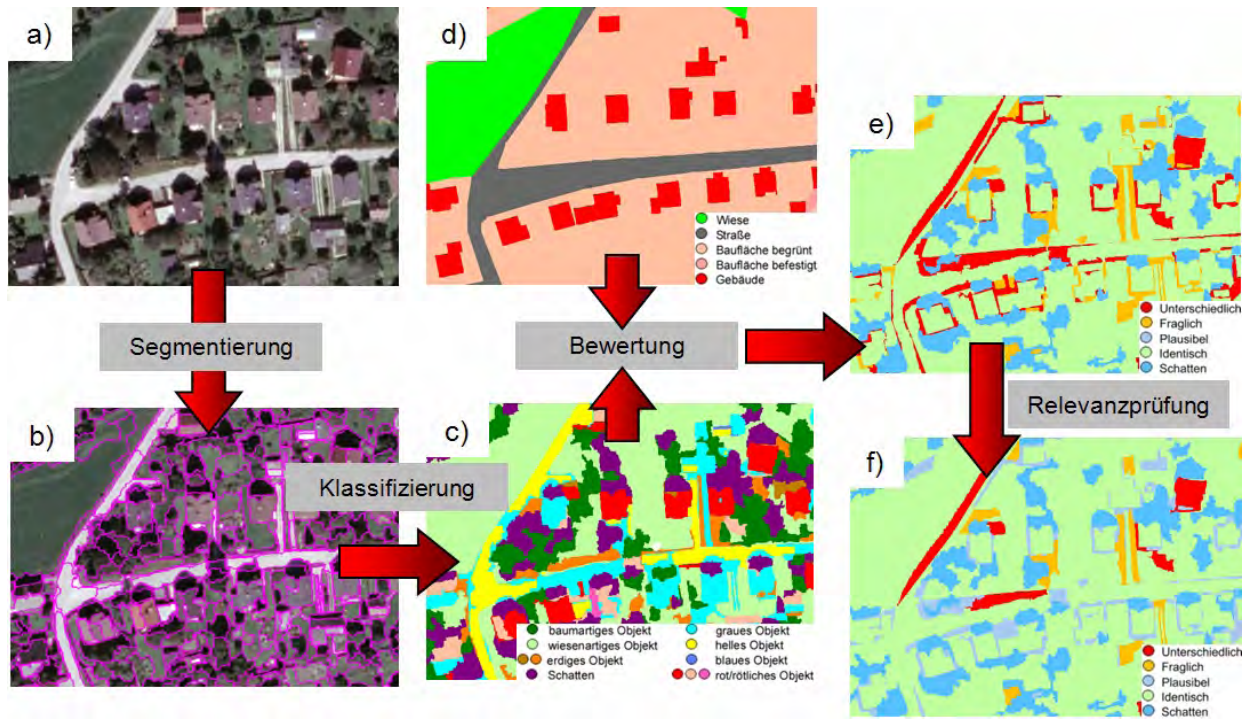


Abb. 1: automatische Ableitung der Indikatorenkarte für Veränderungen: a) Orthophoto, b) Segmentierung, c) Klassifizierung, d) Altstand der Bodenbedeckung, e) ursprüngliche Indikatoren für mögliche Veränderungen, f) Indikatorenkarte für mögliche Veränderungen nach Relevanzprüfung.

Klassifizierung \ bestehende Bodenbedeckung	baum. Objekt	wiesen. Objekt	erdig. Objekt	rotes Objekt	helles Objekt	graues Objekt	Schatten
Gebäude	U	U	U	I	I	I	P
Baufläche begrünt	I	I	I	U	F	F	P
Baufläche befestigt	U	U	U	U	I	I	P
Straßenanlage	U	U	U	U	I	I	P
Erholungsflächen	P	P	P	U	F	F	P
Wiese	F	I	F	U	U	U	P
Wald	I	F	F	U	U	U	P
Gewässer	U	U	U	U	P	P	P

Abb. 2: Bewertungsschlüssel (Auszug)

Es ist leicht einsichtig, dass derartige „Mini-Flächen“ und schmale Säume für die Bearbeitung der Bodenbedeckung keine Relevanz haben. Das Vormerken vieler solcher sehr kleinen oder schmalen Flächen für die interaktive Bearbeitung würde die Effizienz des Verfahrens gefährden.

Daher wurde im Anschluss an die Ableitung der Indikatoren für Veränderungen noch eine Relevanzprüfung eingeführt, bei der auf Basis der für die Bodenbedeckung geltenden Mindestgrößen und Mindestbreiten sehr kleine oder/und schmale Indikatoren für mögliche Veränderungen eliminiert werden.

Man erkennt in Abb. 1f), dass im Vergleich zur Abb. 1e) sehr viele kleine und schmale Flächen, die ursprünglich als mögliche Veränderungen angezeigt wurden, eliminiert werden konnten. Größere und relevante Indikatoren für Veränderungen blieben jedoch erhalten. Die Relevanzprüfung ist ein Optimierungsprozess mit dem Ziel, möglichst viele nicht relevante Indikatoren für mögliche Veränderungen zu eliminieren, ohne aber relevante Indikatoren fälschlicherweise zu verlieren. Aus der fertig abgeleiteten Indikatorenkarte für mögliche Veränderungen (Abb. 1f) werden die Plausibilitätsstufen „fraglich“ und „unterschiedlich“ als Vektordaten extrahiert und den Sachbearbeitern für die nachfolgende interaktive Überarbeitung unterstützend zur Verfügung gestellt.

Der in Abb. 1a-f) dargestellte Prozess läuft bis auf das Bestimmen von Eingangsparametern für die Klassifizierung voll automatisch ab. Mittels Batch-Processing kann hier auch der notwendige Datendurchsatz für große Bearbeitungsgebiete erreicht werden. Der Regelsatz ist durch die Ableitung einiger weniger, allgemeiner Klassen auch sehr robust hinsichtlich neuer Bearbeitungsgebiete. Es sind lediglich die Eingangsparameter für die Klassifizierung auf das jeweilige Bildmaterial anzupassen.

2.2 Gezielte interaktive Überarbeitungen der aufgezeigten möglichen Veränderungen

Während die in Abschnitt 2.1 vorgestellte Generierung der Indikatorenkarte für Veränderungen voll automatisch abläuft, ist die nachfolgende Überarbeitung des bestehenden Datenbestandes der Bodenbedeckung unter Zuhilfenahme der Indikatorenkarte für Veränderungen auch weiterhin als interaktiver Arbeitsschritt geplant. Da die Klassen der Bodenbedeckung in Österreich auch Nutzungsinformationen beinhalten, ist bei deren Aktualisierung häufig die umfassende Interpretationsfähigkeit des Menschen gefordert. Solange diese nicht mit einem für den operationellen Einsatz vertretbaren Aufwand und mit der notwendigen Zuverlässigkeit durch Computerprogramme nachgebildet und folglich automatisiert werden kann, ist das Ziel, diesen interaktiven Bearbeitungsschritt zu optimieren, um die wertvolle menschliche Interpretationsarbeit möglichst effizient zu gestalten.

Durch die Indikatoren für mögliche Veränderungen kann die bisher notwendige flächige und zeitaufwändige Suche nach Veränderungen in der Bodenbedeckung in Zukunft durch eine zielgerichtete Interpretation und Aktualisierung der Bodenbedeckung an den durch die Indikatoren aufgezeigten Bereichen ersetzt werden.

Abb. 3 vermittelt einen Eindruck der Benutzeroberfläche bei der interaktiven Bearbeitung. Die Indikatoren für mögliche Veränderungen werden mit dem Altstand der Bodenbedeckung und dem aktuellen Orthophoto je nach Bedarf gemeinsam visualisiert. An den von den Indikatoren aufgezeigten Stellen prüft der Sachbearbeiter, ob die aufgezeigte mögliche Veränderung richtig ist; wenn nein, wird der Indikator als nicht relevant markiert und verworfen; wenn ja, dann wird nach Möglichkeit mit Hilfe des Orthophotos die Art und Weise der Veränderung interpretiert und die neue aktualisierte Bodenbedeckung in den Datenbestand eingearbeitet. Wenn zwar

erkennbar ist, dass eine Veränderung stattgefunden hat, diese aber aus dem Orthophoto nicht eindeutig interpretierbar ist, kann die betreffende Stelle für eine Feldbegehung vorgemerkt werden.



Abb. 3: Interaktive Bearbeitung mit Unterstützung der Indikatoren für mögliche Veränderungen

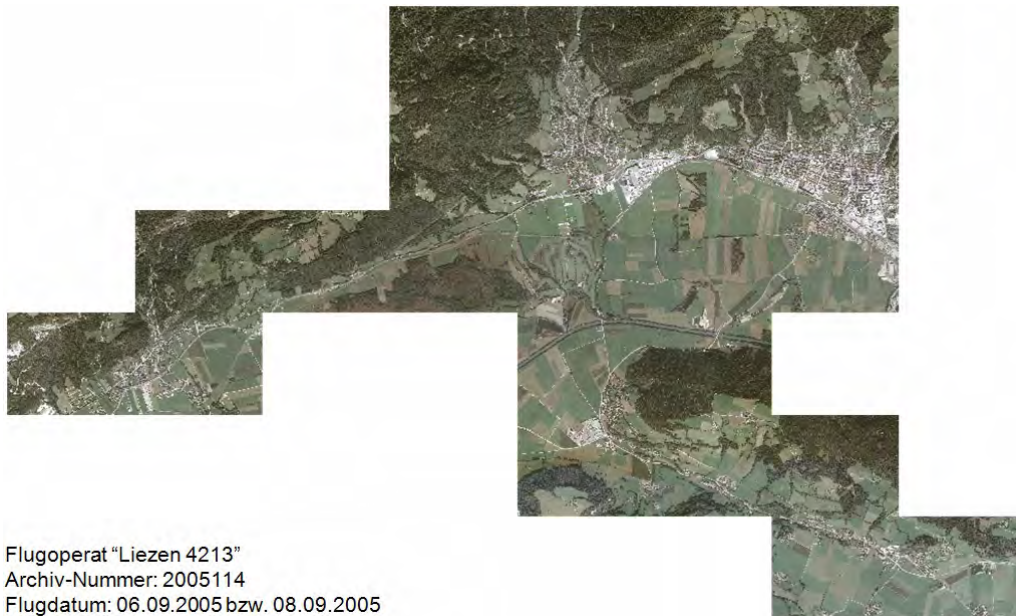
Mit Hilfe der Indikatoren für mögliche Veränderungen und einer noch zu entwickelnden datenbankgestützten und GIS-basierten Benutzerführung kann eine wesentliche Beschleunigung des Aktualisierungsprozesses erreicht werden, was gerade in Hinblick auf kürzer werdende Aktualisierungszyklen wichtig ist. Begleitend kann der Aktualisierungsprozess auch ohne Zusatzaufwand gemäß den Richtlinien eines Qualitätsmanagementsystems dokumentiert werden.

3 Evaluierungsergebnisse „Liezen“

Das in Abschnitt 2 vorgestellte Verfahren wurde für ein größeres Bearbeitungsgebiet im Bereich des Vermessungsamtes Liezen in der Steiermark unter möglichst realitätsnahen operationellen Einsatzbedingungen evaluiert. Das Evaluierungsgebiet umfasst 23 Orthophoto-Mappenblätter des BEV mit einer Gesamtfläche von ca. 28 km² und beinhaltet einen repräsentativen Querschnitt der wichtigsten Klassen der Bodenbedeckung in Österreich. Die Farb-Orthophotos stammen aus einem Bildflug des Jahres 2005, wobei die Luftbilddaten an zwei Tagen im September aufgenommen wurden. Die Auswahl von Daten unterschiedlicher Flugtage diente zur Prüfung der Robustheit des Verfahrens gegenüber den in der Praxis häufig vorkommenden leichten radiometrischen Unterschieden innerhalb des Bildmaterials eines größeren Bearbeitungsgebietes. Abb. 4 zeigt einen Überblick des Evaluierungsgebietes.

Ziel der Evaluierung war eine objektive Beurteilung der zum derzeitigen Stand der Entwicklung des Verfahrens erreichbaren Ergebnisse, um daraus Weichenstellungen für die weitere Entwicklung abzuleiten. In der Abteilung Fernerkundung des BEV wurden die Indikatoren für mögliche Veränderungen generiert. Danach erfolgte im Vermessungsamt Liezen durch erfahrene Sachbearbeiter die Aktualisierung der Bodenbedeckung einerseits unter Zuhilfenahme der Indikatoren für mögliche Veränderungen, wobei die geplante zukünftige Arbeitsweise möglichst realitätsnah simuliert wurde, und andererseits auf herkömmliche Weise mittels flächigem visuellen Vergleich des aktuellen Orthophotos mit dem Altstand der Bodenbedeckung. Das Ergebnis der Evaluierung waren einerseits ein qualitativer Erfahrungsbericht der Sachbearbeiter und andererseits quantitative Angaben, wie viele Veränderungen der Bodenbedeckung durch die automatisch generierten Indikatoren richtig aufgezeigt wurden, wie viele Veränderungen nicht

aufgezeigt wurden und wie viele der Indikatoren fälschlicherweise auf eine mögliche Veränderung hingewiesen haben.



Flugoperat "Liesen 4213"
Archiv-Nummer: 2005114
Flugdatum: 06.09.2005 bzw. 08.09.2005

Abb. 4: Überblick über die Orthophotos des Evaluierungsgebietes

Im Erfahrungsbericht der Sachbearbeiter wurde festgestellt, dass die Treffergenauigkeit der aufgezeigten Indikatoren für mögliche Veränderungen im Großen und Ganzen ein relativ hoch ist. Besonders im Siedlungsgebiet weist das Verfahren aber noch zu viele und zu kleinräumige Flächen als mögliche Veränderungen aus, die sich bei der Bearbeitung als nicht relevant herausstellten. Hinsichtlich Arbeitsumgebung ist für den großflächigen operativen Einsatz eine geeignete edv-technisch unterstützte Benutzerführung unerlässlich (vgl. Abschnitt 2.2). Hinsichtlich des Arbeitsablaufes wurde festgehalten, dass das mittels der Indikatoren gezielte Führen von Bearbeitungsfall zu Bearbeitungsfall die Bearbeitungsgeschwindigkeit merkbar erhöht. Das Wegfallen des flächigen Durchsuchens nach Veränderungen, welches sehr zeitintensiv ist und auch die Aufrechterhaltung einer hohen Bearbeitungs-Konzentration über lange Zeitspannen erfordert, wurde als große Erleichterung empfunden.

Die quantitative Auswertung der Evaluierungsergebnisse konzentrierte sich vor allem auf die richtig aufgezeigten Veränderungen und die nicht aufgezeigten Veränderungen. Tab. 1 stellt die Ergebnisse pro Orthophoto-Mappenblatt (das ist die typische Bearbeitungseinheit der Sachbearbeiter) und zusammengefasst über alle Orthophoto-Mappenblätter dar.

Die Evaluierung hat gezeigt, dass die „Trefferquote“ (also die Prozentzahl der Veränderungen in der Bodenbedeckung, die auch tatsächlich durch die automatisch generierten Indikatoren für mögliche Veränderungen aufgezeigt wurden) in den einzelnen Orthophoto-Mappenblättern zwischen 73 % und 93 % liegt und im Mittel über alle Orthophoto-Mappenblätter etwas mehr als 80% erreicht. Das heißt also auf der anderen Seite, dass ca. 20 % der Veränderungen in der Bodenbedeckung nicht mit dem automatisierten Verfahren aufgedeckt werden konnten.

Orthophoto-Mappenblatt	Änderungen gesamt Anzahl	aufgezeigt Anzahl	nicht aufgezeigt Anzahl	aufgezeigt %	nicht aufgezeigt %
5227-02	62	47	15	76	24
5227-03	99	79	20	80	20
5227-04	54	46	8	85	15
5227-05	108	91	17	84	16
5227-06	81	71	10	88	12
5227-07	203	149	54	73	27
5227-09	147	118	29	80	20
5227-10	255	203	52	80	20
5227-13	98	83	15	85	15
5227-14	88	80	8	91	9
5227-21	158	116	42	73	27
5227-22	233	193	40	83	17
5227-23	119	99	20	83	17
5227-31	224	185	39	83	17
5227-32	139	121	18	87	13
5228-68	36	27	9	75	25
5228-69	78	66	12	85	15
5228-70	15	14	1	93	7
5228-71	90	81	9	90	10
5228-76	23	19	4	83	17
5228-77	263	228	35	87	13
5228-78	108	97	11	90	10
5228-79	293	270	23	92	8
			Mittelwert:	84	16
			Standardabw.:	6	6
Summe über alle Mappenblätter	2974	2483	491	83	17

Änderungen gesamt = in Bodenbedeckung durchgeführte Veränderungen

aufgezeigt / nicht aufgezeigt: Veränderungen, die durch Indikatoren aufgezeigt / nicht aufgezeigt wurden

Anzahl: Absolut-Anzahl pro Orthophoto-Mappenblatt

% ... bezogen auf die Anzahl der „Änderungen gesamt“

Tab. 1: Zusammenstellung der quantitativen Auswertung der Evaluierungsergebnisse.

Diese durch das Verfahren nicht aufgezeigten Veränderungen in der Bodenbedeckung wurden sehr genau geprüft, da diese für die Akzeptanz und den Erfolg des Verfahrens wesentlich sind. Wie schon in Abschnitt 2.2 erwähnt, beinhalten die Klassen der Bodenbedeckung in Österreich auch Nutzungsinformationen (z.B. Baufläche begrünt, Wiese, Alm – um nur einige unterschiedliche Nutzungen einer im Orthophoto als wiesenartiges Objekt erkennbaren Fläche anzuführen). Die Prüfung ergab, dass beim Großteil der durch das automatische Verfahren nicht aufgezeigten Veränderungen eine Änderung in der Nutzung und weniger in der Bodenbedeckung (also z.B.: landwirtschaftlich genutzte Wiese wurde zu Baufläche begrünt) oder eine Gebäudeänderung in versiegeltem Gebiet vorlag. Es ist leicht einsichtig, dass diese Änderungen rein auf Basis eines Orthophotos schwer bis unmöglich automatisch detektierbar sind.

Die Zahl der Indikatoren für Veränderungen, die sich bei der Bearbeitung als nicht relevant herausstellten, wurde nicht exakt erhoben – es wurde lediglich festgestellt, dass die Zahl der „Fehl-Alarme“ besonders in den besiedelten Gebieten noch zu hoch ist. Aufgrund bereits geplanter weiterer Entwicklungen im Verfahren (siehe Abschnitt 4), die eine deutliche Verbesserung bei der Zahl dieser „Fehl-Alarme“ erwarten lassen, wurde dieser Punkt nicht weiter untersucht.

Insgesamt waren die Evaluierungsergebnisse so zufrieden stellend, dass entschieden wurde, das Verfahren für den großflächigen operationellen Einsatz weiter zu entwickeln.

4 Operationelle Aspekte für den großflächigen Einsatz und geplante Verbesserungen des Verfahrens

Die operationelle Umsetzung des Verfahrens für den österreichweiten Einsatz bedingt neben einem robusten und landesweit übertragbaren Workflow auch einen automatisierbaren hohen Durchsatz großer Datenmengen. Die Entwicklung und laufende Adaptierung des Workflows zur automatischen Generierung der Indikatoren für mögliche Veränderungen in der Bodennutzung erfolgt mit dem Softwarepaket *eCognition* der Fa. Definiens (DEFINIENS, 2010). Die Desktopversion *eCognition Developer* bildet dabei die Basis für die Workflow-Entwicklung. Mit Beschaffung der serverseitig skalierbaren Software-Erweiterung *eCognition Server*, sind nun seit Herbst 2009 im BEV die Voraussetzungen gegeben, auch große Datenmengen mittels Batch-Processing und verteilter Rechnerleistung operationell zu bearbeiten (als typische Bearbeitungseinheiten zur Ableitung der Indikatoren für mögliche Veränderungen sind mehrere hundert Orthophoto-Mappenblätter bzw. mehrere hundert km² pro Tag vorgesehen).

Die in der Evaluierung (Abschnitt 3) erreichte „Trefferquote“ von etwas mehr als 80 % ist als sehr gut einzustufen, speziell unter Berücksichtigung der Tatsache, dass als Eingangsdaten aus analogen Luftbildern hergestellte Farb-Orthophotos mit den Kanälen Rot, Grün und Blau verwendet wurden. Es ist geplant, ab dem Flugjahr 2010 Orthophotos aus digitalen Luftbilddaten (Kanäle Rot, Grün Blau und Nahes Infrarot) und weiters Höheninformationen in Form von (normalisierten) Oberflächenmodellen in den Prozess einzuführen. Mit diesen verbesserten Eingangsdaten und erweiterten Möglichkeiten der aktuellen Version von *eCognition Developer* lässt sich eine wesentliche Steigerung der Zuverlässigkeit in der Klassifizierung erwarten. Die Anzahl der bislang nicht aufgezeigten Veränderungen bei Gebäude-Änderungen in versiegelten Bereichen sollten in Zukunft durch die Einbeziehung zusätzlicher Höheninformation reduziert werden können. Auch sollte die Anzahl der derzeit „zu viel aufgezeigten Veränderungen“ in besiedelten Gebieten durch die Einbeziehung von Höheninformation deutlich sinken (bislang werden viele größere Terrassen und sonstige versiegelte Flächen in Gärten mangels Höheninformation als „mögliche Gebäudezuwächse“ einstuft und daher als mögliche Veränderungen aufzeigt). Manche Veränderungen in der Nutzung (z.B. „Streuobstwiese“ ändert sich in „Baufläche begrünt“) werden aber auch weiterhin nicht automatisch zu detektieren sein. In Summe ist aber durch die geplante Einführung der verbesserten Eingangsdaten eine signifikante Verbesserung der „Trefferquote“ zu erwarten.

Bislang mit dem Verfahren noch nicht behandelte „Sonder-Klassen“, wie Weingärten und alpine Bereiche, sind noch entsprechend zu untersuchen und nach Möglichkeit in das Verfahren einzubinden.

Bei der interaktiven Weiterverarbeitung der Indikatoren für mögliche Veränderungen bestätigte die Evaluierung einen wesentlichen Mangel durch die fehlende Benutzerführung für dieses neue Verfahren. Der derzeitige Aktualisierungsprozess erfolgt auf CAD-Basis mit einer intern entwickelten Benutzerschale, die jedoch für die effiziente Einbeziehung der neuen Zusatzinformationen nicht erweitert werden kann. Ein Ziel der weiteren operationellen

Einführung des Verfahrens wird daher sein, eine Benutzerschnittstelle zu entwerfen, die ein systematisches Abarbeiten der aufgezeigten Veränderungen ermöglicht und den Status der Bearbeitung dokumentiert, damit die Vollständigkeit sicher gestellt und auch die Nachvollziehbarkeit im Sinne eines Qualitätsmanagements gewährleistet ist. Geeignete Lösungen können hier am ehesten durch den Einsatz von GIS-Produkten gefunden werden, was aber eine gänzliche Neuordnung der Führung der Bodenbedeckung bedeutet und nicht von der geplanten Einbindung der Indikatoren für mögliche Veränderungen allein abhängt.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die bisherigen Ergebnisse haben das große Rationalisierungspotenzial beim Einsatz automationsunterstützter Verfahren zur Aktualisierung von Bodenbedeckungsklassen bestätigt. Die Verfügbarkeit noch besserer Eingangsdaten und die letzten programmtechnischen Neuerungen stimmen optimistisch, dass die in der Evaluierung erreichte „Trefferquote“ noch weiter verbessert werden kann. Zusammen mit der Umstellung auf datenbankgestützte und GIS-basierte Führungswerkzeuge werden somit die Voraussetzungen geschaffen, einen landesweiten, zeitgemäßen und aktuellen Datenbestandes der Bodenbedeckung als Bestandteil öffentlicher Geobasisdaten bereit zu stellen.

6 Literaturverzeichnis

- FA. DEFINIENS, 2010: FIRMEN-UND PRODUKT-WEBSEITE ZUM SOFTWAREPAKET eCOGNITION, [HTTP://WWW.DEFINIENS.COM/](http://www.definiens.com/), 6.6.2010.
- RIES, CH., FRANZEN, M., STEINNOCHER, K., KRESSLER, F., 2007: Der Österreichische Ansatz für Aufbau und Aktualisierung des Objektbereichs Bodenbedeckung im Digitalen Landschaftsmodell. 27. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF, MuttENZ, Basel; 06-19-2007 - 06-21-2007; in: "*Dreiländertagung; Von der Medizintechnik bis zur Planetenforschung - Photogrammetrie und Fernerkundung für das 21. Jahrhundert*", E. Seyfert (ed.); Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation e.V., Band 16 (2007), ISSN: 0942-2870; S.103-110.
- STEINNOCHER, K., KRESSLER, F., FRANZEN, M. & RIES, C., 2007: Objekt-orientierte Klassifikation von Orthophotos zur Aktualisierung der Digitalen Katastralmappe. Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation (VGI), 95. Jahrgang, 1/2007; S. 3-9.

When remote sensing went alpine – the 10 international HMRSC symposia 1990 - 2008

MANFRED F. BUCHROITHNER¹

Schon immer haben Berge in der Geschichte der Menschheit, sowohl wirtschaftlich als auch kulturell eine wichtige Rolle gespielt.

Durch die wachsende Bedeutung einer nachhaltigen Umweltpolitik und das immer größer werdende Potential von Fernerkundungs- und GIS-Technologien für die Kartierung von Hochgebirgen seit den 1980er Jahren, wurden 1990 die Reihe der internationalen Symposien „High Mountain Remote Sensing Cartography“ (HMRSC) begründet. Darauf folgten in einem Zwei Jahres Intervall neun weitere Symposien, mit mehrtägigen Exkursionen als integrativer Bestandteil.

Bei der Arbeit mit Fernerkundungsdaten in Hochgebirgsregionen entstehen Probleme, deren Lösung unter Anderem zu den Hauptthemen der HMRSC Symposien zählte. Die Verwendung von Fernerkundungsbildern zur Informationsextraktion und deren kartographische Umsetzung wurden angesprochen und diskutiert.

Die erzielten Ergebnisse sind in den HMRSC-Tagungsbänden veröffentlicht.

1 The idea

Mountains, independent of their altitude, have always played an important role in the culture and history of mankind. They are sacred places in all religions of our world, the home of Gods. Moreover, they provide the water supply to more than one-sixth of the global population based on the melt from the mountain glaciers. Against the background of an increasing importance of a sustainable environmental management and the rising potential of remote sensing and GIS techniques for the mapping of high-alpine terrain since the 1980s a series of international symposia on High-Mountain Remote Sensing Cartography (HMRSC) was established in 1990. The very first symposium was held in Schladming, Austria.

The motivation to organise such a reunion of experts arose from the success of a multi-year research project on “High-Mountain Remote Sensing Cartography. The TADAT Research Project in the International Tauern Dachstein “Testsite” funded by the Austrian Research Council FWF (Project P 8048 GEO). The findings of this project are published in a two-volume report of 747 pages total and an executive summary of 13 pages plus two A4 maps and two A3 maps (Buchroithner & Kostka 1994a and 1994b).

Within this project exactly 25 scientists explored the potential of integrative remote sensing using multisensoral approaches for high-mountain cartography. Furthermore, many international contacts, with both western and eastern remote sensing experts were established. This gave reason to bring all those interested in the outcome of the – meanwhile well-known – TADAT Project together at the location of the testsite, in the Austrian mountain town of Schladming in September 1990. An integrative constituent of this symposium were the two scientific excursions, supported by topographic maps and satellite imagery, to the glaciers of the

1) Manfred F. Buchroithner, Institute for Cartography, Dresden University of Technology, Germany;
E-Mail: Manfred.Buchroithner@tu-dresden.de

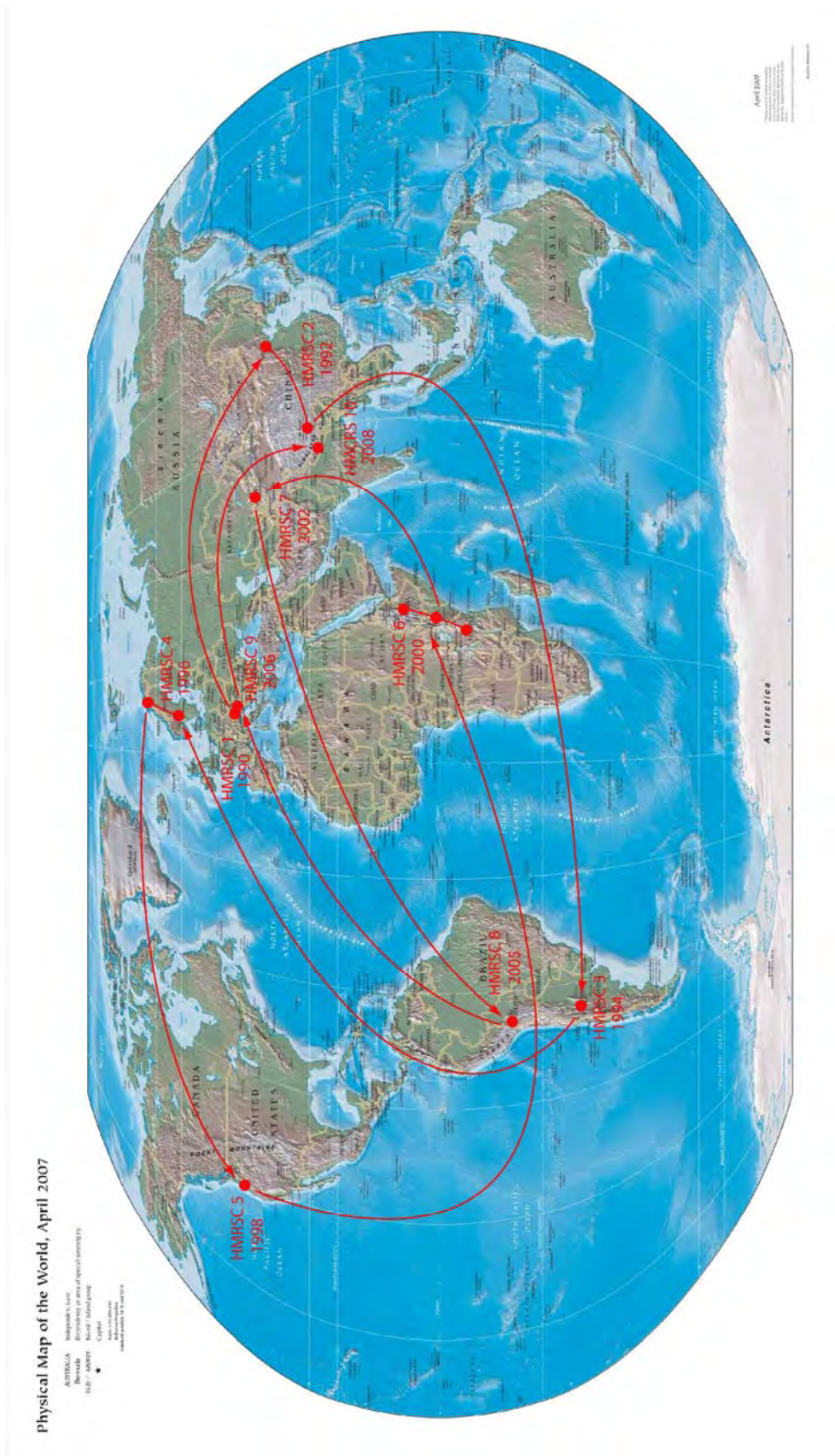


Figure 1: Chronological order of the HMRSC symposia

carboniferous Dachstein Massif in the so-called Northern Alps and the crystalline Schladming Tauern Range in the Central Alps. This well-received – and later much extended - introduction should further on be one of the “trade marks” of the HMRSC symposia (cf. figure 1).

2 1st Symposium on High Mountain Remote Sensing Cartography

The year of birth of satellite-based earth observation for civil applications is 1972. In July of this year NASA launched its first Earth Resources Technology Satellite, ERTS-1, later named Landsat-1. The earth observation satellite SPOT-1, developed by the French, was launched in 1986. Due to the purpose of a sustainable management of the mountain's resources and other applications remote sensing and GIS became techniques whose potential for the mapping of high-alpine terrain was exploited more and more and finally became an important tool for high mountain cartography with the passing of the years. Various drawbacks caused by the high mountain relief, however, significantly hamper the application in handy accessible regions: many geometric and radiometric problems had first to be solved; operational methods of data treatment had to be developed. Therefore, in order to generate a discussion platform for experts dealing with the use of remote sensing data for high mountain cartography a small, workshop-like symposium was announced for autumn 1990. From September 26 to 28, an international group of 35 participants (cf. table 1) gathered in the small town of Schladming, which is located at the foot of the Dachstein massif in Austria.

Two days of interesting and efficient information exchange were followed by a field excursion, which had become an integrative constituent of the following symposia. As it is shown in figure 4, 85% of the subjects of this first symposium were about methodology and only 15% deals with application, especially glaciers and permafrost areas. One important conclusion was that high mountain regions must not only be studied by means of remotely sensed imageries but they must be investigated in situ for gathering ground truth data and field evidence. This idea was implemented in the subsequent biannual nine HMRSC symposia located in various parts of the world (cf. figure 1 and figure 2).

3 The 1990ies

In the 1990ies the second till the fifth symposium were held in Beijing / Lhasa (China), Mendoza (Argentina), Karlstad / Kiruna (Sweden) and Arcata (USA). While participants from Argentina, Austria, Germany and the USA were represented in all gatherings other countries had a various number of representatives depended on the particular location of the symposia. Presented case studies were most time related to the appropriate mountains where the symposium was held. During this period ten satellites were launched (figure 3) which had a high-impacted influence on the development of remote sensing cartography. Via Satellite images, especially Landsat images, receiving information from hardly accessible regions became possible for the first time. This fact is also reflected in the discussed subjects of these symposia. In comparison with the first symposium where the remote sensing technologies were the major subject from 1992 till 1998 the focus switched on data processing and analysis. With the passing

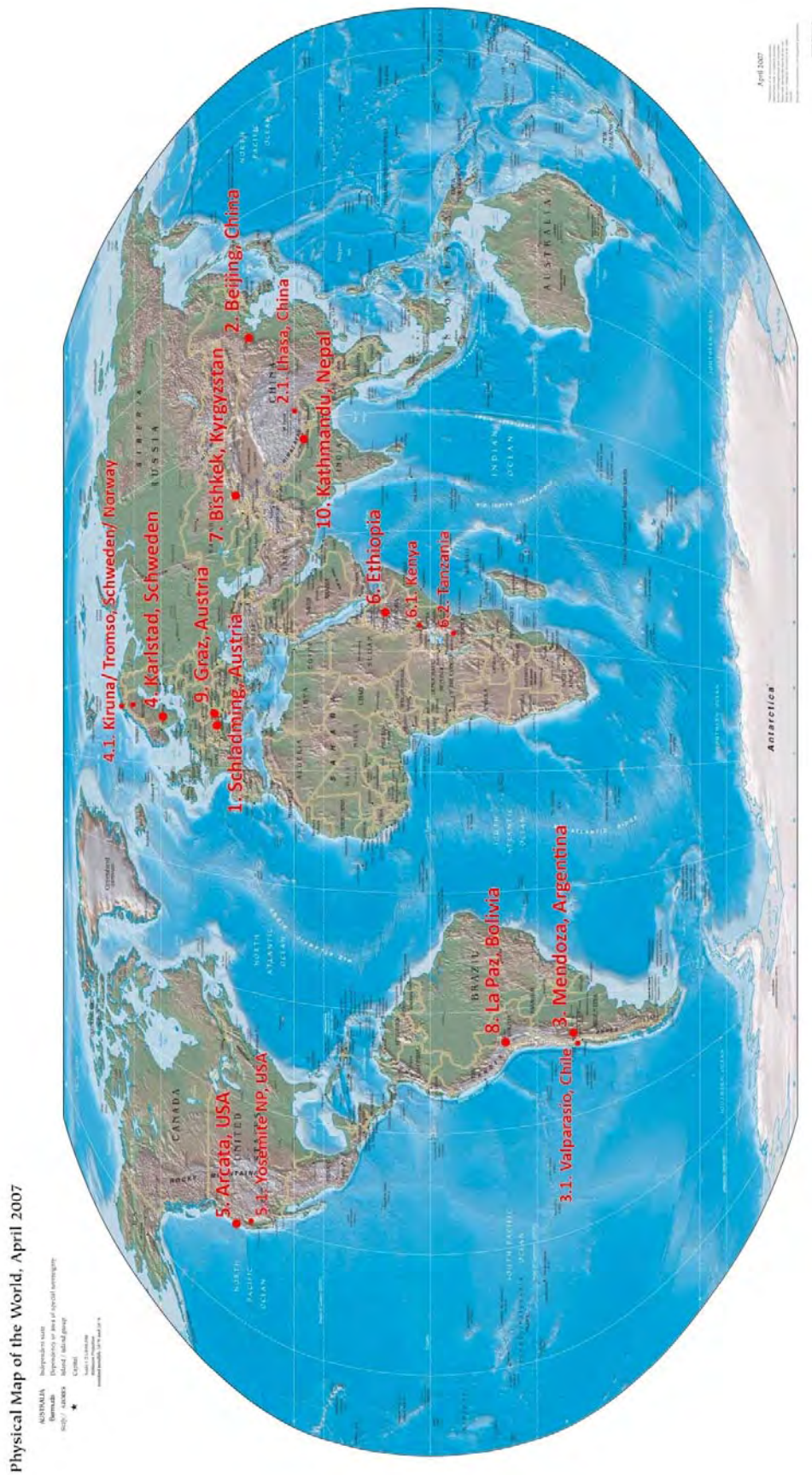


Figure 2: Location of the HMRSC symposia

of the years the application of space-borne remote sensing took on greater significance (cf. figure 5). The increasing number of papers and participants was an evidence for the growing importance of the HMRSC symposia in general. The field excursions after the oral presentations were each time impressive and spectacular events for every participant. After the presentations of the second symposia in Beijing the field excursion started in Lhasa and became an adventure through the Himalaya range due to mountain hazards. Within the third symposium in Argentina the Highlight of the field excursion was the crossing of the Central Andes south of the highest mountain of the Americas, the 6959 m high Mt. Aconcagua, which brought the group to the capital of Chile, Santiago. The field excursion of the fourth symposium led the participants to the northern parts of Scandinavia, north of the polar circle. Moreover, receiving stations of satellite data and research facilities were visited. The final field excursion in the 1990ies was a trip through the different landscapes of Northern California. Every excursion was an opportunity to compare the available images and maps with the ground truth data.

4 The Zeros

As can be seen in Figure 3, in the zeros there were much fewer satellites launched compared to the 1990ies. This decreasing research into methodologies and techniques of High Mountain remote sensing is also reflected in the symposia. Therefore, e.g. at the Sixth symposium these topics only had a share of less than 20%, and applications like tourism all of a sudden scored 40%. The research focuses changed and remain similarly until recent. Moreover, the Sixth symposium on HMRSC set a "milestone" within the HMRSC symposia series, marking 10 years (1990-2000) of fruitful cooperative work in high mountain remote sensing cartography. It was held in three different countries of East Africa. The oral presentations took place in Addis Abbaba, Ethiopia, as well as Nairobi, Kenya, and the following field excursion led the participants to the High Mountains of Kenya and Tanzania. The Seventh Symposium was held in Bishkek, Kyrgyz Republic, a country which is to 94% covered by high-mountain terrain and is thus an ideal venue for meetings of this type. Moreover, with 43 it represents the highest number of papers amongst all symposia. At this occasion the field excursion was a nine-day field-trip to the highest part of the Central Tian Shan. The natural phenomena of global atmospheric warming obviously influenced the subjects of the contributions to the Eighth (La Paz, Bolivia) and Ninth symposium (Graz, Austria). Figure 4 clearly shows that the number of papers dealing with glaciers and permafrost increased and reached a value of 50% and 31% respectively.

Since glacier retreat does not only change the visible appearance of the mountains and their environment, but most importantly, it also affects the supply of water for nutrition, irrigation and hydro-electric power generation, it certainly is a topic of eminent importance. Another highlight of the zeros was the conferment of the "HMRSC Award of Appreciation" in 2006. At the Ninth symposium four people were honoured for their outstanding contributions to the advancements of the ideas of High Mountain Remote Sensing Cartography:

Prof. Dr. Hubertus L. Bloemer, Prof. Dr. Manfred F. Buchroithner, Prof. Dr. Robert Kostka and Prof. Dr. Saturnino Leguizamón were the laureates receiving a laser-engraved glass cube depicting a high-resolution 3D model of the Glockner Group with Austria's highest peak, Großglockner (3798 m) and the largest glacier of the Eastern Alps, Pasterze.

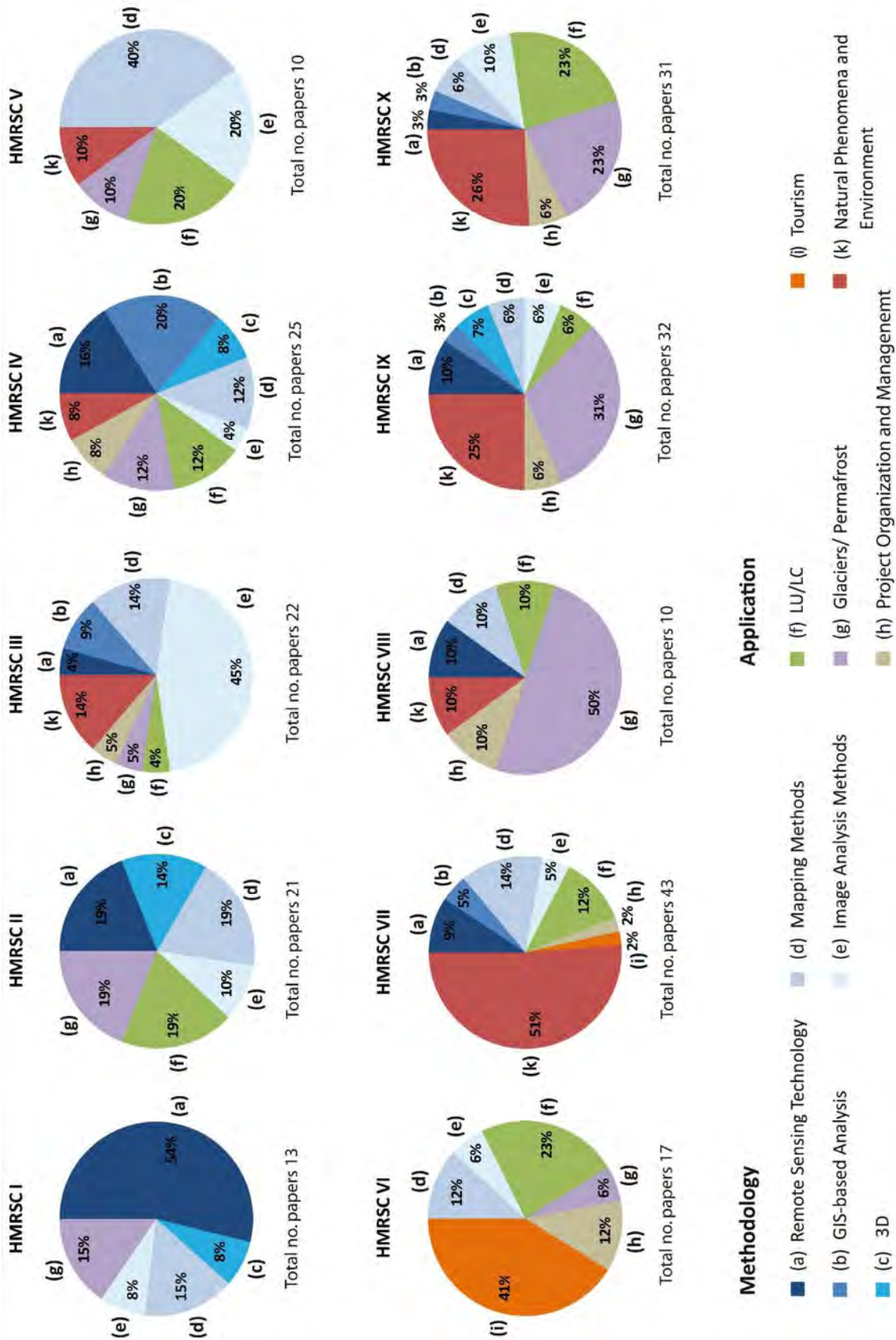


Figure 3: Total and percentage number of the particular HMRSC symposia

After the Tenth Symposium in Kathmandu, Nepal, with excursions to the Tibetan border at Kodari and to Khumbu Himal, the core group of HMRSC under the leadership of Robert Kostka and Manfred Buchroithner decided that the time might be mature to conclude this successful symposium series.

5 Conclusions

Satellite and airborne remote sensing systems are valuable sources of data for studying and monitoring mountain ecosystems around the globe. The problems which have to be overcome when working with remote sensed data in mountainous regions did not change significantly over the last 20 years. Problems concerning geometry and radiometry of remote sensing data, the development of operational methods of data treatment are still relevant nowadays. The general topics addressed in the HMRSC symposia included: application of remotely sensed imagery for information extraction in high mountain areas; cartographic representation of this information in maps and within GIS-based environments as well as application-oriented analysis.

In times when the mastery of remote sensing techniques and data exploration had not yet reached the level of today and the coping with the various geometric and atmospheric problems in high-mountain terrain was still far from being standard, this international series of symposia represented a platform for the exchange of knowhow and skills concerning the methodologies to tackle these problems. Being far from the spreading of symposium series like Pecora, ERIM or IGARSS, the proceedings of these meetings, nevertheless, gained a wide distribution within the pertinent scientific community and beyond.

Until their 10th event in 2008, the HMRSC symposia represented a platform for old and young scientists from all over the world and from various disciplines studying mountain areas by means of remote sensing with a rigid cartographic approach. Their presented results were published in the HMRSC volumes. Volume 10, containing the results of the 10th and last HMRSC symposium in Kathmandu 2008, will be published in summer 2010.

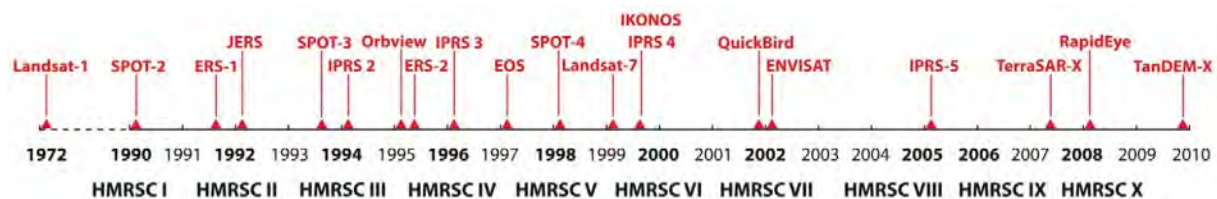


Figure 4: Relation between launched satellites and the HMRSC symposia

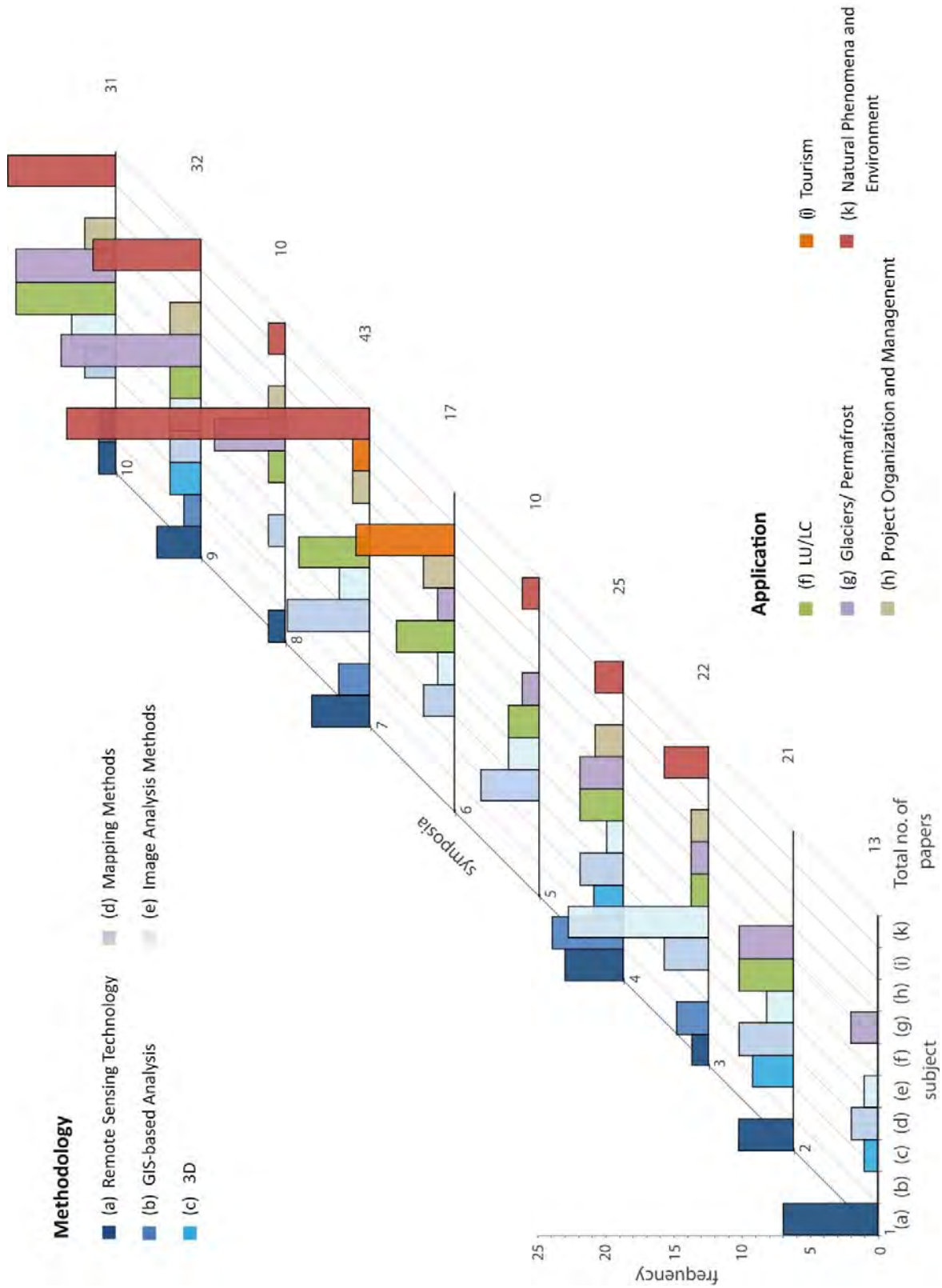


Figure 5: Time line diagram

Country	Symposium									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Argentina	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
Armenia							x			
Australia										x
Austria	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Bolivia				x				x		
Canada									x	x
Chile			x							
China		x		x						
Denmark									x	
Ethiopia						x				
France	x		x	x					x	x
Germany	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
India	x	x								x
Italy	x	x	x	x					x	x
Kyrgyz Republic							x			
Mexico									x	
Nepal	x			x			x		x	x
Netherland										x
Norway									x	x
Pakistan										x
Peru			x							
Romania										x
Russia	x			x			x			
Spain									x	
Sweden		x	x	x		x	x			x
Switzerland									x	
Turkey							x	x		
UK		x		x					x	x
USA	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x

Table 1: Home country of the participants

Acknowledgements

The author wants to express his gratitude to Robert Kostka, Graz, who not only taught him in his very young years the art of terrestrial photogrammetric surveying and plotting but also joined him in setting up the HMRSC symposium Series at a time long before the current hype in high-mountain research. Anne-Kathrin Becker and Christin Abel shall be thanked for their support in preparing the figures and tables as well as the desk-top publishing.

6 References

- BAX, G. (Ed.) 1997: Proceedings of the 4th International Symposium on High Mountain Remote Sensing Cartography, The University of Karlstad Research Report, 261 pp.
- BAX, G. & BUCHROITHNER, M. F. (Eds.) 2002: Proceedings of the 5th International Symposium on High Mountain Remote Sensing Cartography, Karlstad University Studies, 120 pp.
- BUCHROITHNER, M. F. (Ed.) 1996: Proceedings of the 1st International Symposium on High Mountain Remote Sensing Cartography, KB, Technische Universität Dresden, 144 pp.
- BUCHROITHNER, M. F. (Ed.) 2004: Proceedings of the 7th International Symposium on High Mountain Remote Sensing Cartography, KB, ICA, Technische Universität Dresden, 222 pp.
- BUCHROITHNER, M. F. & KOSTKA, R. (Eds.) 1994a: TADAT Endbericht, Volume I+II, total 747 pp.
- BUCHROITHNER, M. F. & KOSTKA, R. (Eds.) 1994b: TADAT Final Report. Executive summary. 13 pp.
- LIU, J. & BUCHROITHNER, M. F. (Eds.) 1993: Proceedings of the 2nd International Symposium on High Mountain Remote Sensing Cartography, Astronautic Publishing House, Beijing, 263 pp.
- KAUFMANN, V. & SULZER, W. (Eds.) 2002: Proceedings of the 6th International Symposium on High Mountain Remote Sensing Cartography, Grazer Schriften, Universität Graz, 195 pp.
- KAUFMANN, V. & SULZER, W. (Eds.) 2006: Proceedings of the 8th International Symposium on High Mountain Remote Sensing Cartography, Grazer Schriften, Universität Graz, 110 pp.
- KAUFMANN, V. & SULZER, W. (Eds.) 2007: Proceedings of the 9th International Symposium on High Mountain Remote Sensing Cartography, Grazer Schriften, Universität Graz, 291 pp.
- KAUFMANN, V. & SULZER, W. (Eds.) 2010: Proceedings of the 10th International Symposium on High Mountain Remote Sensing Cartography, Grazer Schriften, Universität Graz, 246 pp.
- LEGUIZAMÓN, S. (Ed.) 1994: Proceedings of the 3rd International Symposium on High Mountain Remote Sensing Cartography, IIACE, 220 pp.

PDF files available: <http://www.kfunigraz.ac.at/geowww/hmrsc/>

airAGro – Fernerkundungslösung für die Agronomie auf der Basis von Leichtflugzeugen und Minidrohnen

**ANDREAS BARMETTLER¹, STEPHAN NEBIKER¹, CHRISTOPH KOCH², GERHARD KEMPER³,
MARTIN SCHMUTZ⁴, MARKUS PETER⁵**

Zusammenfassung: An den Einsatz von hochauflösenden multispektralen Sensorsystemen in der agronomischen Feldforschung werden hohe Anforderungen gestellt. Zur Untersuchung von diversen Fragestellungen werden wenige Quadratmeter grosse Testfelder oder Reihen mit unterschiedlichen Kulturen angelegt und periodisch beprobt. Mit dem Einsatz neuartiger multispektraler Bildsensoren könnten diese speziellen Anforderungen effizient und kostengünstig abgedeckt werden. In dieser Publikation wird das Forschungsprojekt 'airAGro' mit dem Ziel der Entwicklung und Erprobung einer Prototyp-Fernerkundungslösung auf der Basis eines leichtgewichtigen flugzeuggestützten Fernerkundungssystems vorgestellt, welches vom Institut Vermessung und Geoinformation (IVGI) der Fachhochschule Nordwestschweiz (FHNW) in Zusammenarbeit mit dem Wirtschaftspartner KOPA und den Agronomiepartnern Landwirtschaftliches Zentrum Liebegg und der Abteilung Landwirtschaft des Kantons Aargau zurzeit durchgeführt wird.

1 Einleitung

Die aktuellen Entwicklungen der Miniaturisierung von Flugplattformen und Luftbildsensoren bergen ein grosses Potenzial für die Entwicklung neuartiger leichtgewichtiger luftgestützter Fernerkundungssysteme mit einer sehr hohen räumlichen Auflösung und einem zeitlich und thematisch flexiblen Einsatz. Während die Entwicklung der Drohnentechnologie durch das Militär vorangetrieben wurde und wird (Bento, 2008), holen zivile Entwicklungen rasch auf und finden Anwendung in den verschiedensten Bereichen wie Katastrophenmonitoring, Feuerherderkennung, Pipelineinspektionen, Bauüberwachungen, Echtzeit-Monitoring (Eugster & Nebiker, 2007), Verkehrsüberwachung, Mapping, Kulturgüterschutz (Eisenbeiss, 2004), Filmproduktion und vermehrt im Forst- und Agronomiebereich (Annen et al., 2007).

In der agronomischen Forschung werden der Ertrag von Saatgut und die Wirksamkeit von Herbiziden, Pestiziden, Fungiziden und Düngemitteln auch in Feldversuchen untersucht. Heute werden diese Feldversuche in regelmässigen Abständen durch erfahrene Mitarbeiter mit beträchtlichem Arbeitsaufwand visuell bezüglich Vegetationseigenschaften beurteilt (bonitiert)

¹ Andreas Barmettler, Stephan Nebiker: Fachhochschule Nordwestschweiz, Institut Vermessung und Geoinformation, Gründenstrasse 40, 4132 Muttenz; E-Mail: (andreas.barmettler, stephan.nebiker)@fhnw.ch

² Christoph Koch: KOPA Koch + Partner Gruppe (KOPA), Im Bifang 2, 5080 Laufenburg; E-Mail: christoph.koch@kopa.ch

³ Gerhard Kemper: GGS – Geotechnik Geoinformatik Service, Kämmererstrasse 14, 67346 Speyer; E-Mail: Boden-Umwelt-Kemper@t-online.de

⁴ Martin Schmutz: Landwirtschaftliches Zentrum Liebegg (LZL), 5722 Gränichen; E-Mail: martin.schmutz@ag.ch

⁵ Markus Peter: Abteilung Landwirtschaft (AL), Departement Finanzen und Ressourcen des Kantons Aargau, 5004 Aarau; E-Mail: markus.peter@ag.ch

oder dann die Ertragsmenge nach der Ernte bemessen. Dabei sind Forscher stets auf der Suche nach neuen Verfahren, um die Beurteilung der Feldversuche möglichst objektiv, zuverlässig und ökonomisch vorzunehmen.

Grossflächige Abschätzungen des Chlorophyllgehaltes (grüne Blattfläche) haben eine lange Tradition in der Satellitenfernerkundung (Tucker 1979). Für Feldversuche mit Testplots in einer typischen Grösse von wenigen Quadratmetern reicht jedoch die verfügbare räumliche Auflösung satellitengestützter Systeme nicht aus. Ausserdem ist deren Verfügbarkeit für die Versuchflächen oft ungenügend. Zudem beeinflusst die grosse Distanz zwischen Sensor und Zielfläche das auszuwertende Signal (Atmosphäre / Geometrie). Als mögliche wirtschaftlichere Lösung, da kostengünstiger und flexibler, bieten sich tieffliegende Kleinflugzeuge oder autonome Plattformen wie Mini- oder Mikrodrohnen an. Solche Systeme ermöglichen eine hohe räumliche Auflösung im Subdezimeterbereich, können nach Bedarf eingesetzt werden und garantieren somit einen planbaren und regelmässigen Einsatz.

Es gibt eine Fülle von Publikationen zum Thema der optischen Fernerkundung in der Agronomie mit dem Ziel, Vegetation und Böden mittels ihrer spektralen Reflektion auf deren agronomische und biologische Eigenschaften hin zu untersuchen. Sehr aufschlussreich und nützlich sind die Publikationen (Pinter et al., 2003) zum Thema Fernerkundung im Getreidemanagement und (Dorigo et al., 2007) zur Fernerkundung für Agro-Ökosysteme. Mehrheitlich basieren die für Ernteprognosen verwendeten Methoden auf Reflektanzunterschieden im sichtbaren (VIS) und im nahen Infrarotbereich (NIR). Vegetationsindices, berechnet aus der Differenz, dem Verhältnis oder einer Linearkombination des reflektierten Lichts im VIS- und NIR-Spektralbereich, wie beispielsweise bei (Tucker, 1979) oder (Kurz, 2003), zeigen deutlich das Potenzial dieser Methode auf und werden auch im aktuellen Forschungsprojekt 'airAGro' eingesetzt.

2 Zielsetzung

Aufgrund bisheriger positiver Forschungsergebnisse mit leichtgewichtigen Fernerkundungssensoren auf Minidrohnen des Instituts Vermessung und Geoinformation (IVGI) der Fachhochschule Nordwestschweiz (FHNW) in den letzten fünf Jahren (siehe Brosi (2006), Annen et al. (2007) und Matti (2008)) wurde im Herbst 2009 das Forschungsprojekt 'airAGro' lanciert. Dieses Projekt bezweckt die Entwicklung und Erprobung einer Prototyp-Fernerkundungslösung auf der Basis eines leichtgewichtigen flugzeuggestützten Fernerkundungssystems. Hauptindustriepartner ist die Koch + Partner Gruppe (KOPA) aus Laufenburg, welche die Etablierung eines Dienstleistungsangebots für die luftgestützte Fernerkundung in der Agronomie und verwandten Bereichen anstrebt. Das ebenfalls am Projekt beteiligte Landwirtschaftliche Zentrum Liebegg und die Abteilung Landwirtschaft des Kantons Aargau, erhoffen sich davon eine bessere Früherkennung von gefährlichen Pflanzenkrankheiten sowie eine Effizienzsteigerung und Kosteneinsparung durch einen gezielteren und ökologischeren Einsatz von Dünge- und Pflanzenschutzmitteln. Das Projekt umfasst die Evaluation und Integration geeigneter Multispektral-Sensorkomponenten für ausgewählte Anwendungen in der Agronomie und für den Einsatz auf Leichtflugzeugen – mit der Option für einen zukünftigen Einsatz auf unbemannten Minidrohnen. Parallel dazu werden für die rasche und einfache Prozessierung und Analyse der Multispektral-Luftaufnahmen automatisierte Auswertverfahren konzipiert und implementiert.

In diesem Beitrag wird der aktuelle Zwischenstand des Projekts diskutiert. Genauer wird auf die abgeschlossenen ersten Projektphasen wie der Sensorevaluation und –integration eingegangen. Ausführliche Untersuchungen werden nach Abschluss des Projekts Ende 2010 publiziert.

3 Anwendungsfälle

In einer ersten Projektphase wurden zusammen mit den beteiligten Experten aus den Bereichen Landwirtschaft und Landschaftsökologie eine Reihe potentieller Anwendungsfälle identifiziert und definiert. Diese Anwendungsfälle sollen als Basis für die Sensorevaluation und die Missions- und Auswertepfung dienen und Aufschluss über das Spektrum und das Potenzial zukünftiger wirtschaftlicher Einsatzgebiete geben. Neben der praktischen Relevanz, der benötigten Pixelauflösung am Boden (GSD) und der Ausdehnung der Anwendungsgebiete waren unter anderem die Lokalität für eine rasche ökonomische und kombinierte Befliegung Kriterien für die Auswahl der nachfolgenden Anwendungsfälle, die in der Vegetationsperiode 2010 mit dem Prototypsystem befliegen werden:

- Unkrautlokalisierung im Futterbau (z.B. Blacken)
- Monitoring Ökowieden (z.B. Biodiversität, Schnittrife und -zeitpunkt)
- Bestimmung von Nährstoffversorgung und Bestandesdichten von Wiesen und Kulturen
- Detektion und Kartierung von eingeschleppten Pflanzenarten (invasiven Neophyten)
- Erkennung verschiedener Pflanzenkrankheiten (z.B. Cercospora, Mehltau, Krautfäule, Feuerbrand)



Abb. 1: Versuchsfeld von Weizenkulturen am Landwirtschaftlichen Zentrum Liebegg

4 Das airAGro-System

Für die Erweiterung des bestehenden produktiven Luftbildaufnahme-Systems des Wirtschaftspartners KOPA zum multispektralen airAGro-System mussten diverse Rahmenbedingungen eingehalten und die folgenden Anforderungen erfüllt werden.

4.1 Systemanforderungen

Basierend auf den Erkenntnissen aus den erwähnten Forschungsaktivitäten der vergangenen Jahre und den im Kapitel 3 beschriebenen Anwendungsfällen wurden folgende technisch-wissenschaftliche Anforderungen an das multispektrale System abgeleitet:

- Physische Integration ins bestehende Aufnahmesystem des Wirtschaftspartners einer Mittelformatkamera Rollei 6008P25 mit 25 Megapixel
- Softwaretechnische Integration ins bestehende Flugführungssystem AeroTopoL (Simultanauslösung, Datenaufzeichnung etc.)
- Erzielung einer gleich hohen geometrischen Auflösung am Boden (GSD) wie die bestehende Mittelformatkamera Rollei
- Erweiterung um min. 2 adaptierbare Spektralkanäle (z.B. im NIR-Bereich) mit einer möglichst hohen radiometrischen Empfindlichkeit bzw. möglichst grossen Pixeln ($>7\mu\text{m}$) und möglichst geringen Bildwinkeln / Fokussierung auf zentrale Bildstellen

Neben den technisch-wissenschaftlichen Anforderungen bestand aus wirtschaftlichen Überlegungen eine konkrete Kostenbeschränkung. Somit musste das Kosten-Nutzenverhältnis hoch optimiert werden. Das führte zum Ausschluss einer kostenintensiven vollständigen Eigenentwicklung oder von sehr teuren Spezialsensoren und führte zur bewussten Verwendung von grösstenteils 'low-cost on the shelf'-Komponenten.

4.2 Sensorevaluation

Es wurden multispektrale Systemkonzepte wie z.B. ein Multihead-Sensorsystem, ein System mit Mehrkanal-Kameras (Strahlteiler oder Bayermuster) oder eine Kombination von mehreren Consumer- oder Industrie-Kameras auf die Erfüllung der erwähnten Anforderungen hin geprüft. Der Entscheid fiel für zwei vom 'NIR-Blocker' befreite handelsübliche SLR-Kameras (Nikon D700) mit einem Standard-Objektiv (Brennweite 50mm) bestückt mit unterschiedlichen Dichroitischen Filtern (Bandpassfilter) oder Interferenzfiltern in Kombination mit einem GPS/INS-Positionierungssystem (Septentrio AsteRx1i HDC) mit 2 Eventeingängen. Neben der ökonomisch positiven Begründung der Wahl, werden auch die technisch-wissenschaftlichen Forderungen nach einer hohen Pixelauflösung mit 12.1 Megapixeln, grossen Pixeln mit $8.4\mu\text{m}$ (GSD bis zu 5cm) und einer Verwendung von zentralen Bildstellen mit einem max. Bildwinkel von 50° weitestgehend erfüllt. Da mit den zwei neuen Sensoren nicht der identische Footprint wie mit der bestehenden Rollei erzielt werden kann (Abb. 2), sieht die Auswertestrategie (Kapitel 6.1) vor, dass die Bilddaten anhand der Rollei-Aufnahmen (RGB mit Längsüberlappung min. 60%) orientiert und die Nikon-Bilder (NIR) koregistriert werden.

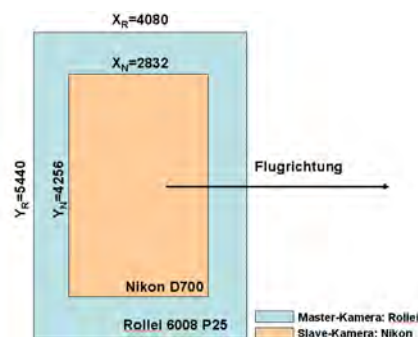


Abb. 2: Überlagerter schematischer Footprint der Rollei (RGB) und Nikon-Kameras (NIR)
Nachteilig wirkt sich die Selektion eines CMOS-Sensors mit einem Bayermuster gegenüber einem monochromen Sensor vor allem auf die spätere Prozessierungskette aus und verlangt nach aufwändigeren Auswerteverfahren.

4.3 Sensorintegration

Wie in den primären Projektanforderungen verlangt, werden die neuen Multispektral-Komponenten in das bestehende produktive Luftbildaufnahme-System der Firma GGS (Büro für Geotechnik, Geoinformatik und Service, Speyer) integriert. Damit liefert das multispektrale airAGro-System Bildaufnahmen in fünf verschiedenen Spektralkanälen mit einer sehr hohen geometrischen Auflösung (GSD bis zu 5cm). Das System besteht hauptsächlich aus drei Kameras, dem Positionierungs- und dem Flugleitsystem.

4.3.1 Integration ins Gesamtsystem (Systemarchitektur)

Die Mittelformat-Digitalkamera Rollei liefert die Bilddaten im sichtbaren Bereich (RGB) und die zwei modifizierten Nikon-Digitalkameras bestückt mit Bandpass- oder Interferenzfiltern die Aufnahmen in ausgewählten Spektralbereichen, insbesondere im NIR, um die verschiedenen Anwendungsfälle flexibel und möglichst optimal abdecken zu können. Das low-end GPS/INS-System (Septentrio AsteRxi, L1-Empfänger), welches über zwei Time Event-Schnittstellen verfügt, gibt die Möglichkeit für eine kostengünstige Gewinnung guter Bildorientierungs-Näherungswerte und für eine allfällige direkte Georeferenzierung bei reduzierten Genauigkeitsanforderungen. Sämtliche Sensorkomponenten sind mit dem Bildflugnavigationssystem (AeroTopoL) des Messflugzeugs (Abb. 4, links) verbunden, was eine synchrone Bildauslösung (Snap-Box) und eine exakte Einhaltung des Bildflugplans ermöglicht.

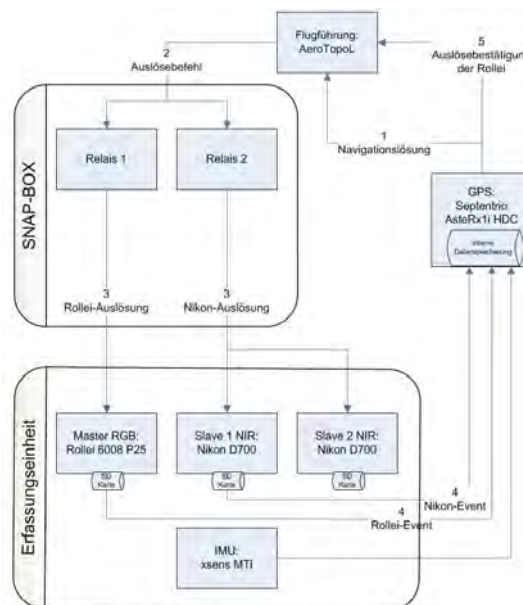


Abb. 3: Schematische Systemarchitektur des airAGro-Systems

4.3.2 Integration in Plattform

Als Trägerplattform für das multispektrale airAGro-System dient ein Leichtflugzeug des Typs Piper Super Cub (Abb. 4, links), welches auf dem Flugplatz Fricktal-Schupfart (Kanton AG) relativ nahe bei den definierten Anwendungsfällen stationiert ist. Die drei Bildsensoren und die Inertialeinheit wurden auf dieselbe geometrisch stabile Leichtmetallplatte fix montiert, damit diese relativ zueinander während der Bildaufnahmen invariant bleiben. Die nachfolgende Grafik

(Abb. 4, rechts) zeigt das im hinteren Teil des Flugzeugs eingebaute Aufnahmesystem mit den einzelnen Komponenten. Optional könnte das System für einen zukünftigen Einsatz auf unbemannten Minidrohnen umgebaut und platzsparender angeordnet werden.



Abb. 4: links: Messflugzeug Piper PA-18 Super Cub
rechts: eingebautes airAGro-Aufnahmesystem

5 Systemkalibrierung

Da das airAGro-System aus mehreren unterschiedlichen Sensorköpfen besteht und für präzise radiometrische und geometrische Messungen eingesetzt werden soll, sind die Systemkalibrierung und die Auswertung der Bilddaten sehr anspruchsvoll. Für die geometrische Kalibrierung wurde in unmittelbarer Nähe des Flugplatzes Fricktal-Schupfart ein Testfeld (Abb. 5) mit 32 hoch genauen Passpunkten über zwei verknüpfte Teilgebiete (Entfernung ca. 1km) mit unterschiedlichen Höhen über Meer signalisiert und mittels GPS-RTK vermessen. Durch die Höhendifferenz der zwei Teilgebiete von rund 150 m können in einem Überflug mit einer konstanten Flughöhe von 800 m.ü.M. Aufnahmen mit unterschiedlichen Pixelgrößen am Boden (GSD) von rund 5 und 10 cm aufgenommen werden.

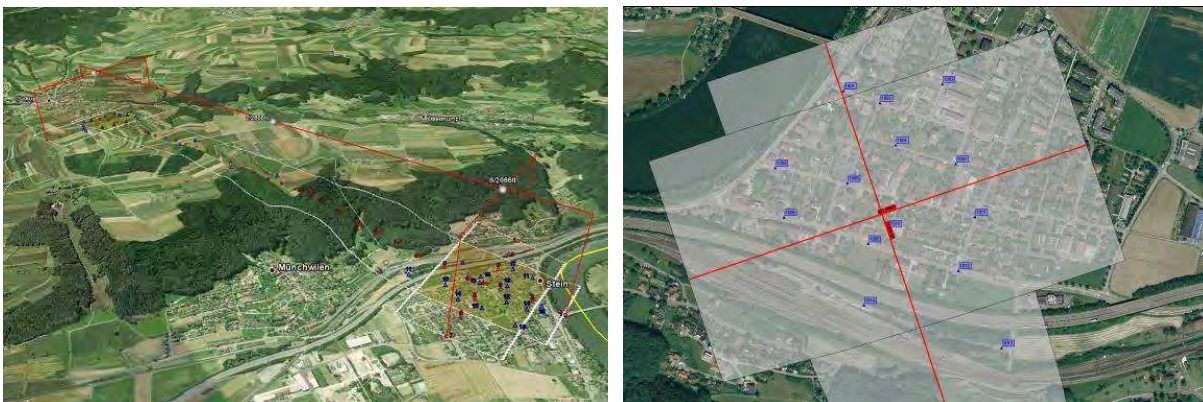


Abb. 5: Testfeld im Raum Stein-Schupfart (Kanton AG) zur geometrischen Kalibrierung des airAGro-Sensorsystems. Links: Schrägansicht in GoogleEarth; rechts: Topansicht des nördlichen Teilgebiets in Stein mit Passpunkten (blau) und Fluglinien (rot).

Für die radiometrische Kalibrierung des airAGro-Systems kommen unter anderem 60 cm grosse mit Bariumsulfat bestrichene Signaltafeln mit nahezu 100% spektraler Reflektanz im VIS/NIR sowie ein Feldspektrometer (HandySpec Field^{VIS}, tec5) zum Einsatz, welches eine exakte Bestimmung der lokalen Reflexionseigenschaften in den verschiedenen Spektralbereichen ermöglicht. Diese Referenzmessungen fliessen in die radiometrische Kalibrierung und in die anschliessende Vegetationszustandsbestimmung ein.

6 Laufende Untersuchungen

Das multispektrale airAGro-System lieferte in den vergangenen Tagen erfolgreich die ersten Bilddaten vom im Kapitel 5 erwähnten Testgebiet. Zurzeit wird das System geometrisch und radiometrisch kalibriert und auf seine Zuverlässigkeit geprüft. Zudem laufen die letzten Vorbereitungen (Flugplanung, Signalisation, Befliegungskoordination etc.) für die Bildflüge der definierten Anwendungsfälle der Anwendungspartner.

6.1 Georeferenzierung und Koregistrierung

Nach der Bilddatenaufnahme und der Aufzeichnung der Bildfluglagedaten sieht die Auswertestrategie vor, dass die Bilddaten wegen der unterschiedlichen Footprints anhand der Rollei-Aufnahmen (RGB mit Längsüberlappung min. 60%) mit Hilfe der Bildorientierungs-Näherungswerte des GPS/INS-Systems und einer Aerotriangulation möglichst automatisiert orientiert werden. Anschliessend werden die radiometrisch korrigierten Nikon-Bilder (NIR) auf die RGB-Bilder koregistriert (ebene Transformation) (Matti, 2008). Schliesslich werden die georeferenzierten und koregistrierten Bilder wenn nötig orthorektifiziert und mosaikiert, um mittels Indices-Berechnungen (Bsp. NDVI) unter allfälligem Einbezug ausgewählter Feldspektrometer-Referenzmessungen zu Aussagen über die aufgenommene Vegetation zu gelangen. Zudem werden Algorithmen und Softwaremodule zur Automatisierung dieser Prozessierungs- und Analyseschritte weiterentwickelt und in interdisziplinärer Zusammenarbeit anhand der verschiedenen Anwendungsfälle getestet.

6.2 Radiometrische Korrekturen

Es wurde in Kauf genommen, dass mit der Verwendung des Bayer-Muster-Sensors zusätzliche potentielle Probleme (radiometrische Unterschiede innerhalb der einzelnen NIR-Bildern) entstehen, welche untersucht und kompensiert werden müssen. Dazu wird in den angelaufenen Untersuchungen das aus den Rohbildern (Bittiefe 12bit) der Nikon-Kameras stammende Bayer-Muster ausgelesen und in vier separate Bilder (rot, grün(2x) und blau) mit gleicher Pixelanzahl aufgeteilt. Anschliessend werden die erforderlichen Korrekturwerte bestimmt, deren Stabilität analysiert und geeignete Kalibrierungs- und Prozessierungsverfahren entwickelt. Ausgehend von früheren erfolgreichen Untersuchungen von Brosi (2006) zum Einsatz von Bayer-Muster-Sensoren für Fernerkundungsaufgaben in der Agronomie ist davon auszugehen, dass die NIR-Bilder erfolgreich korrigiert werden können.

7 Schlussfolgerung und Ausblick

Die Integration des neuen multispektralen Sensorsystems war erfolgreich und das System liefert die erwarteten Bild- und Positionierungsdaten, was für die anstehende erfolgreiche Befliegung der definierten Anwendungsfälle der Agronomie-Projektpartner als ersten Praxistest zuversichtlich stimmt. Ob das System nach Abschluss des Projekts Ende dieses Jahres beim Wirtschaftspartner in unveränderter Konfiguration zum technisch und wirtschaftlich erfolgreichen Einsatz kommen wird, wird sich noch zeigen müssen. Das interdisziplinäre Projekt hat jedoch bereits sehr viele konkrete Ideen für mögliche Anwendungsfälle geliefert. Die laufenden Befliegungen und die anschliessenden Analysen werden zeigen, welche dieser Anwendungsfälle bereits heute oder in naher Zukunft realisierbar sind. Schon jetzt kann gesagt werden, dass die hoch aufgelöste multispektrale Fernerkundung mit Leichtflugzeugen und Minidrohnen ein beträchtliches Potential hat, das weit über die Bereiche Agronomie und Landschaftsökologie hinaus geht und das noch kaum abzuschätzen ist.

8 Dank

Das Forschungsprojekt wird vom Forschungsfonds des Kantons Aargau finanziell unterstützt. Zudem möchten wir uns bei unseren Co-Autoren herzlich für die äusserst angenehme Zusammenarbeit bedanken.

9 Literaturverzeichnis

- ANNEN, A., NEBIKER, S., & OESCH, D. 2007: Einsatz von Mikro- und Minidrohnen für Fernerkundungsaufgaben in der agrochemischen Forschung und Entwicklung. Dreiländertagung der SGPBF, DGPF und OVG: Von der Medizintechnik bis zur Planetenforschung - Photogrammetrie und Fernerkundung für das 21. Jahrhundert, FHNW, Muttenz.
- BENTO, M. D. F., 2008: Unmanned Aerial Vehicles: An Overview. InsideGNSS (January/February 2008), 54-61.
- BROSI, D., 2006: Modellhelikopter gestützte multispektrale Vegetationsklassifizierung. Diploma Thesis, FHNW, Muttenz.
- DORIGO, W., ZURITA-MILLA, R., DE WIT, A., BRAZILE, J., SINGH, R., & SCHAEPMAN, M., 2007: A review on reflective remote sensing and data assimilation techniques for enhanced agroecosystem modeling. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 9(2), 165-193.
- EISENBEISS, H., 2004: A mini unmanned aerial vehicle (UAV): system overview and image acquisition. International Workshop on "Processing and visualization using high-resolution imagery, 18-20.
- EUGSTER, H., & NEBIKER, S., 2007: Geo-Registration of Video Sequences Captured from Mini UAVs - Approaches and Accuracy Assessment. Mobile Mapping Symposium MMT'07, Padova.
- KURZ, F., 2003: Schätzung von Vegetationsparametern aus multispektralen Fernerkundungsdaten. Publikation 115. Technische Universität München, Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften (Reihe C, Heft Nr. 569).

- MATTI, E., 2008: Prozessierung von hochaufgelösten Multispektralaufnahmen in der Agronomie. Bachelor Thesis. FHNW, Muttenz (Karl Kraus Nachwuchsförderpreis 2008).
- NEBIKER, S., ANNEN, A., SCHERRER M., OESCH D., 2008: A light-weight multispectral sensor for micro UAV - opportunities for very high resolution airborne remote sensing. ISPRS'08, Beijing.
- PINTER, P. J., HATFIELD, J. L., SCHEPERS, J. S., BARNES, E. M., MORAN, M. S., DAUGHTRY, C. S. T., ET AL., 2003: Remote sensing for crop management. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 69(6), 647-664.
- TUCKER, C., 1979. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 8(2), 127-150.

Potential and limits of airborne digital sensors ADS40-SH40/SH52 data for the extraction of forest attributes

LARS TORSTEN WASER¹, MEINRAD KÜCHLER² & CHRISTIAN GINZLER³

Zusammenfassung: Die vorliegende Studie präsentiert den aktuellsten Stand von mehrjährigen Arbeiten, die mittels ADS40- Daten (erste und zweite Generation) zur Ableitung von forstlichen Parametern (Gehölzfläche, Baumartenzusammensetzung) im Rahmen des schweizerischen Landesforstinventars und der Erfolgskontrolle Moorbiotope Schweiz durchgeführt wurden. Die hier vorgestellte Methodik wurde bereits in mehreren Untersuchungsgebieten (mit einer Fläche von je 2-8km²) getestet. Als erstes wurde eine Methode entwickelt, die es erlaubt aus Kronenhöhenmodellen und abgeleiteter Bildinformation die Gehölzwahrscheinlichkeiten für verschiedene Untersuchungsgebiete zu bestimmen. Darauf aufbauend wurde ein verfahren zur Baumartenklassifikation entwickelt, welches auf logistischen Regressionsmodellen beruht. Hierzu wurden eine Vielzahl von erklärenden Variablen aus den original-ADS40 Bändern und aus abgeleiteten Produkten (Ratio, IHS, PCA usw.) verwendet. Die Klassifikationsresultate der Gehölzmasken und Baumarten sind sehr vielversprechend (CCR und Kappa 0.6- 0.9), variieren aber je nach Region und verwendetem Bildmaterial. Hervorzuheben sind nicht nur die hervorragenden radiometrischen und spektralen Eigenschaften dieses Luftbildsensors sondern auch die zeitliche Auflösung von 3 Jahren für eine jeweilige Wiederbefliegung der ganzen Schweiz.

1 Introduction

This study shows the potential and limits of airborne digital sensor ADS40 data for forest remote sensing applications in Swiss forests. It was carried out within the framework of the Swiss National Forest Inventory (NFI) (BRÄNDLI 2010) and the Swiss Mire Protection Program (KUECHLER ET AL. 2004). New methods for the extraction of forest attributes from airborne remote sensing data have recently been developed to obtain exact information on the extent of the forests and their composition. This information is needed by many environmental, monitoring or protection tasks. Several studies have integrated multisensoral data to estimate forest attributes such as tree area (WASER ET AL. 2008A) tree height and tree species (CHUBEY ET AL. 2009; HEINZEL ET AL. 2008; ST-ONGE ET AL. 2004; WASER ET AL. 2008B). Recently, the usage of digital sensors has become more popular. The data are either recorded by frame-based sensors, e.g. Z/I DMC (OLOFSSON ET AL. 2006; HOLMGREN ET AL. 2008), Ultracam-X (HIRSCHMUGL ET AL. 2007) or line-scanning sensors, e.g. ADS40 / ADS80, which provide stereo-overlap of up to 90% or entire image strips with higher radiometric resolution. In WASER ET AL. (2010) four different airborne digital sensors (ADS40, DMC, JAS-150 and Ultracam-X) were tested to extract tree area and to classify tree species classification. According to GUISAN ET AL. (2004) modern regression approaches such as generalized linear models (GLMs) have proven particularly useful for modeling the spatial distribution of plant species and communities. KÜCHLER ET AL. (2004) show that spatially explicit predictive modeling of vegetation using

1) Lars T. Waser, Abt. Landressourcen Beurteilung, Eidg. Forschungsanstalt WSL, Zürcherstrasse 111, 8903 Birmensdorf, Schweiz; E-Mail: waser@wsl.ch

2) Meinrad, Küchler, Moorbiotope Schweiz, WSL, E-Mail: meinrad.kuechler@wsl.ch

3) Christian Ginzler, Abt. Landressourcen Beurteilung, WSL; E-Mail: ginzler@wsl.ch

remotely sensed data can be used to construct current vegetation cover using information on the relations between current vegetation structure and various environmental attributes. Thus logistic regression models seem also promising for modeling tree species when analyzing the relationship between categorical dependent variables (e.g. tree species) and explanatory variables derived from remotely sensed data (WASER ET AL. 2008A & 2008B).

The objective of this paper is to present the potential and limits of ADS40 images as input for semi-automated classifications of tree area and tree species in three different regions. Continuity of this approach will be guaranteed since the input data will be available every three years nationwide and both tree / non-tree and tree species classification are based on one single sensor. Preliminary results are very promising for future monitoring, updating and management tasks of a continuous Swiss NFI.

2 Material

2.1 Study areas

Models have been developed and tested for three forest ecosystems in Switzerland. Test site 1 (approx. 47°18' N and 9°14' E) has an extent of approx. 2 km² and is characterized by a varying terrain, mixed land cover and deciduous and coniferous forests. Test site 2 (approx. 46°46' N and 10°16' E) has an extent of approx. 4 km² and includes steep terrain with mostly coniferous mountain forests (see Fig. 1). Test site 3 is characterized by open and closed mixed forests and is located in the Swiss central Plateau (approx. 47°22' N / 8°28' E) and has an extent of approx. 9.6 km².

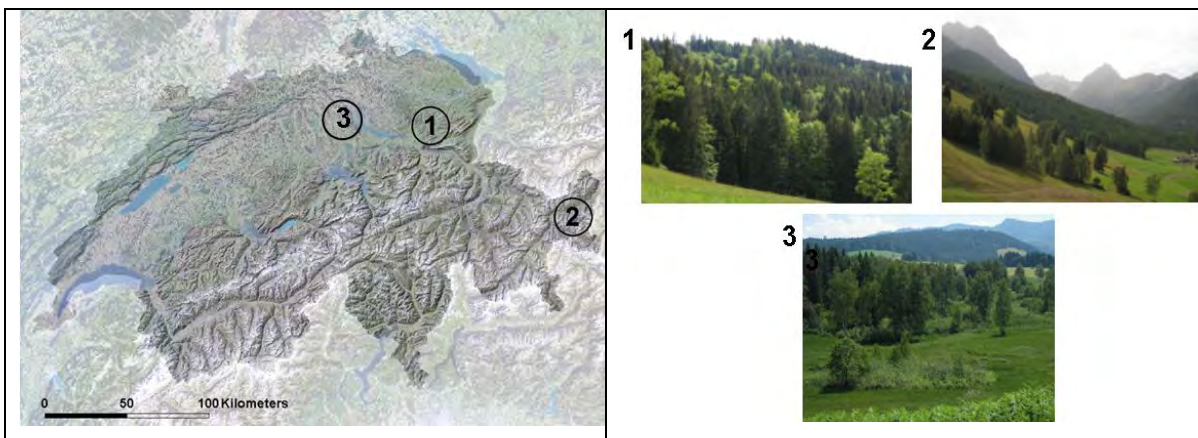


Fig. 1: Study area 1 (PreAlps), study area 2 (central Alps) and study area 3 (central flatlands)

2.2 Ground truth

2.2.1 Tree cover

The ground truth data to validate the tree area of the three study areas consists of 3 x 160 tree crowns and non-tree samples (in open land) which were delineated on the ADS40 orthoimages.

2.2.2 Tree species

The ground truth data to validate the tree species classifications was collected in the natural environment to be representative. The ground surveys were carried out in summer 2007 (study area 1) and 2008 - 2009 (study areas 2 and 3) focusing on the most frequent tree species (at least 5% tree coverage in Switzerland) which were also visible in the aerial images. For a total of 244 (study area 1), 204 (study area 2), and 369 (study area 3) sampled trees we recorded the species (table 1) and delineated in the field the crowns of all visited trees on the corresponding aerial images. This information was used as reference to digitize the corresponding tree crowns on the ADS40 RGB images. Typical examples of tree species of study area 1 as seen in the ADS40 RGB images and in the field are shown in Fig. 2.

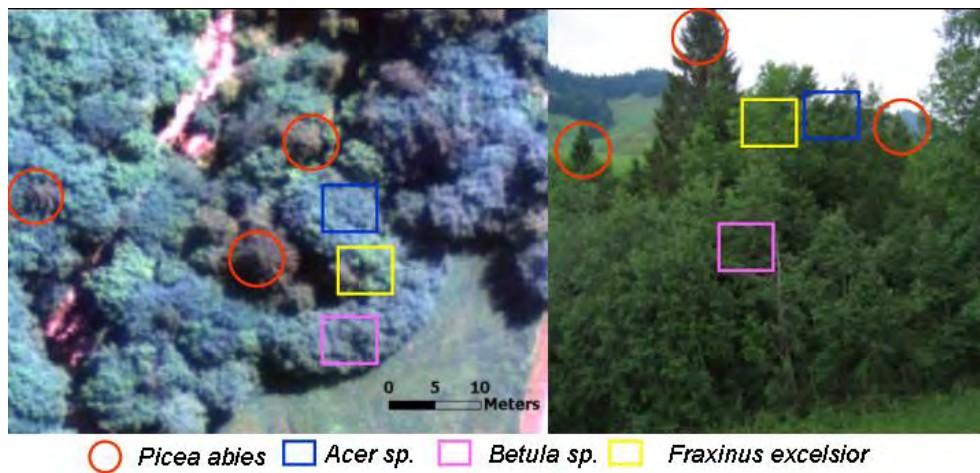


Fig. 2: Typical tree species of test site 1 (PreAlps). Left: ADS40 RGB image, right: photo taken during the field survey in 2008.

Tab. 1: Sampled tree species per study area. Species proportion of tree species is based on estimates by an expert during the field surveys, study areas 2() and 3[] in brackets.

Scientific tree species name	Common tree species name	Number of samples	Species proportion in %	Study area
<i>Acer sp.</i>	maple	38 [40]	5 [<10]	1, 3
<i>Betula sp.</i>	birch	25 (48)	<10 (<10)	1, 2
<i>Fagus sylvatica</i>	beech	46 [48]	20 [10]	1, 3
<i>Fraxinus excelsior</i>	ash	42 [56]	15 [10]	1, 3
<i>Abies alba</i>	white fir	38 [51]	<5 [15]	1, 3
<i>Larix decidua</i>	larch	(55)[57]	(5) [50]	2, 3
<i>Picea abies</i>	Norway spruce	55(59)[55]	15 (10)[25]	1, 2, 3
<i>Pinus sylvestris</i>	Scots pine	(42)[62]	(<5)[30]	2, 3

2.3 Remotely sensed data

2.3.1 Airborne Digital Sensor data

In this study, first generation ADS40-SH40 and second generation ADS40-SH52 images level 1 (Leica Geosystems AG, Switzerland) were used (see table 2); for further details on the sensor see e.g. REULKE ET AL. (2006). One of the main advantages of the ADS40 data is the availability for the area of entire Switzerland every three years. The main drawback of the first-generation ADS40-SH40 is that the NIR line CCD is placed 18° forward from the nadir RGB CCDs which makes it difficult to combine all four lines. The second generation ADS40-SH52 provides the NIR band in the same nadir position as the RGB bands. Digital Surface Models (DSMs) were generated automatically from the above images with a spatial resolution of 0.5 m using modified strategies of NGATE of SOCET SET 5.4.1 (BAE Systems). Prior to the DSM generation, a Wallis filter was applied to enhance contrast, especially in shadow regions, and to equalize radiometrically the images for matching.

Tab. 2: Summary of characteristics of the image data used.

Sensor type	ADS40-SH40	ADS40-SH52	ADS40-SH52
Study area	1	2	3
Acquisition date	08/12/2005	09/02/2008	08/18/2008
Spectral resolution (nm)	Red: 610-660 Green: 535-585 Blue: 430-490	Red: 608-662 Green: 533-587 Blue: 428-492 NIR: 833-887	Red: 608-662 Green: 533-587 Blue: 428-492 NIR: 833-887
Ground pixel size	~25 cm	~50 cm	~25 cm
Orthoimage	25 cm	50 cm	25 cm
Radiometric resolution	11 bit	11 bit	11 bit

2.3.2 Lidar data

National LiDAR digital terrain data (DTM) was used in this study; study area 1: 2003, leaves-on, study area 2: 2003 leaves-on, and study area 3: 2004, leaves-off. The data was acquired by Swissphoto AG / TerraPoint using a TerraPoint ALTMS 2536 system with an average flying height above ground of 1200 m. From the LiDAR data (last pulse), a DTM was generated by the Swiss Federal Office of Topography (SWISSTOPO). The DTM has an average point density of approx. 0.8 points / m² and height accuracy (1 sigma) of 0.5 m (ARTUSO ET AL. 2003).

3 Methods

3.1 Image segmentation

Homogenous image segments of individual tree crowns or tree-clusters are needed to extract tree area and to classify tree species (see below). Both the ADS40-SH40 and ADS40-SH52

orthoimages were therefore subdivided into patches by a multi-resolution segmentation using the Definiens 7.0 software (BAATZ AND SCHÄPE 2000). Segmentation was iteratively optimized using several levels of detail and adapted to shape and compactness parameters. The final segmentation provided groups of trees and individual trees with similar shapes and spectral properties.

3.2 Variables derived from ADS40 data

To extract tree area and classify tree species, several variables (geometric and spectral signatures) were derived from the remote sensing data using standard digital image processing methods as described in GONZALES & WOODS (2002). Details about the extraction of geometric and spectral explanatory variables derived from airborne remote sensing data are described in WASER ET AL. (2007, 2008A & 2008B). A good fit to the given (training) data is not a sufficient condition for good predictive models. To obtain good predictions, a small set of powerful variables has to be selected. Therefore stepwise variable selection (AIC, both directions, AKAIKE 1973) was applied using the defaults of R version 2.9.1. Then the variables were ranked according to their contribution to the models (see 3.3 and 3.4).

3.3 Tree cover

The extraction of the area covered by trees is required for the area-wide mapping of the tree species. Tree cover and non-tree area masks were generated in four steps. First, for each study area a digital canopy height model (CHM) was produced subtracting the LiDAR DTM from the DSMs. In a second step, pixels with CHM values ≥ 3 m were used to extract potential tree areas according to the definition in the Swiss NFI (BRÄNDLI 2010). In a third step, non-tree objects, e.g. buildings, rocks, and artifacts were removed using spectral information from the ADS40-SH40 RGB (low pseudo NDVI pixel values) ADS40-SH52 CIR images (low NDVI pixel values) as well as information (curvature) about the image segments (e.g. segments on buildings have lower curvature values and ranges than trees or large shrubs). These four steps resulted in two canopy covers providing sunlit tree area for each study area. Then, based on these canopy covers for each test site a fractional tree cover was produced using a logistic regression approach (according to e.g. MC CULLAGH & NELDER 1983) with a probability for each pixel to belong to the class “tree”. The step-wise selected explanatory variables consist of four commonly used topographic parameters derived from the CHMs, slope, curvature, and two local neighborhood functions). This approach and the extraction of explanatory variables are described in detail in WASER ET AL. (2007) and WASER ET AL. (2008A). In our case, probability for each pixel belonging to a “tree” ranges between 0 and 1. Image segments with a tree probability of 0.5 or more were assigned to the class “tree”, the others to the class “non-tree”. In order to validate the tree covers, the following statistical measures were used: correct classification rate (*CCR*), user’s accuracy (*UA*), producer’s accuracy (*PA*), and kappa coefficient (*K*).

3.4 Tree species classification

3.4.1 Evaluation of modeling procedures

Image segments representing single trees were to be assigned to classes (species) by predictive modeling. The classes were given by a field sample from the tree species of the study areas as described in table 1. As the response variable has more than two possible states, a multinomial model had to be applied. The logistic regression model is a special case of the generalized linear

model (GLM) and described in e.g. HOSMER AND LEMESHOW (2000). Combination of logistic models was implemented by fitting a binomial logistic regression model to each class (species) separately and assigning the respective segment to the species with the highest probability. For details on the logistic regression function with quadratic terms see e.g. HOSMER AND LEMESHOW (2000). For each tree species a separate stepwise variable selection was performed. For the tree species classification the spectral variables were derived from each of the three images. This includes for each set of variables the mean and standard deviations of: 3 x 3 original bands of ADS40-SH40 RGB and ADS40-SH52 RGB and CIR images and the color transformation from RGB and CIR (only from the 2008 images) to IHS into the 3 channels intensity (I), hue (H), and saturation (S).

3.4.2 Validation

In order to validate the predictions of tree species, the digitized reference tree data (see section 2.2.2) had to be assigned to the corresponding image segments. Since the delineations of the field samples were not always congruent with the automatically generated image segments each of the digitized reference trees per study area was assigned to an image segment using the following rule: If one segment contained more than one digitized field sample, the segment was assigned to the field sample covering the greater part of the segment. If less than 10% of the image segment was covered by the sample polygon, the segment was not assigned at all. The predictive power of the models was verified by a 5-fold cross-validation. The statistical measures used to validate the results were: producer's (*PA*)- and user's accuracy (*UA*), correct classification rate (*CCR*), kappa coefficient (*K*).

4 Results and discussion

4.1 Tree cover

Table 3 presents the correspondence between the digitized tree samples and the modeled tree cover strata.

Tab. 3: Accuracies of the tree covers for the three study areas using the 0.5 stratum

Study area	<i>CCR</i>	<i>K</i>	<i>PA</i>	<i>UA</i>
1	0.923	0.891	0.908	0.915
2	0.876	0.834	0.878	0.865
3	0.958	0.903	0.912	0.954

Table 3 reveals that best accuracies are obtained for study area 3. This is not surprising since for study area 3 the CHM is based on the 0.25 m ADS40-SH52 imagery. Since the tree cover approach is solely based on variables derived from the CHM, the reasons for lower accuracies of study area 2 can be found in the input images which have a coarser spatial resolution of 0.5 m (test sites 1 + 3, 0.25 m) and large shadows, which influence the DSM generation. However, detailed visual stereo-image interpretation reveals few overestimations of the tree cover at forest borders and underestimation of single trees, especially in test site 2 with coarser image resolution and a steep and heterogeneous terrain. Therefore, the usage of a dense and accurate DSM remains an absolute prerequisite in order to be able to derive accurate geometric parameters,

which in turn are used to derive the tree covers. To overcome this problem newly developed high-quality matching methods (BALTSAVIAS ET AL. 2008) will be available for the ADS40 / ADS80 images in near future.

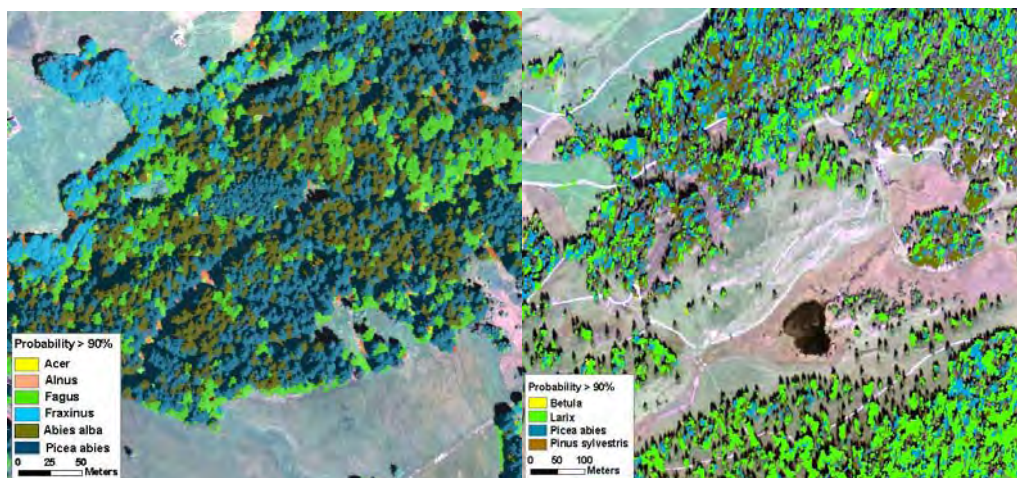
4.2 Tree species classification

The distinction of main tree species was achieved semi-automatically and quite high accuracies were obtained (table 4). The classified main tree species are: *Abies alba* (*Aa*), *Picea abies* (*Pa*), *Pinus sylvestris* (*Ps*), *Larix sp.* (*La*), *Acer sp.* (*Ac*), *Betula decidua.* (*Be*), *Fagus sylvatica.* (*Fs*), *Fraxinus excelsior.* (*Fe*).

Tab. 4: CCR values of the main tree species as obtained by logistic regression. Kappa (*K*) values are the average for all species per study area. -- indicates that the tree species are not present in this study area.

CCR	<i>Aa</i>	<i>Pa</i>	<i>Ps</i>	<i>La</i>	<i>Ac</i>	<i>Be</i>	<i>Fs</i>	<i>Fe</i>	CCR	<i>K</i>
Study area 1 ADS40-SH40	0.75	0.82	---	---	0.23	0.37	0.72	0.77	0.61	0.53
Study area 2 ADS40-SH52	---	0.52	0.78	0.89	---	0.70	---	---	0.74	0.65
Study area 3 ADS40-SH52	0.86	0.86	0.76	0.85	0.34	---	0.74	0.82	0.75	0.67

Generally, coniferous trees were classified with high accuracies for all study areas with the exception of *Picea abies* in study area 2. Dominant deciduous trees were > 70% correctly classified. Table 4 reveals that our model failed to distinguish further deciduous trees with equal quality (*Acer sp.* and *Betula sp.* in study area 1 and *Acer sp.* in study area 3). Visual image inspection revealed that they are often grouped and have smaller crowns and are therefore partly covered from each other or from other more dominant species. Analysis of the spectral values reveal also very similar spectral properties. The tree species which have been modeled with > 90 % probability in study areas 1 - 3 are depicted in Fig. 3. Generally, a visual image analysis suggests that the agreements in most study areas are good. However, a more detailed image inspection indicates that in study area 1 *Acer sp.* and *Betula decidua.* is often misclassified as *Fagus sylvatica* or *Fraxinus excelsior.* In study area 2, a slight underestimation of *Picea abies* in favour of *Larix decidua* in the lower right part is visible. In study area 3, *Acer sp.* is often misclassified as *Fagus sylvatica* or *Fraxinus excelsior.*



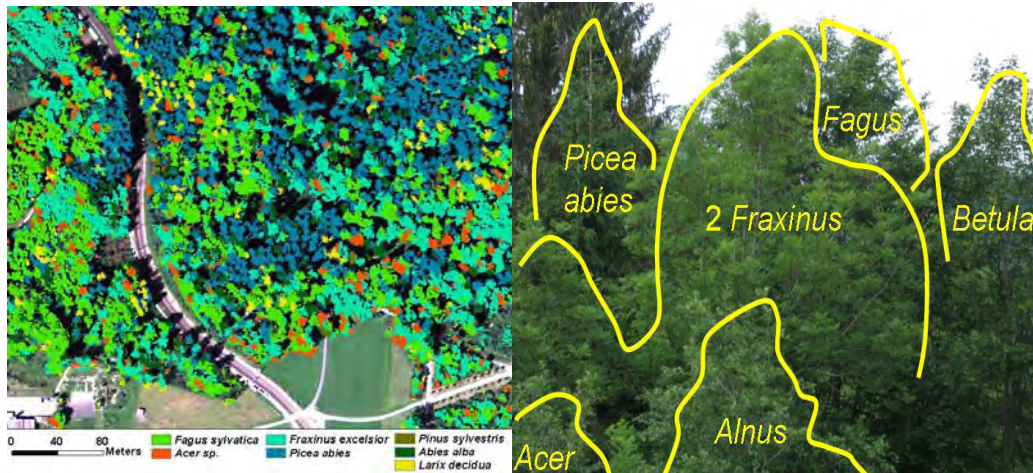


Fig. 3: Tree species classification maps for study area 1 (top left), study area 2 (top right) and study area 3 (bottom left). Bottom right: illustrates the problems involved in identifying the small and non-dominant deciduous trees *Acer sp.* and *Betula decidua* in study area 1.

Overall, the species accuracies obtained in this study are in the line or higher with those in similar studies. Our best result with an overall accuracy of 75% for seven tree species is higher to those obtained in other studies. Overall accuracies between 75% (based on CIR aerial images, BRANDTBERG 2002) and 89% (based on DMC camera, OLOFSSON ET AL. 2006) are obtained in most studies to classify Norway spruce, Scots pine, birch or aspen. CHUBEY ET AL. (2009) classified 4-6 coniferous and 4-6 deciduous species in Canadian forests with an overall accuracy around 70%.

5 Conclusions

The most significant achievement is the demonstration that multispectral ADS40 imagery with logistic regression models proved to have a high potential to for meaningful tree / non-tree and tree species classifications with a minimum amount of effort involved in image acquisition, data pre-processing, derivation of explanatory variables and field work. Promising classification results for 4-7 different tree species were confirmed with ground information and what can be seen visually on the imagery. Furthermore, the classifications based on second generation ADS40-SH52 (including the NIR band) is superior to the first generation ADS40-SH40. Continuity of this approach is guaranteed since the necessary input data (ADS40-SH52 / ADS80 imagery) is collected every three years nationwide by the Federal Geo-Information center (SWISSTOPO) and the extraction of tree covers and classification of tree species will be based on the same sensors. Therefore, the experiences made in this study are of great practical interest since many tasks necessary for the Swiss National Forest Inventory (e.g. support for stereo-interpretation of sample plots) and the Swiss Mire Monitoring Program (e.g. assessment of growth influence of certain tree species on mires). Further work is needed to improve distinguishing non-dominant, small and covered tree species. This should also include multi-temporal imagery for a better distinction of deciduous trees with spectral similarities. BRDF-related problems or influences of the BRDF in terms of classification accuracy should also be investigated.

6 References

- AKAIKE, H., 1973: Information theory as an extension of the maximum likelihood principle. In: Petrov, B.N., Csaki, F. (eds.), *Second International Symposium on Information Theory*. Akademiai Kiado, Budapest, Hungary, pp. 267-281.
- ARTUSO, R., BOVET, S. & STREILEIN, A., 2003: Practical Methods for the Verification of countrywide Terrain and Surface Models, In: *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. XXXIV-3/W13.
- BAATZ, M. & SCHÄPE, A., 2000: Multiresolution Segmentation – an optimization approach for high quality multi-scale image segmentation. In J. Strobl, T. Blaschke and G. Griesebner (eds.), *Angewandte Geographische Informationsverarbeitung Vol. XII*. Heidelberg, Germany: Wichmann, 12-23.
- BALTSAVIAS, E., GRUEN, A., EISENBEISS, H., ZHANG, L. & WASER, L.T., 2008: High Quality Image Matching and Automated Generation of 3D Tree Models. *International Journal of Remote Sensing*, **29** (5), pp. 1243 – 1259.
- BRÄNDLI, U.-B., 2010: Schweizerisches Landesforstinventar. Ergebnisse der dritten Erhebung 2004-2006. Birmensdorf, Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL. Bern, Bundesamt für Umwelt, BAFU. 312 p.
- BRANDBERG, T., 2002: Individual tree-based species classification in high spatial resolution aerial images of forests using fuzzy sets. *Fuzzy Sets and Systems*, **132**, pp. 371-387.
- CHUBEY, M., STEHELE, K., ALBRICHT, R., GOUGEON, F., LECKIE, D., GRAY, S., WOODS, M. & COURVILLE, P., 2009: Semi-Automated Species Classification in Ontario Great Lakes - St. Lawrence Forest Conditions. Final Report: Great Lakes - St. Lawrence ITC Project (2005/2008). Ontario Ministry of Natural Resources. January 2009. 71 p.
- GONZALES, R.C. & WOODS, R.E., 2002: Digital image processing. Second edition. New Jersey: Upper Saddle River.
- GUISAN, A. WEISS, S.B. & WEISS, A.D., 2004: GLM versus CCA spatial modeling of plant species distribution. *Plant Ecology*, **143** (1), pp. 107-122.
- HEINZEL, J.N., WEINACKER, H. & KOCH, B., 2008: Full automatic detection of tree species based on delineated single tree crowns – a data fusion approach for airborne laser scanning data and aerial photographs. - *SilviLaser 8th international conference on LiDAR applications in forest assessment and inventory*, September 18-19, 2008, Edinburgh, UK, 76-85.
- HIRSCHMUGL, M., OFNER, M., RAGGAM, J., & SCHARDT, M., 2007: Single tree detection in very high-resolution remote sensing data. - *Remote Sensing of Environment*, **110**, pp. 533-544.
- HOLMGREN, J., PERSSON, A. & SODERMAN, U., 2008: Species identification of individual trees by combining high resolution LiDAR data with multi-spectral images. - *International Journal of Remote Sensing*, **29**, pp. 1537-1552.
- HOSMER, D.W., & LEMESHOW, S., 2000: Applied logistic regression, second edition, New York: Wiley.

- KÜCHLER, M., ECKER, K., FELDMEYER-CRISTE, E., GRAF, U., KÜCHLER, H. & WASER, L.T., 2004: Combining remotely sensed spectral data and digital surface models for fine-scale modelling of mire ecosystems. *Community Ecology*, **5** (1), pp. 55-68.
- MCCULLAGH, P. & NELDER, J.A., 1983: *Generalized linear models*. London: Chapman and Hall, 511 p.
- OLOFSSON, K., WALLERMANN, J., HOLMGREN, J. & OLSSON, H., 2006: Tree species discrimination using Z/I DMC imagery and template matching of single trees. *Scandinavian Journal of Forest Research*, **21**, pp. 106-110.
- REULKE, R., BECKER, S., HAALA, N. & TEMPELMANN, U., 2006: Determination and improvement of spatial resolution of the CCD-line-scanner system ADS40. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, **60**, pp. 81–90.
- ST-ONGE, B., JUMELET, J., COBELLO, M. & VEGA, C., 2004: Measuring individual tree height using a combination of stereophotogrammetry and lidar. *Canadian Journal of Forest Research*, **34**(10), pp. 2122-2130.
- WASER, L.T., KÜCHLER, M., ECKER, K., SCHWARZ, M., IVITS, E., STOFER, S. & SCHEIDEGGER, CH., 2007: Prediction of Lichen Diversity in an Unesco Biosphere Reserve - Correlation of high Resolution Remote Sensing Data with Field Samples -. *Environmental Modeling & Assessment*, **12** (4), pp. 315-328.
- WASER, L.T., BALSAVIAS, E., ECKER, K., EISENBEISS, H., GINZLER, C., KÜCHLER, M., THEE, P. & ZANG, L., 2008A: High-resolution digital surface models (DSM) for modelling fractional shrub/tree cover in a mire environment. - *International Journal of Remote Sensing*, **29** (5), pp. 1261 – 1276.
- WASER, L.T., GINZLER, C., KÜCHLER, M. & BALSAVIAS, E., 2008B. Potential and limits of extraction of forest attributes by fusion of medium point density LiDAR data with ADS40 and RC30 images. - *SilviLaser 8th international conference on LiDAR applications in forest assessment and inventory*, September 18-19, 2008, Edinburgh, UK, pp. 625-634.
- WASER, L.T., KLONUS, S., EHLERS, M., KÜCHLER, M. & JUNG, A., 2010: Potential of Digital Sensors for Land Cover and Tree Species Classifications - A Case Study in the Framework of the DGPF-Project. *Photogrammetrie, Fernerkundung und Geo-information*, **10** (2), pp. 132- 141.

Auswertung von Fernerkundungsdaten mit Self-Organizing Maps für die Herleitung von Kohlenstoffkarten

WOLFGANG STÜMER¹

Self-Organizing Maps (SOM), manchmal auch nach dem Entwickler Teuvo Kohonen als Kohonen-Karten bezeichnet, gehören zu dem Forschungsgebiet der neuronalen Netze. Sie dienen der Abbildung eines hochdimensionalen Eingaberaumes auf einen niederdimensionalen Ausgaberaum. In der hier vorgestellten Arbeit wurde diese spezielle Form der neuronalen Netze zur Klassifizierung von Bildinformationen verwendet. Um über eine Klassifizierung eine Aussage zur Kohlenstoffspeicherung im Wald treffen zu können, wurde die Methode der Self-Organizing Maps angepasst. Für die Umsetzung dieses Ansatzes dienten als terrestrische Datengrundlage Kohlenstoffwerte der Bundeswaldinventur, die über die Biomasse der Einzelbäume hergeleitet wurden. Als weitere Datenquelle standen Fernerkundungsdaten des Satelliten Landsat-7 ETM zur Verfügung. Über die Georeferenzierung der Satellitendaten wurden diese mit den terrestrischen Daten verbunden. Als Testgebiete wurden drei Gebiete im Bundesland Thüringen (Deutschland) ausgewählt. Über die Zuordnung von Kohlenstoffwerten zu jedem Bildpixel und der anschließenden Klassifizierung konnten realistische Karten zur räumlichen Verteilung der Kohlenstoffspeicherung im Wald erzeugt werden. Zur Validierung der Ergebnisse wurden die Karten mit Ergebnissen aus Berechnungen mit der k-Nearest Neighbor Method (kNN) verglichen und eine Überprüfung mit Hilfe einer Kreuzvalidierung durchgeführt.

1 Einleitung

Die aktuelle Arbeit präsentiert die Ergebnisse eines Teilprojektes, welches innerhalb des Projektes „Bewertung der europäischen terrestrischen Kohlenstoffbilanz (CarboEurope)“ durchgeführt wurde und sich auf die räumlich explizite Schätzung des aktuellen Kohlenstoffvorrats in Wäldern konzentriert. Für viele Entscheidungsprozesse und kausale Schlussfolgerungen werden oft flächendeckende explizite Informationen in Form von Karten benötigt. Durch die Heterogenität der einzelnen Datenformate, der räumlichen und zeitlichen Auflösungen sowie der regionalen Abdeckung sind die Integration von Daten und die gleichzeitige Analyse schwierig. Klassische statistische Methoden wie z. B. die multivariate Analyse können nur schwer angewendet werden, da gegebene Annahmen und Einschränkungen verletzt werden. Dort, wo traditionelle statistische Analyseverfahren versagen, bieten neuronale Netze einen alternativen Ansatz. Sie befassen sich mit dem sogenannten „biologisches Know-how“, um menschliches Denken und Entscheidungen zu imitieren. Zwei Hauptmerkmale der neuronalen Netze sind die Analyse von komplexen Datensätzen mit der Möglichkeit, Fehler und Unsicherheiten zu tolerieren, und Wissen zu sammeln und zu verarbeiten. Ein Teilgebiet der neuronale Netze sind die Self-Organizing Maps (Selbstorganisierende Karten), auch als Kohonen-Karten bezeichnet (KOHONEN, 1982, 2001). Sie vereinen ein hohes Maß an biologischer Plausibilität, wodurch Informationen verarbeitet und optimiert werden können.

1) Wolfgang Stümer, Johann Heinrich von Thünen-Institut, Institut für Waldökologie und Waldinventuren, Alfred-Möller-Str. 1, 16225 Eberswalde, Germany

Die Ergebnisse werden räumlich in Form von Karten dargestellt.

Self-Organizing Maps (SOM) wurden in dieser Arbeit für die Schätzung des Holz- und Kohlenstoffvorrats in Waldbeständen für drei Testgebiete in Thüringen herangezogen. Eine Verifizierung der Ergebnisse mit terrestrischen Daten und der Vergleich mit einer weiteren Methode zur Schätzung räumlicher Daten, bezeichnet als k-nearest Neighbour Method (k-nächste Nachbarn (kNN)-Methode) (STÜMER, 2004; STÜMER und KÖHL, 2005) schloss sich an.

2 Material und Methoden

2.1 Methode der Self-Organizing Maps (SOM)

Die Anfänge der neuronalen Netze gehen auf die 40er Jahre zurück, wo MCCULLOCH und PITTS (1943) Zellen als Einheiten mit logischen Schwellenwerten definierten. Aus den neuronalen Netzen hat sich in den 80er Jahren die Untergruppe der Self-Organizing Maps (SOM) herausgebildet (KOHONEN 1995). Sie sind als unüberwachtes Lernverfahren ein leistungsfähiges Werkzeug für die Auswertung von größeren Datenmengen. Ihr Funktionsprinzip beruht auf dem biologischen Wissen, dass viele Strukturen im Gehirn eine lineare Topologie aufweisen. Sie bieten die Möglichkeit, mehrdimensionale Signale von einer Eingabeebene in lineare oder planare Strukturen zu übertragen. Dadurch können mehrdimensionale Eingangsdaten auf zwei Dimensionen verdichtet und die Ergebnisse in Karten, die die topologischen Eigenschaften der Eingangsdaten enthalten, dargestellt werden. Der Algorithmus der SOM kann in zwei Phasen unterteilt werden: die erste Phase ist die Lernphase (Gewinnerauswahl und Anpassung) und die zweite Phase generiert die Karte (Klassifizierung) (Abb. 1)

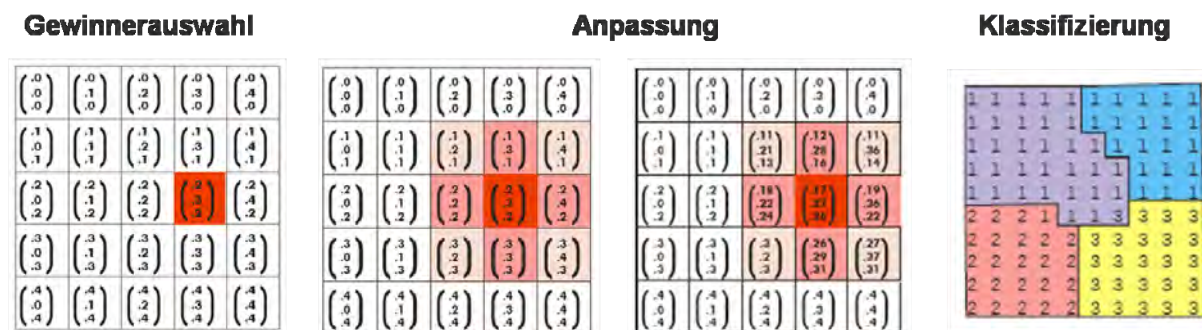


Abb. 1: Algorithmus der Selbstorganisierenden Karten: Gewinnerauswahl, Anpassung und Klassifizierung. Die einzelnen Quadrate symbolisieren die Neuronen, die miteinander in einem Gitter verbunden sind (nach BLOHM 2004)

Die Struktur der Self-Organizing Maps setzt sich aus einem Eingangsgitter (Competitive Layer) mit n Neuronen, die alle miteinander verbunden sind, zusammen. An das Gitter werden alle zu kartierenden Eingangsreize v angelegt und über die Verbindungen an jedes Neuron weitergegeben. Dabei wird zwischen jedem Eingangsreiz der Eingabedaten und jedem Neuron des Eingangsgitters ein Verbindungsgewicht w bestimmt. Danach wird das Erregungszentrum s im Eingangsgitter, dessen Gewichtsvektor am nächsten zu v liegt (kleinster Abstand), gesucht. Ist das Erregungszentrum gefunden wird als erster Adaptionsschritt der Unterschied zwischen

Neuron und Eingangsreiz verringert, indem sich das Neuron hin zum Eingangsreiz bewegt. Im zweiten Schritt werden auch alle Neuronen nahe am Erregungszentrum in gleicher Weise adaptiert, aber umso weniger, je weiter sie vom Erregungszentrum entfernt sind. Dieser Anpassungsprozess wird als „Lernen“ interpretiert und kann formal als iterativer Prozess beschrieben werden. Nach Abschluss der Lernphase erfolgt die Klassifizierung der Self-Organizing Maps.

Als Eingangsdaten wurden Satellitenbilder vom Sensor Landsat 7 ETM+ mit terrestrischen Proben mit Hilfe des SOM-Ansatzes verbunden und flächendeckende Kohlenstoffkarten von den Testgebieten erstellt. Dafür wurde der Algorithmus der SOM wie folgt angepasst: Als Eingangsgitter dient in der Untersuchung das Landsatbild. An jedes Pixel des Bildes x_i wird ein Eingangsreiz angelegt. Als Reize v_j werden die Pixel mit terrestrischen Informationen herangezogen. Gesucht ist das Erregungszentrum im Eingangsgitter, dessen spektrale Information am nächsten zum Reiz liegt. Als Abstandsmaß kommt die Euklidische Distanz $d(x_i, v_j)$ zum Einsatz.

$$d(x_i, v_j) = \|x_i - v_j\|^2$$

Das Pixel im Eingangsgitter mit dem kleinsten euklidischen Abstand zum Reiz ist das Gewinnerpixel c_i . Diesem Pixel wird der Merkmalswert m_j des Reizes v_j zugeordnet.

$$c_i = \min\{d(x_i, v_j)\}$$

Nachdem das Gewinnerpixel ermittelt wurde, werden alle Pixel bestimmt, die sich neben dem Erregungszentrum anpassen dürfen. Es handelt sich dabei um die Pixel, deren Abstand $d(x_i, v_j)$ nicht größer ist als ein zeitabhängiger Schwellenwert, der als Entfernungreichweite δ^t bezeichnet wird.

$$\delta^t = \delta_{\text{start}} * \left(\frac{\delta_{\text{end}}}{\delta_{\text{start}}}\right)^{\frac{t}{t_{\text{max}}}}$$

mit t = Startzeit
 t_{max} = Endzeit
 δ_{start} = Adaptionradius zum Zeitpunkt t
 δ_{end} = Adaptionradius zum Zeitpunkt t_{max}

Auf alle diese Pixel wird ein Lernschritt angewendet, der den Merkmalswert des Pixels m_j in Richtung des Merkmalswerts des Gewinnerpixels m_{v_j} verschiebt. Nach dem Modell von RITTER et al. (1991) wird dabei die folgende Adaptionsregel verwendet:

$$m_j^{t+1} = m_j^t + h_j^t * d(m_j^t, m_{v_j})$$

mit der zeitabhängigen Entfernungsgewichtungsfunktion h_i^t

$$h_i^t = e^{\frac{-(d(x_i, v_j))}{2 * (\delta^t)^2}}$$

Am Ende der Berechnungen sollte jedem Bildpixel entsprechend den Eingangsreizen und ihrer spektralen Entfernung zum Gewinnerpixel ein Merkmalswert zugeordnet sein. Dabei ist zu

beachten, dass der Schwellenwert anfangs groß gewählt wird und sich im Laufe des Verfahrens verkleinert.

2.2 k-Nearest Neighbour (kNN) Methode

Um die operationale Anwendbarkeit und Zuverlässigkeit der Self-Organizing Maps zu überprüfen, wurde eine Validierung mit der k-Nearest Neighbour Methode durchgeführt. Die kNN-Methode ist eine alternative Methode, um zu flächendeckenden räumlichen Daten zu gelangen. Dabei werden terrestrische Punktdaten durch die Nutzung von spektralen Ähnlichkeiten der Pixel mit Fernerkundungsdaten verbunden.

Die kNN-Methode wurde von KILKKI und PÄIVINEN (1987) in die Forstwirtschaft eingeführt. Seitdem wurde die Methode weiterentwickelt und kam in vielen Anwendungen zum Einsatz (TOMPPO 1991; NILSSON 1997; TOMPPO et al., 1999; FRANCO-LOPEZ et al, 2001; TOMPPO und HALME, 2004, STÜMER und KÖHL, 2005, FINLEYA und MCROBERTS, 2008). KIM und TOMPPO (2006) und MAGNUSSEN et al. (2009) führten eine erweiterte Analyse der statistischen Eigenschaften der kNN-Schätzungen durch. Während Sie sich auf den modellbasierten Ansatz beziehen, untersuchen BAFETTA et al. (2009) die statistischen Eigenschaften der kNN-Schätzer in einem designbasierten Ansatz.

In dieser Arbeit wurde die kNN-Methode wie folgt angewendet: Ausgehend vom Pixel der Fernerkundungsdatenquelle, deren geografische Position mit den Stichprobenpunkten bei den Feldaufnahmen übereinstimmen, werden für alle Pixel – auch solche, die nicht mit terrestrischen Proben koinzidieren – Variablenwerte (Holz- und Kohlenstoffvorrat) berechnet. Die Variablenwerte eines Pixels ergeben sich als Mittelwerte von k benachbarten Proben, die über ein Distanzmaß, das die spektrale Ähnlichkeit beschreibt, gewichtet werden. Jedes Pixel enthält pro Kanal einen digitalen Wert als spektrale Information. Die spektrale Differenz zwischen zwei Pixeln kann mit Hilfe einer einfachen Metrik bestimmt werden. Ein gebräuchliches Distanzmaß ist die Euklidische Distanz $d_{(i)p}$, die im spektralen Raum von Pixel p , das klassifiziert werden soll, zu jedem Pixel i , für das eine terrestrische Beobachtung vorliegt, berechnet wird. Falls x_1 und x_2 die Merkmalsvektoren zweier Pixel sind, deren Ähnlichkeit überprüft werden soll, ist die Euklidische Distanz $d_{(x_1,x_2)}$ zwischen ihnen

$$d_{(x_1,x_2)} = \left[\sum_{j=1}^N (x_{1j} - x_{2j})^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

wobei N die Anzahl der spektralen Komponenten (z.B. verwendete Kanäle) bezeichnet.

Die $k=1$ bis $k=50$ nächsten spektralen Nachbarn, d.h. Pixel mit korrespondierenden terrestrischen Beobachtungen, werden für die weiteren Betrachtungen verwendet. Dabei kommen die Pixel zur Auswahl, die die Bedingung

$$d_{(1),p} \leq d_{(2),p} \leq \dots \leq d_{(k),p} \leq \dots \leq d_{(n),p}$$

im spektralen Raum erfüllen, wobei $d_{(k),p}$ die Distanz der k nächsten Nachbarn und n die Anzahl der verfügbaren Pixel mit korrespondierenden terrestrischen Daten ist. Alle Pixel mit Distanzen im spektralen Raum größer $d_{(k),p}$ vom betrachteten Pixel p werden ignoriert. Bei $k=1$ wird nur das Pixel mit der geringsten spektralen Differenz für die weitere Berechnung berücksichtigt. Je

höher k ist, desto mehr Pixel mit zugeordneten terrestrischen Informationen beeinflussen den zu berechnenden Merkmalswert des Pixels ohne terrestrische Informationen. Die Verwendung von k Stichproben erlaubt es, die beispielsweise durch Signalstörung verursachte, zufällige Streuung einzuschränken.

Die Distanzwerte spiegeln nur die Unterschiede zwischen den spektralen Informationen zweier Pixel wider. Um die Werte eines bei terrestrischen Aufnahmen erhobenen Merkmals, welche den k nächsten Pixeln zugeordnet sind, in die weitere Berechnung einfließen zu lassen, müssen diese entsprechend ihrer spektralen Distanz gewichtet werden. Deshalb wird für jedes ausgewählte Pixel ein Gewicht $w_{(i),p}$ kalkuliert.

$$w_{(i),p} = \frac{1}{d_{(i),p}^2} \sum_{i=1}^k \frac{1}{d_{(i),p}^2}$$

Je ähnlicher die spektrale Information ist, desto höher das Gewicht und damit der Einfluss auf den zu berechnenden Merkmalswert.

Für ein Pixel wird mit Hilfe der auf terrestrischen Probeeinheiten erfassten Merkmalswerte und den zugehörigen, aus spektralen Daten abgeleiteten Gewichten der k nächsten Pixel ein Wert für das Merkmal bestimmt. \hat{m}_p ist ein Schätzer des Merkmals M für Pixel p

$$\hat{m}_p = \sum_{i=1}^k w_{(i),p} m_{(i),p}$$

wobei $m_{(i),p}$ die terrestrisch erfassten Werte der $i = 1, \dots, k$ Pixel sind, die im spektralen Raum am nächsten zu Pixel p liegen. Der Prozess wird für jedes Pixel wiederholt und resultiert in Abhängigkeit von der Größe des Testgebietes und der räumlichen Auflösung des Sensors in intensiven Berechnungen. Die Zuverlässigkeit der Schätzungen der kNN-Methode hängt von der Anzahl der unabhängigen in-situ-Beobachtungen ab (MUIONEN und TOKOLA 1990; STÜMER 2004).

2.3 Daten

Die SOM- und kNN-Ansätze wurden auf drei Testgebiete im Bundesland Thüringen angewendet, welche den drei Landkreisen Kyffhäuserkreis, Unstrut-Hainich-Kreis und Sömmerda entsprechen (Tab. 1).

Tab. 1: Fläche und Waldfläche der Testgebiete

ID	Name	Fläche [ha]	Waldfläche [ha]
170	Kyffhäuserkreis	103 332	24 775
220	Unstrut-Hainich-Kreis	98 450	18 225
231	Sömmerda	80 813	6 225

Die zweite Bundeswaldinventur stellte in-situ-Daten bereit, die im Jahr 2001 durch eine systematische Cluster-Stichprobe (BMVEL 2001) erhoben wurden. Es standen 2070 Stichprobenpunkte mit dem auf die Stichprobenfläche aggregierten Holzvorrat zur Verfügung. Die Lage der Probeflächen ist mit einer geometrischen Genauigkeit im Bereich von ± 10 m

bekannt. Der Holzvorrat wurde durch Biomasseexpansionsfaktoren (BEF), die alle Kompartimente der gemessenen Bäume berücksichtigen, in Biomasse umgerechnet (ZIANIS et al. 2005). Es kamen verschiedene BEF's für Nadelholz (BEF = 0,52), Laubholz (BEF = 0,82) und Mischbestände (BEF = 0,67) zur Anwendung. Die daraus resultierenden Biomassewerte wurden mit einem Faktor von 0,5 multipliziert, um Biomasse in Kohlenstoff zu konvertieren. Die Kohlenstoffwerte wurden sowohl für den SOM-Ansatz als auch für die kNN-Methode genutzt. Ein hochauflösendes Satellitenbild wurde für das Testgebiet erworben (Landsat 7 ETM+, Aufnahme datum 15. September 1999) und geometrisch und radiometrisch korrigiert. Die Zeitdifferenz zwischen der Aufnahme der Landsatszene und der Erhebung der terrestrischen Stichproben wird als unbedeutend angenommen, da diese aufgrund der niedrigen Wachstumsrate der gemäßigten Wälder nicht zu einer Verzerrung der Ergebnisse führt. Der panchromatische Kanal wurde mit den Multispektralkanälen fusioniert und der Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) und der Transformed NDVI (TNDVI) generiert. Die Multispektralkanäle 1 bis 5 und 7, der panchromatische Kanal 8, der NDVI- und der TNDVI-Kanal (generiert mit dem Programm ERDAS IMAGINE) wurden für die SOM- und kNN-Berechnungen genutzt.

2.4 Validierung

Die Zuverlässigkeit der SOM- und kNN-Holz- und Kohlenstoffvorratsschätzungen wurde mit dem mittleren quadratischen Fehler (MSE) quantifiziert. Der MSE verbindet die Schätzungen der Varianz des Mittelwertes und einer systematischen Verzerrung (Bias) miteinander.

$$MSE = (Variance\ of\ \hat{\mu}) + (Bias)^2$$

mit

$$Bias = \hat{\mu} - \mu$$

$\hat{\mu}$ = geschätzter mittlerer Kohlenstoffvorrat oder mittlerer Holzvorrat

μ = wahrer mittlerer Kohlenstoffvorrat oder mittlerer Holzvorrat

Um den Vergleich zwischen den beiden Ansätzen zu erleichtern, wurde die Wurzel aus dem mittleren quadratischen Fehler (RMSE) und die Prozentzahl der Wurzel aus dem mittleren quadratischen Fehler (RMSE%) angewendet.

$$RMSE = \sqrt{MSE}$$

$$\%RMSE = \frac{RMSE * 100}{\hat{\mu}}$$

3 Ergebnisse

Für die drei Testgebiete Kyffhäuserkreis, Unstrut-Hainich-Kreis und Sömmerda wurde der Ansatz der SOM angewendet. Dabei wurden zwei Arten von Ergebnissen erzielt: (1) räumlich Karten der Kohlenstoffspeicherung pro Flächeneinheit (t / ha), und (2) statistische Schätzungen für die Kohlenstoffspeicherung und den Holzvorrat. Die SOM-Karten wurden mit Karten, erstellt

auf der Grundlage des kNN-Ansatzes, verglichen und terrestrische Daten zur Validierung der statistischen Schätzungen herangezogen.

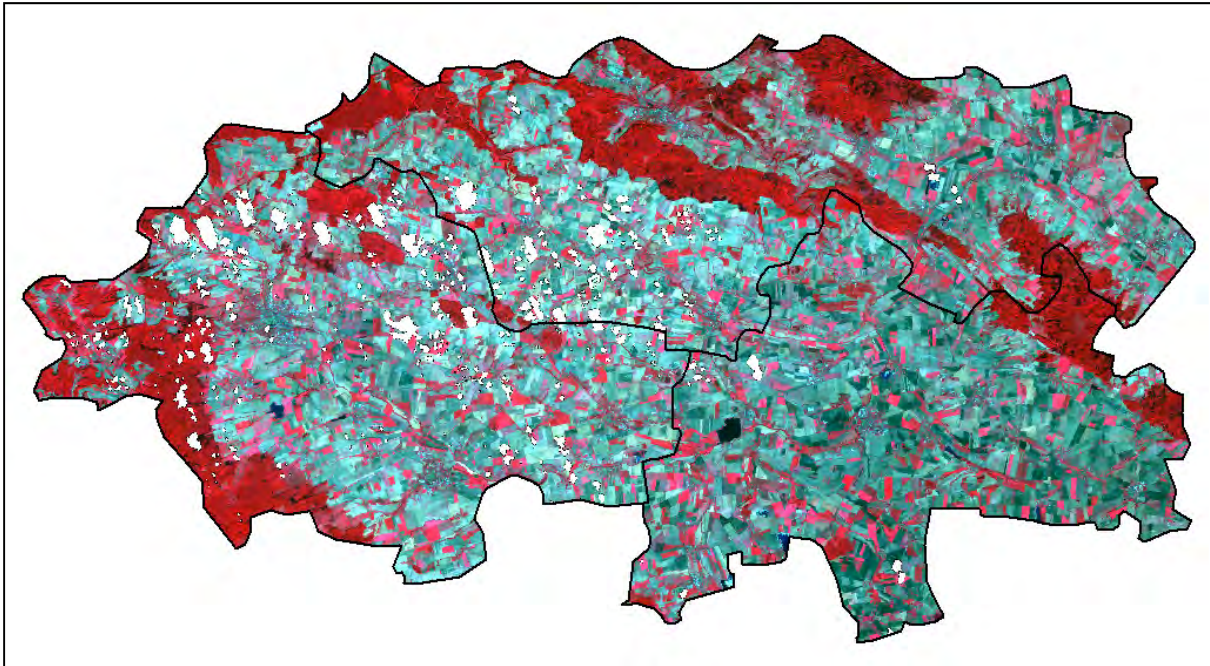


Abb. 2: Landsat 7 ETM+-Szene der Testgebiete Kyffhäuserkreis, Unstrut-Hainich-Kreis und Sömmerda (rot = Band 4, grün = Band 3, blau = Band 2)

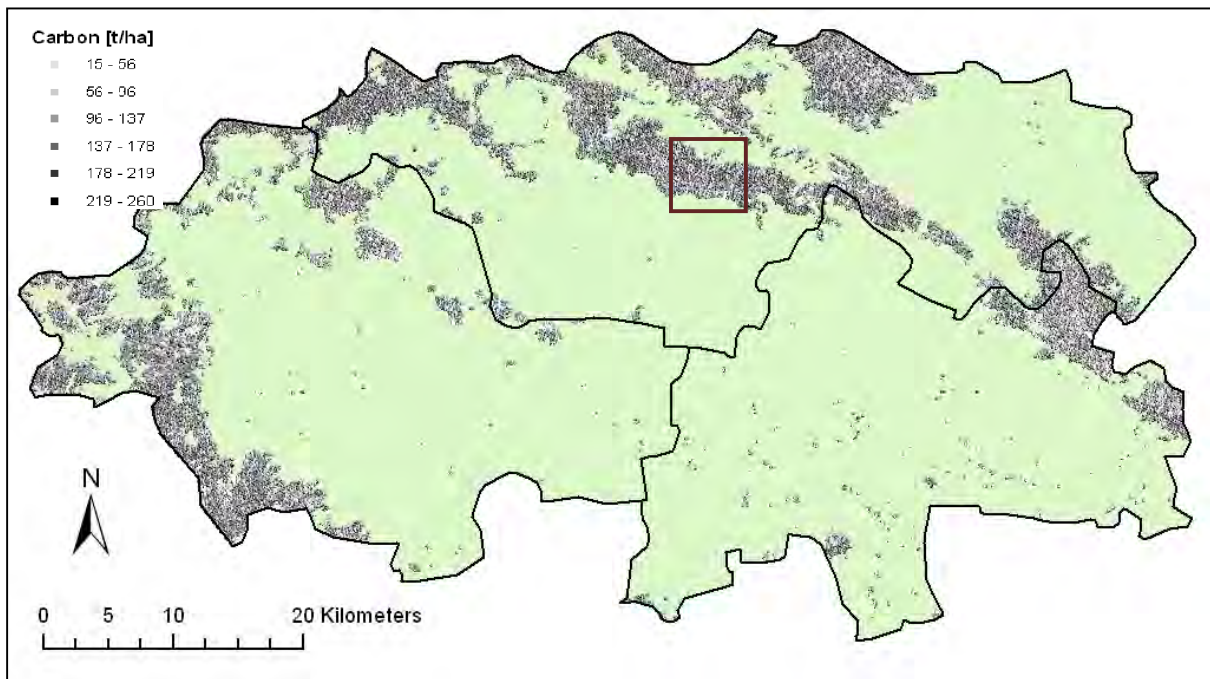
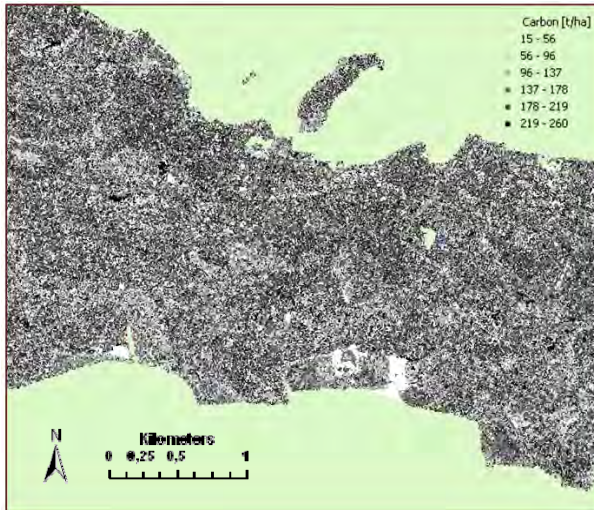


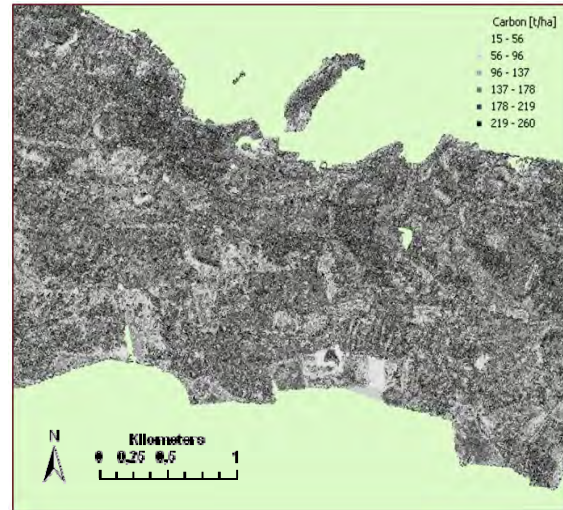
Abb. 3: Waldkohlenstoffkarte auf der Grundlage der SOM-Schätzungen für die Testgebiete Kyffhäuserkreis, Unstrut-Hainich-Kreis und Sömmerda. Das braune Quadrat umfasst ein ausgewähltes Gebiet für einen räumlichen und spektralen expliziten Vergleich der beiden Ansätze SOM und kNN

3.1 Karten

Abbildung 2 zeigt eine Landsat 7 ETM+-Szene als RGB-Karte für die drei Testgebiete. Dunkelrot hebt sich die Waldfläche von den anderen Landnutzungsklassen ab, die für die weitere Betrachtung relevant ist. Eine Waldkohlenstoffkarte berechnet mit dem SOM-Ansatz ist in Abbildung 3 dargestellt. Der Kohlenstoffvorrat wird in Tonnen je Hektar, unterteilt in sechs Klassen, abgebildet. Der Vergleich der beiden Karten (Abb. 2 und Abb. 3) zeigt, dass der SOM-Ansatz in der Lage ist, die Topologie zu erhalten und ebenso für die Klassifizierung von Wald/Nicht-Wald eingesetzt werden kann.



SOM-Ansatz



kNN-Methode



©2009 Google, Image © 2010 GeoContent, © 2009 TeleAtlas

Hochaufgelöstes Luftbild

Abb. 4: Gegenüberstellung der Kohlenstoffkarten auf Basis der SOM- und kNN-Ansätze mit einem hochaufgelösten Luftbild

In Abbildung 4 werden für die Teilfläche (Abb. 3 braunes Quadrat) die Ergebnisse der Kohlenstoffvorratsschätzung des SOM-Ansatzes mit dem der kNN-Methode verglichen und einem hochaufgelösten Luftbild gegenübergestellt. Dies ermöglicht eine visuelle Begutachtung

der Ergebnisse. Die SOM- und kNN-Karten besitzen einen ähnlichen Detaillierungsgrad. Gebiete die durch einen hohen Kohlenstoffvorrat gekennzeichnet sind, können in beiden Karten identifiziert werden. Während die kNN-Karte einen höheren Kontrast und klarere Formen der räumlichen Kohlenstoffvorratsverteilung aufzeigt, weist die SOM-Karte kleinste Unterschiede aus. Die strukturellen Details wie Straßen, Pflanzungen oder Grenzen sind in der kNN-Karte deutlicher ausgeprägt.

3.2 Statistische Schätzungen

Die Überprüfung des SOM-Ansatzes wurde durch einen Vergleich statistischer Kenngrößen für die Testgebiete ergänzt. Tabelle 2 zeigt die Ergebnisse für den Bestandes- und Kohlenstoffvorrat für die beiden Ansätze SOM und kNN. Die Ergebnisse basieren auf den Schätzungen aller Pixel in einem Testgebiet, die auch für die Darstellung der Karten verwendet wurden. Die SOM-Schätzungen für Vorrat und Kohlenstoff liegen zwischen 93 % und 106 % der kNN-Schätzungen. Die Unterschiede zwischen den beiden Ansätzen sind moderat und deuten nicht auf eine einseitige Über- oder Unterschätzung hin.

Tab. 2: SOM- und kNN-Schätzwerte für den Holz- und Kohlenstoffvorrat aufgeschlüsselt nach den drei Testgebieten.

Testgebiet	Ansatz	Holzvorrat		Kohlenstoffvorrat	
		[1000*m ³]	[m ³ /ha]	[1000*t C]	[t C/ha]
Kyffhäuserkreis	SOM	7264	293.21	2433	98.22
	kNN	7793	314.58	2611	105.38
Unstrut-Hainich-Kreis	SOM	5393	295.94	1807	99.14
	kNN	5602	307.38	1877	102.97
Sömmerda	SOM	2151	345.62	721	115.78
	kNN	2029	326.00	680	109.21

Tab. 3: Fehlerwerte für die Schätzung des Vorrates mit dem SOM-Ansatz und der kNN-Methode aufgeschlüsselt nach den drei Testgebieten.

Testgebiet	Stichproben	Mittelwert [m ³ /ha]	Ansatz	Bias	RMSE	%RMSE
Kyffhäuserkreis	104	311.50	SOM	-28.05	239.85	69.49
			kNN	-13.64	178.12	54.80
Unstrut-Hainich-Kreis	70	309.91	SOM	9.20	202.58	66.33
			kNN	-5.35	141.41	44.85
Sömmerda	25	331.09	SOM	10.29	221.98	70.49
			kNN	5.61	180.91	55.58

Zur Validierung des SOM-Ansatzes und der kNN-Methode wurden die bei den Feldaufnahmen gemessenen Werte (wahre Werte) den geschätzten gegenübergestellt. Dies ermöglichte eine Fehleranalyse für die Schätzung des durchschnittlichen Holzvorrates pro Flächeneinheit (Tab. 3). In den drei Testgebieten standen zwischen 25 und 104 Stichprobenpunkte für die Fehlerrechnung zur Verfügung.

Im Kyffhäuserkreis ergibt sich für beide Ansätze ein negativer Bias (SOM: -9,0 %; kNN: -4,4 %) und im Unstrut-Hainich-Kreis liegt er beim SOM-Ansatz bei +3 % und beim kNN-Ansatz bei -1,7 %. Dagegen liegt er für die Region Sömmerda für beide Ansätze im positiven Wertebereich (SOM: 3,1 %; kNN: 1,7 %). Obwohl beim SOM-Ansatz eine leichte Tendenz für einen größeren Bias als bei der kNN-Methode vorliegt, kann keine einheitliche Über- oder Unterschätzung quantifiziert werden. Die RMSE% des SOM-Ansatz liegen zwischen 66,3 % und 70,49 % und sind deutlich größer als für den kNN-Ansatz (44,85 % bis 55,58 %).

4 Diskussion

Der SOM-Ansatz wurde zur räumlich expliziten Schätzung des Kohlenstoffs im Wald eingesetzt. Terrestrische- und Satelliten-Daten als Eingangsdaten dienten zur Ausführung der Lern- und Klassifizierungsphase eines neuronalen Netzes. Die Ergebnisse zeigen, dass SOM ein Ansatz ist, der die Fähigkeit besitzt, räumliche Muster des Kohlenstoffvorrats des Waldes wiederzugeben. SOM sind - mit einigen Einschränkungen - mit räumlich expliziten Schätzungen der kNN-Methode vergleichbar. Sie liefern einen höheren Detailliertheitsgrad als herkömmliche Klassifizierungsverfahren und sind somit ein fortschrittlicher Ansatz für die Klassifizierung von Fernerkundungsdaten.

SOM als Teilgebiet der künstlichen neuronalen Netze bieten einige spezifische Vorteile gegenüber anderen statistischen Verfahren. Sie sind beispielsweise auch dann anwendbar wenn Beobachtungen unvollständig sind, zugrunde liegende Prozesse nur schwer zu verstehen sind oder Daten von verschiedenen zeitlichen, räumlichen und statistischen Skalen kombiniert werden müssen. Zusätzliches Wissen über die zugrundeliegenden Prozesse oder Annahmen, wie z. B. die Struktur der Zielfunktionen ist nicht erforderlich (MCCULLOCH und PITTS, 1943, KOHONEN, 1982, 2001, KÖHL und JENSEN, 1993). Nach der Lernphase ermöglichen neuronale Netze die Analyse von gegebenen Bedingungen. Die Fähigkeit der SOM, komplexe Zusammenhänge zu verstehen und sowohl qualitative als auch quantitative Daten zu verarbeiten, machen sie zu einem flexiblen und leistungsstarken Ansatz

Es gibt jedoch einige grundlegende anwendungsspezifische Probleme. SOM sind nicht selbsterklärend und werden üblicherweise als „Black Box“ behandelt. Die benötigte Zeit, sie zu trainieren und zu prüfen darf, nicht unterschätzt werden. Auch die Entscheidung über die Intensität des Lernprozesses ist eine große Herausforderung.

Wo statistische Schätzungen vorliegen, wie hier durch den SOM-Ansatz, werden Verfahren für die Bestimmung der Varianz der Schätzungen benötigt. Es gibt für die kNN-Methode umfangreiche Untersuchungen dazu. Für den modellbasierten Ansatz (TIM und TOMPPU, 2006, MAGNUSSEN et al., 2009) sowie den designbasierten Ansatz (BAFFETTA et al., 2009) wurden Schätzer vorgelegt, welche die operationelle Anwendbarkeit der kNN-Methoden deutlich verbessern. Dagegen sind weiterführende Untersuchungen zu den statistischen Eigenschaften der SOM-Schätzungen noch offen.

Obwohl sich das Potenzial der SOM für die Darstellung räumlich expliziter Daten gezeigt hat, ist die Methode noch in der Entwicklung. Zukünftige Arbeiten sollten in operationale Applikationen münden. Ein wichtiges Thema ist die Verbesserung der Genauigkeit und die verbesserte Darstellung von kleinräumlichen Mustern. Neben der Anpassung der Lernphase, bietet die

Erhöhung der Iteration, die Optimierung der Entfernungsgewichtung oder die Einbeziehung von Zusatzdaten (z. B. Standortdaten, Bestandesinformationen, Klimadaten oder Exposition) Potenziale zur Verbesserung der Schätzungen.

Die zukünftige Forschung auf dem Gebiet der SOM sollte über die bloße Herstellung von räumlich expliziten Karten und statistische Schätzungen hinausgehen. Der Ansatz bietet die Möglichkeit, komplexe Zusammenhänge und Prozesse zu analysieren und sollte auf die Fragestellung der Kohlenstoffveränderungen in Beständen erweitert werden. Von MELESSE und HANLEY (2005) wurden Neuronale Netze bereits erfolgreich für die Simulation von Kohlenstoffflüssen in Energiekreisläufen angewandt. Bei der Simulation von Kohlenstoffflüssen muss die räumliche Schätzung mit anderen Faktoren wie Vorhersage- oder Managementpraktiken verbunden und zu einem ganzheitlichen Ansatz für die Modellierung von Kohlenstoffvorräten und -veränderungen kombiniert werden.

5 Danksagung

Diese Studie wurde im Rahmen des Projektes „Bewertung der europäischen terrestrischen Kohlenstoffbilanz (CarboEurope)“ durchgeführt, welches durch die Europäische Kommission im sechsten Europäischen Rahmenprogramm gefördert wurde. Wir danken der Thüringer Landesanstalt für Wald, Jagd und Fischerei für die Bereitstellung der Inventurdaten und dem Joanneum Research in Graz (Österreich) für die Aufbereitung der Fernerkundungsdaten.

6 Literaturverzeichnis

- BAFFETTA F., L. FATTORINI, S. FRANCESCHI, P. CORONA, 2009: Design-based approach to k-nearest neighbours technique for coupling field and remotely sensed data in forest surveys. *Remote Sensing of Environment* 113, 463–475.
- BLOHM, S., 2004: Data Mining on Sequences with recursive Self-Organizing Maps, Bachelor's Thesis International Bachelor Program in Cognitive Science, Universität Osnabrück 2004.
- Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft (BMVEL) (Hrsg.) (2001) Aufnahmeanweisung für die Bundeswaldinventur II (2001 - 2002), 2. korrigierte, überarbeitete Ausgabe, Mai 2001, Bonn, 108.
- EUROPEAN COMMISSION, 1996: Reference for the definition of the economic territory of the EU: Council regulation 2223/1996 on ESA 1995 (European System of Accounts) points 2.05, 13.07, Official Journal L 310, 30.11.1996.
- FINLEYA, A.O., R.E. MCROBERTS, 2008: Efficient k-nearest neighbor searches for multi-source forest attribute mapping. *Remote Sensing of Environment* 112, 2203-2211.
- FRANCO-LOPEZ, H., A. R. EK, M. E. BAUER, 2001: Estimation and mapping of forest stand density, volume, and cover type using the k-nearest neighbors method. *Remote Sensing of Environment* 77, 251-274.
- KILKKI, P., R. PAIVINEN, 1987: Reference sample plots to combine field measurements and satellite data in forest inventory. In: *Remote Sensing-Aided Forest Inventory*. Seminars organised by SNS and Taksattoriklubi, Hyytiala, Finland, 209-212.
- KIM, H., E. TOMPPPO, 2006: Model-based prediction error uncertainty estimation for k-nn method. *Remote Sensing of Environment* 104, 257-263.

- KOHONEN, T., 1982: Self-organizing formation of topology correct feature maps, *Biol. Cybern.* 43, 59-69.
- KOHONEN, T., 2001: *Self-Organizing maps*. Springer Series in Information Sciences, Vol. 30, Springer, Berlin 2001, 501
- KÖHL, M., R. JENSEN, 1993: Analysing forest damage inventory data by self-organizing maps, in: Rennolls K. Gertner G. (eds.): *Proceedings of the IUFRO S.4.11 Conference "The optimal design of forest experiments and forest surveys"*. 10-13 September 1991, London, UK, 177-190.
- KÖHL, M., K. OEHMICHEN, 2003: Zur Verwendung von Landschaftsmasszahlen bei Wald- und Landschaftsinventuren: Überblick und Kritik. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen* 154, 8-16.
- MAGNUSSEN, S., R.E. MCROBERTS, E. TOMPPPO, 2009: Model-based mean square error estimators for k-nearest neighbour predictions and applications using remotely sensed data for forest inventories. *Remote Sensing of Environment* 113, 476-488.
- MCCULLOCH, W.S., W. PITTS, 1943: A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. *Bull Math Biophys* 5, 115-133.
- MELESSE, A.M., R.S. HANLEY, 2005: Energy and carbon flux coupling: Multi-ecosystem comparisons using artificial neural networks. *American Journal of Applied Sciences* 2, 491-495.
- MUIONEN, E., T. TOKKOLA, 1990: An application of remote sensing for communal forest inventory. In: *The usability of Remote Sensing for Forest Inventory and Planning*, Proceedings from the SNS/ IUFRO workshop in Umea, 26-28 February, 1990, 35-42.
- NILSSON, M., 1997: Estimation of forest variables using satellite image data and airborne lidar. Doctoral thesis, Swedish University of Agricultural Sciences, Umea.
- RITTER, H., T. MARTINETZ, K. SCHULTEN, 1991: *Neuronale Netze. Eine Einführung in die Neuroinformatik selbstorganisierender Netzwerke*. Addison-Wesley, Bonn 1991, ISBN 3-89319-131-3.
- STÜMER, W., M. KÖHL, 2005: Kombination von terrestrischen Aufnahmen und Fernerkundungsdaten mit Hilfe der k-nächsten-Nachbarn-Methode zur Klassifizierung und Kartierung von Wäldern. *Photogrammetrie Fernerkundung Geoinformation* 1/2005, 23-36.
- STÜMER, W., 2004: Kombination von terrestrischen Aufnahmen und Fernerkundungsdaten mit Hilfe der kNN-Methode zur Klassifizierung und Kartierung von Wäldern. Dissertation TU Dresden, <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:swb:14-1096379861218-08302>.
- TOMPPPO, E., 1991: Satellite image-based national forest inventory of Finland. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* 28, 419-424.
- TOMPPPO E., C. GOULDING, M. KATILA, 1999: Adapting Finnish multi-source forest inventory techniques to the New Zealand preharvest inventory. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 14, 182-192.
- TOMPPPO, E., M. HALME, 2004: Using coarse scale forest variables as ancillary information and weighting of variables in k-NN estimation: a genetic algorithm approach. *Remote Sensing of Environment* 92, 1-20.
- ZIANIS, D., P. MUUKKONEN, R. MÄKIPÄÄ, M. MENCUCCINI, 2005: Biomass and stem volume equations for tree species in Europe. *Silva Fennica Monographs* 4, 63.

Fernerkundliche Erfassung der Makrophyten im Greifswalder Bodden auf der Grundlage digitaler Luftbilddaten

GÖRRES GRENZDÖRFFER¹

Zusammenfassung: Die fernerkundliche Erfassung von Unterwasserpflanzen (Makrophyten) ist mit Hilfe moderner digitaler Luftbildkameras grundsätzlich möglich. Allerdings müssen bei der Bildflugplanung und der Datenauswertung verschiedene Aspekte beachtet werden. So ist z.B. Windstille bei der Befliegung ein wichtiges Kriterium, auch die Jahreszeit der Aufnahme bestimmt in großem Maße die Sichttiefe und damit die Kartiermöglichkeiten. Bei der Datenauswertung stoßen vollautomatische Verfahren an ihre Grenzen, da sich die Bilder aufgrund der BRDF, bzw. dem Hot-Spot Effekt und lokal unterschiedlicher Sichtverhältnisse radiometrisch unterscheiden, Deshalb in dem Beitrag ein semiautomatischer Ansatz vorgestellt.

1 Einleitung

Unterwasserpflanzen (Makrophyten) sind wesentlich an der Sedimentation, dem Gasaustausch und an der Bindung von Nährstoffen und Schwermetallen beteiligt. Sie dienen außerdem als Substrat zur Eiablage sowie dem Schutz von Jungfischen und anderen Kleintieren. Die pflanzensoziologische Studie von Geisel, 1986, die belegte, dass die Unterwasservegetation im Greifswalder Bodden seit den 30er Jahren enorm zurückgegangen ist und leitete ein Fülle nachfolgender Untersuchungen ein. Als Erfassungsmethoden zur Makrophytenerkennung im Greifswalder Bodden kamen bis 80er Jahre noch ausschließlich Tauch- und Videotransekte zum Einsatz. Danach wurden verstärkt fernerkundliche Methoden eingesetzt.

Für die Erfassung von Makrophyten in den relativ schmalen Brack- und Flachwassergebieten der Meeresküste und der sehr kleinräumigen Differenzierung der Unterwasservegetation, sind hochauflösende und flexible Aufnahmesysteme notwendig, d.h. in der Regel flugzeuggetragene Meß- oder Multispektralkameras. Bei den Arbeiten von Christke, 1996 oder auch Bartels und Kühler, 1998 kamen analoge Kameras zum Einsatz, bei denen die Georeferenzierung sehr aufwendig ist und auch die radiometrische Auflösung, d.h. die Farbwiedergabe im Vergleich zu den heutigen digitalen Messkameras geringer ist.

In der Zwischenzeit, d.h. seit dem Ende der 90er Jahre ist technologisch viel passiert. Die heutigen Sensoren arbeiten vollständig digital und sind in der Regel auch mit entsprechender inertialer Messtechnik ausgestattet, um die Georeferenzierung zu automatisieren. Während es mittlerweile eine Fülle von Luftbildfirmen mit photogrammetrischer Kameras gibt, sind Hyperspektralsysteme leider schwer verfügbar und das radiometrische und geometrisch Postprozessing ist aufwändig und zeitintensiv. Deshalb und auch aus Kostengründen kamen im Rahmen dieses Projekts eine digitale Messkamera mit einer anschließenden semiautomatischen Klassifikation zum Einsatz.

¹ Universität Rostock, Institut für Management ländlicher Räume, J.-v.-Liebig Weg 6, 18059 Rostock

2 DGM

Eine wesentliche Grundlage für die nachfolgenden Analysen zur Verteilung und Gesamtschätzung des potentiellen Laichhabitats des Rügensch Fröhjahrsherings ist ein Tiefenmodell des Greifwalder Boddens, das vom Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) zur Verfügung gestellt wurde. Die Daten wurden mit dem Höhenbezug Seekartennull geliefert, was in der Ostsee aufgrund fehlender Tide dem NormalNull (NN) der Landesvermessung in etwa entspricht. Insgesamt wurden 547088 Koordinatentripel vom BSH zur Verfügung gestellt.

Aufgrund der Erfassungsmethode der Tiefendaten via Echolot ist die Datendichte in den Flachwasserbereichen < 1m teilweise sehr gering, d.h. die Originaldaten weisen zur Küsten hin Datenlücken von z.T. mehreren 100 m auf. Um bei der nachfolgenden Interpolation keine Überschwingungen und grobe Fehler am Übergang vom Tiefenwasser in den Flachwasserbereich zu erhalten, wurden 2007 zusätzliche Tiefenpunkte aus der amtlichen Seekarte eingefügt. Die Küstenlinie wird durch die amtliche digitale Topographische Karte (ATKIS) mit einer Höhe von 0 m definiert. Die ATKIS-Grenzlinie umfasst 19909 Vertices, die als zusätzliche Punkte in die Interpolation des Tiefenmodells eingingen. Die Interpolation der Daten zu einem regelmäßigen Rastertiefenmodell erfolgte Mithilfe eines geostatistischen Ansatzes unter Verwendung der Software ArcGIS / Geospatial Analyst 9.2.

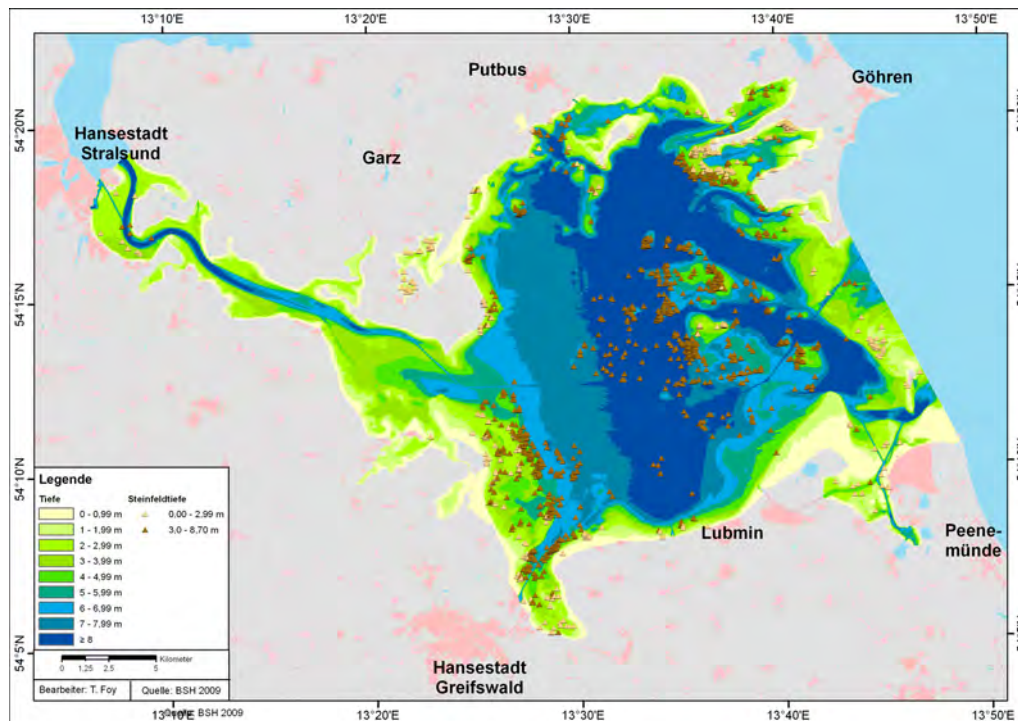


Abb. 1: Tiefenmodell des Greifwalder Boddens und des Strelasund mit Steinfeldern. Datengrundlage: BSH 2009; interpoliert auf 25mx25m-Grid.

Eine Validierung des Tiefenmodells wurde durch einen Vergleich mit Tiefenmessungen der Tauchgänge (mittl. Abweichung $\pm 13,7$ cm) und der Videobefahrungen (mittl. Abweichung $\pm 27,0$ cm) realisiert.

3 Luftbilder: Durchführung / Strategie und Methode

Der Bildflug des Untersuchungsgebiets mit der Luftbildkamera vom Typ UltraCamD erfolgte am 03.04.2009 durch die Firma Blom Deutschland GmbH bei bestem Bildflugwetter. D.h. sonniges Wetter und für eine Befliegung von Wasserflächen weit wichtiger, bei nahezu Windstille. Die mittlere Flughöhe betrug 4.500 m. Daraus resultierend ergibt sich eine reale Bodenauflösung von 40 cm. Weitere Details des Bildflugs sind der Tab. 1 **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** zu entnehmen.

Tab. 1: Technische Details des Bildflugs vom 3.4.2009 des Greifswalder Bodden 2009

Kamera	UltraCamD
Bildflugfirma	Blom Deutschland GmbH
Bildflugdatum	03.04.2009
Uhrzeit	08:06 – 09:27
Sonnenelevation über Horizont	21° – 30°
Mittlere Flughöhe	4.500 m
Bodenauflösung (real) (Pixelgröße)	40 cm x 40cm
Anzahl Flugstreifen	11
Längs- / Querüberlappung	80 % / 40 %
Abgedeckte Fläche	ca. 900 km ²
Anzahl Bilder	435
Datenvolumen (Rohdaten RGB und CIR)	418 GB
Datenvolumen (Mosaik)	40,1 GB

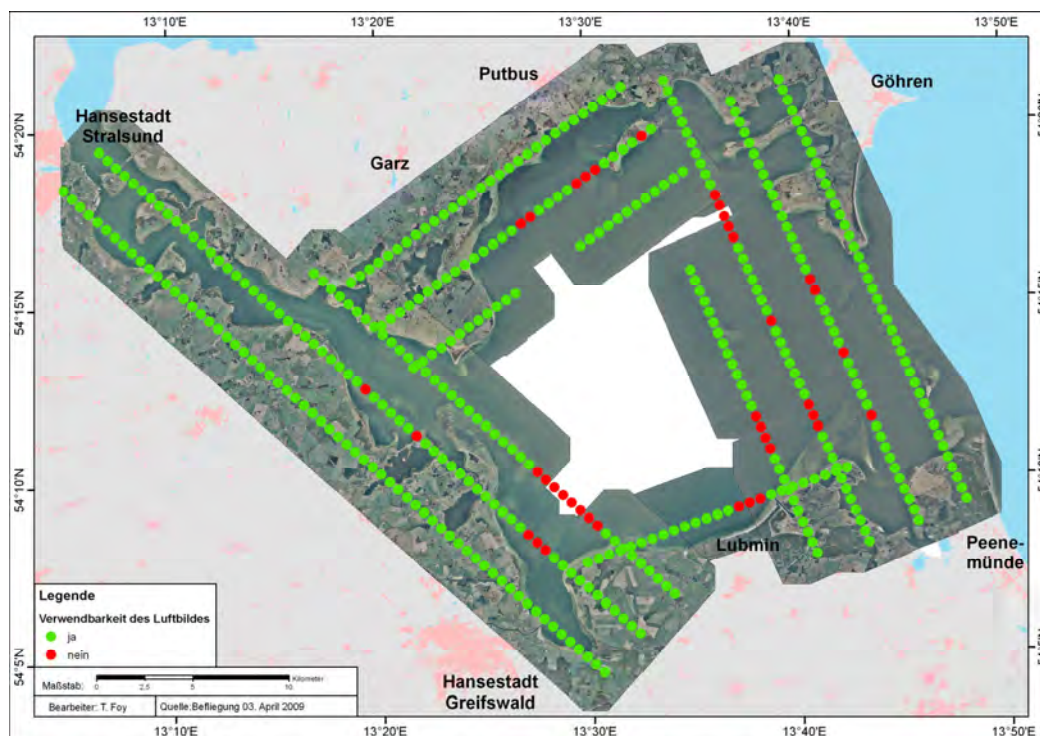


Abb. 2: Bildmittenübersicht und unterlegtes Orthophotomosaik des Bildflugs am 3.4.2009

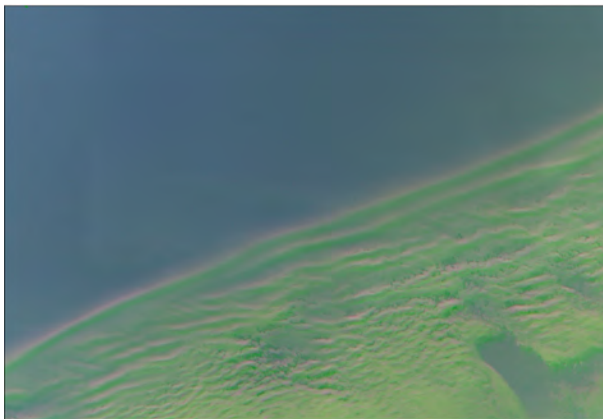
Bei dem Bildflug wurde insgesamt eine Land- und Wasserfläche von 900 km² abgedeckt, wobei der innere Bereich des Greifswalder Boddens ausgespart wurde, da aufgrund der dort vorherrschenden Wassertiefen von mehr als 5 m keine Makrophyten zu erkennen sind. Eine Übersicht des überflogenen Gebiets ist der Abb. 2 zu entnehmen. Um den Hot-Spot-Effekt zu minimieren wurde eine Längsüberlappung von 80 % und eine Querüberlappung von 40 % gewählt.

Da bei der Befliegung von Wasserflächen eine klassische indirekte Orientierung der Bilder unmöglich ist, war eine direkte Orientierung unter Verwendung eines hochgenauen GPS/INS-Systems notwendig. Zur Bestimmung der Misalignment-Winkel als Offset zwischen GPS/INS und Kamera, dem so genannten Boresite Alignment wurde ein Kalibrierfeld bei Greifswald befliegen. Unter Verwendung der dabei berechneten Korrekturparameter wurden die Projektionszentren ermittelt. Im Einzelnen wurden dem Auftraggeber die Koordinaten X, Y und Z der Projektionszentren sowie die Drehwinkel Omega, Phi und Kappa der äußeren Orientierung zur Verfügung gestellt. Der Erwartungswert der Genauigkeit der direkten Orientierung lag bei dem Projekt bei ca. 1 m im Objektraum. Dieser konnte auch durch Vergleichsmessungen bestätigt werden. Die Bilder wurden sowohl als Echtfarben (RGB) als auch als Color-Infrarot (CIR) geliefert. Die CIR Daten wurden für die visuelle Interpretation / Klassifikation der Unterwasservegetation nicht weiter verwendet, da das Wasser das nahinfrarote Licht weitestgehend absorbiert und somit keine zusätzlichen Informationen aus dem NIR-Kanal gewonnen werden konnten.

3.1 Datenqualität der Bildflugdaten

Im Anschluss an die Datenlieferung wurde die Bildqualität einerseits visuell überprüft und die Geometrie anhand von Referenzbildern verglichen. Dabei ergaben sich folgende Probleme:

Aufgrund von Matching Problemen bei der Vorprozessierung zwischen dem panchromatischen Bild und den vier Farbkanälen kam es bei mehreren Bildern zu großflächigen Fehlern bei der Farbzunordnung. In der Praxis führt das dazu, dass z.B. eine Sandbank mehrfach und versetzt abgebildet wird, einmal in Rot, einmal in Grün und einmal in Blau, siehe Abb. ??.



Ausschnitt Bild 118 mit Farbfehler durch fehlerhaftes Matching der Farbkanäle



Ausschnitt Bild 119 ohne Farbfehler

Dieser Fehler kann vor allem bei sehr gering texturierten Flächen, wie sehr gleichmäßigen Wasserflächen auftreten und variiert darüber hinaus in den Bildern. Leider kann der Fehler aus der Vorprozessierung durch das Bildflugunternehmen nicht mehr korrigiert werden, da die Prozessierungsschritte vollautomatisch ohne Interaktionsmöglichkeiten durchlaufen werden. Im Ergeb-

nis waren 39 Bilder für die weitere Datenverarbeitung nicht verwendbar. Aufgrund der hohen Längsüberlappung von 80 % konnten die Ausfälle der einzelnen Bilder in der Regel kompensiert werden, so dass für die weiteren Verfahrensschritte nahezu fehlerfreie Bildmosaik zur Verfügung standen.

Bei Objekten mit einer glatten Oberfläche, wie z.B. Eis- oder Wasserflächen ist häufig ein vorwärts gerichtetes Maximum der Reflexion im Sinne einer spiegelnden Reflexion zu beobachten. Falls der Sensor die Sonnenspur kreuzt und der Einfallswinkel gleich dem Ausfallswinkel ist, wird der Abbildungsort überbelichtet. Es bildet sich ein Hot Spot. Einen großen Einfluss auf den Hot-Spot Effekt haben Sonnenstand und Öffnungswinkel der Kamera. Während bei einem niedrigen Sonnenstand und einem schmalen Öffnungswinkel der Hot Spot-Effekt nicht auftreten kann, so ist er bei einem hohen Sonnenstand und einem großen Öffnungswinkel der Kamera immer gegenwärtig. Die Überstrahlung macht sich insbesondere über Wasserflächen bemerkbar.

Obschon die Befliegung in den Morgenstunden bei einer Sonnenelevation von $21^\circ - 30^\circ$ stattgefunden hat, ist der Hot Spot Effekt zu bemerken, der innerhalb eines Bildes zu unterschiedlichen Grauwerten des gleichen Objekts führt. Eine rechnerische Atmosphärenkorrektur auf der Grundlage eines komplexen Atmosphärenmodells ist bei dem UltraCam Sensor ohne aufwändige Kalibrierung nicht möglich. Aus diesem Grunde wurde mit dem in der Photogrammetrie üblichen Verfahrens des Image Dodgings ein radiometrischer Ausgleich zwischen den Bildern erreicht. Dabei werden die sich stark überlappenden Bilder in mehrere Sektoren unterteilt und anschließend radiometrisch ausgeglichen. Bei den verschiedenen manuellen Einstellungsmöglichkeiten ist viel praktische Erfahrung gefragt, um ein möglichst homogenes und gleichzeitig kontrastreiches Bildmosaik zu erzeugen.

3.2 Orthophotomosaik

Nach der Selektion der geeigneten Bilder wurden Orthophotomosaiken berechnet. Aus Performancegründen und aufgrund des unterschiedlichen Einflusses des Hot Spot Effekts sind vier Teilblöcke (Nord, Ost, Süd und West) berechnet worden. Das für eine Orthophotoberechnung notwendige digitale Geländemodell entstammt aus: a) für den landseitigen Teil aus dem Digitalen Geländemodell 25 (DGM25) des Amt für Geoinformation, Vermessungs- und Katasterwesen MV (LAIv) und b) für den wasserseitigen Teil aus dem Tiefenmodell des BSH. Die Erzeugung der Orthophotomosaiken erfolgte mit der Software Erdas Imagine 9.3. Die Berechnung der Schnittkanten benachbarter Bilder erfolgte automatisch, da nur die Wasserflächen von Interesse waren.

4 Semiautomatische Luftbildanalyse

Das Ziel der semiautomatischen Luftbildanalyse, ergänzt in Ergänzung durch die Tauch- und Videotranssekte, ist die Ermittlung der von Makrophyten bedeckten Fläche Bedeckungsgrades des im Greifswalder Boddens mit Makrophyten. zum Zeitpunkt des Heringslaichens. Damit unterscheidet sich das Ziel geringfügig von früheren Untersuchungen, z.B. BARTELS UND KLÜBER, 1998, CHRISTKE, 1996 bei denen es um die Erfassung des Bedeckungsgrades durch Makrophyten insgesamt ging, d.h. die maximale Ausbreitung von Makrophyten. Dies ist insofern von Bedeutung, als der Zeitpunkt der Makrophytenerfassung einen entscheidenden Einfluss auf die Biomasse, bzw. die bewachsene Fläche hat.

4.1 Rahmenbedingungen und Hintergrund

Makrophyten lassen sich in Abhängigkeit von ihrem phänologischen Zustand, der Tages- und Jahreszeit unterschiedlich gut differenzieren. Aus phänologischer Sicht lassen sich die Makrophyten am besten in der Zeit der maximalen vegetativen Entwicklung unterscheiden, d.h. in den Monaten Juni – August. Dem stehen aber die gleichfalls starke Entwicklung der Epiphyten und die Massenentwicklung von Phytoplankton in diesen Monaten entgegen. Außerdem interessiert für die Fragestellung des Vorkommens von Makrophyten als Laichhabitat für den Frühjahrsheering der Zeitpunkt Ende April / Anfang Mai. Dieser Zeitpunkt nach der ersten Blaualgblüte stellt in der Regel einen guten Kompromiss zwischen einer ausreichend fortgeschrittenen Entwicklung der Makrophyten, einer hinreichend großen Sichttiefe und einer relativ geringen Ausbreitung der Epiphyten dar. Die geringen Wassertemperaturen und die lange Eisbedeckung führten im Jahr 2009 allerdings zu einer sehr zögerlichen Vegetationsentwicklung im Greifswalder bis zum Aufnahmezeitpunkt Anfang April.

Die luftbildgestützte Erkennung von Unterwasservegetation ist in erster Linie durch die Sichttiefe des Wassers limitiert. Die Sichttiefe des Wassers im Greifswalder Bodden nimmt im Laufe des Frühjahrs deutlich ab. Ursache dafür ist die zunehmende Konzentration von Plankton in der Wassersäule. Die Luftbildaufnahme am 03.04.2009 fand während einer stabilen Wetterlage statt, so dass die durch das vTI-OSF am 31.3.2009 gemessenen Werte der Sichttiefe für das Befliegungsdatum einen sehr guten Anhaltspunkt liefern. Am 31.03.2009 lag die Sichttiefe im Mittel bei über 4 m, was verglichen mit dem langjährigen Mittel (ca. 2.3 m) als sehr gut einzustufen ist. Die Unterschiede der Sichttiefe innerhalb des Greifswalder Boddens zwischen 3 und 5 m führen dazu, dass die untere Grenze von in den Luftbildern klassifizierbaren Makrophyten variiert. Die für die Luftbildkartierung mögliche Maximaltiefe liegt in der Regel unter der jeweiligen Secchitiefe liegt, denn die Reflektanz der Vegetation ist deutlich geringer als die der Secchi Disk.

Bei der luftbildgestützten Klassifikation Ermittlung des Bedeckungsgrades durch Klassifikation der Unterwasservegetation/Makrophytender Unterwasservegetation des Greifswalder Boddens sind mehrere Rahmenbedingungen zu beachten:

1. Bei der dieser Klassifikation wird immer eine Ja/Nein-Entscheidung getroffen. Um diese sicher treffen zu können ist ein bestimmter Bedeckungsgrad der Vegetation notwendig. Dieser Mindestbedeckungsgrad ist wiederum vom Untergrund, der Trübung und der Wassertiefe abhängig, denn nur wenn sich das Vegetationssignal gegenüber seiner Umgebung abhebt kann es als solches klassifiziert werden. Der Mindestbedeckungsgrad liegt bei ca. 10 – 30 % bedeckter Fläche, je nach Untergrund, Wassertiefe und Makrophytenart.
2. Ein wichtiges Kriterium bei einer Klassifikation bzw. Kartierung ist die Mindest erfassungsfläche, d.h. die Mindestgröße einer Fläche, die notwendig ist, um ein Objekt im Luftbild sicher als Vegetationsfläche kartiert zu werden. Die Mindest erfassungsfläche hängt zum einen vom Zielmaßstab der Auswertung ab und zum anderen von der Qualität des Bildmaterials. Im vorliegenden Fall muss zwischen zwei verschiedenen Mindest erfassungsflächen unterschieden werden. Zum einen werden einzelne Pixel bei der automatischen Filterung der Klassifikationsergebnisse eliminiert und zum anderen wird bei der visuellen Qualitätskontrolle ein Zielmaßstab von 1 : 5.000 angenommen, was eine resultierende Mindest erfassungsfläche von 10 m² ergibt. D.h. Fehlklassifikationen werden ab einer Fläche von mehr als 10 m² korrigiert.
3. Mit zunehmender Wassertiefe wird eine Trennung zwischen dem Untergrund und Vegetation immer schwieriger und unzuverlässiger. Aus diesem Grund wurden in den tieferen Bereichen

nur bei eindeutigen Vegetationssignalen, diese auch entsprechend klassifiziert. Das trifft insbesondere auf vegetationsbestandene Steinfelder zu, bei denen der Kontrast zwischen bewachsenen und unbewachsenen Bereichen Vegetation und nicht Vegetation eindeutig ist.

4. Die Grauwertunterschiede zwischen Vegetation und nicht vegetationsbestandenen Flächen sind generell sehr gering. D.h. wenige Grauwerte unterscheiden zwischen Vegetation und Nichtvegetation. Um Fehlklassifikationen zu vermeiden sind unsichere Bereiche als nicht vegetationsbestandene Flächen klassifiziert bzw. manuell bei der Qualitätskontrolle gelöscht worden. Im Ergebnis ist die vorliegende Klassifizierung deshalb als eher konservativ einzuschätzen.

4.2 Verfahren der semiautomatischen Luftbildanalyse

Die Klassifikation der Makrophyten aus den Orthophotomosaike erfolgte in mehreren Schritten semiautomatisch. In einem ersten Schritt wurden Trainingsgebiete mit Makrophyten definiert. Bei der Suche geeigneter Trainingsgebiete wurden die Ergebnisse der Tauchtransekte und der Videobefahrungen intensiv genutzt. Die spektralen Eigenschaften der ermittelten Trainingsgebiete wurden über einen Region Growing Ansatz definiert. Anschließend wurde der Objektraum, d.h. das Bild nach ähnlichen Spektralwerten untersucht und das Ergebnis einer Klasse (Algen_1 – Algen_n) zugeordnet. Aufgrund der verschiedenen spektralen Ausprägungen von Makrophyten wurden pro Bildausschnitt 5 – 8 verschiedene Makrophytenklassen gebildet. Eine Zuordnung der Klassen zu bestimmten Makrophytenarten erfolgte nicht. Die einzelnen Klassen wurden anschließend zu einer Gesamtklasse Makrophyten zusammengefasst.

Anschließend sind Splitterflächen einzelner Pixel durch ein Medianfilter und einen anschließenden morphologischen Filter (Erosion / Dilation) eliminiert worden. Die bis dahin im Rasterformat vorliegenden Daten wurden in nun eine Vektordatei überführt. Nach diesen automatisierten Arbeitsschritten fand eine visuelle Qualitätskontrolle statt, in der Fehlklassifikationen manuell bereinigt wurden. Dabei wurden Fehlklassifikationen von $> 10 \text{ m}^2$ manuell bereinigt. Abschließend sind die Klassifikationsergebnisse der 31 Gebiete zu einem Gesamtergebnis zusammengeführt worden, das dann alle klassifizierten und validierten Makrophytenflächen enthält.

5 Ergebnisse

5.1 Ergebnisse der semiautomatischen Luftbildanalyse

Die aus den Luftbildern kartierten Flächen sind in der Abb. 3 zusammengefasst. Anhand der einblendeten 3 m Tiefenlinie wird deutlich, dass ein Großteil der Flachwasserbereiche mit Makrophyten bestanden sind.

6 Abschätzung der Klassifikationsgenauigkeit

Im Allgemeinen kann zur Genauigkeitsabschätzung von multispektralen Klassifikationen zwischen vier verschiedenen Stufen unterschieden werden:

1. Visuelle Beurteilung der Klassifikationsgenauigkeit
2. Vergleich von Flächengrößen ohne Berücksichtigung ihrer Lage: durch Klassifikation abgeleitete Flächen mit einem Referenzdatensatz („GroundTruth“)

3. Verhältnisbildung zwischen der Anzahl an korrekt klassifizierten Pixeln zur Gesamtanzahl der betrachteten Pixel
4. Einsatz von Konfusionsmatrizen zur Ableitung weiterer Genauigkeitsmaße (nicht nur einfaches Verhältnis)

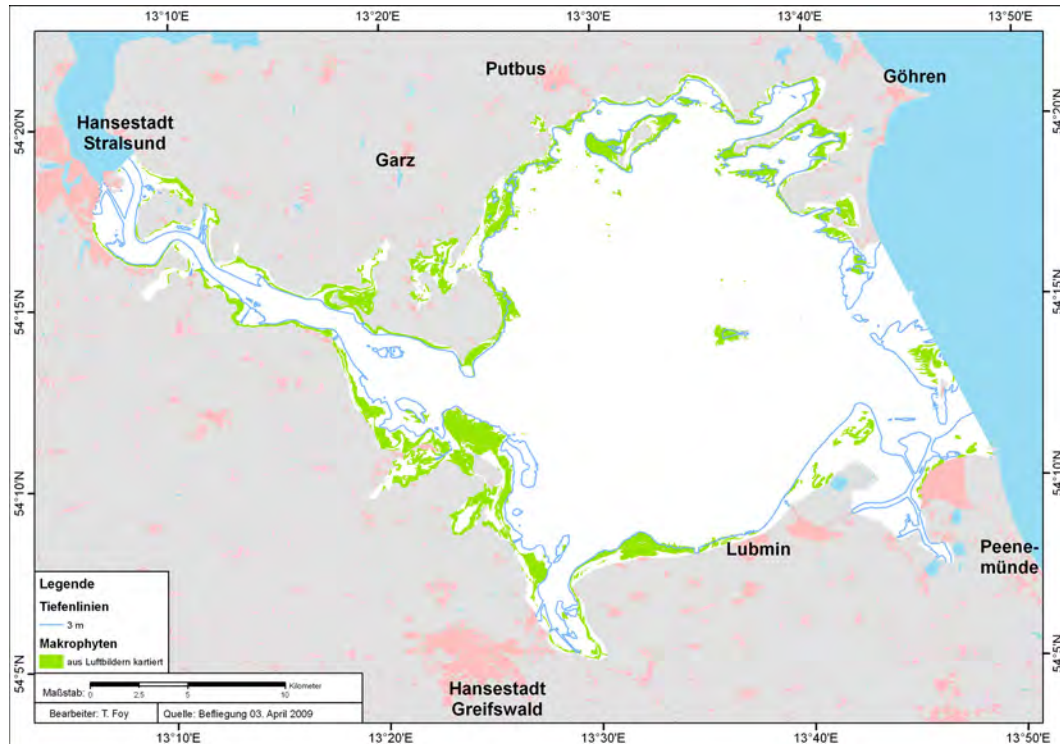


Abb. 3: Kartierte Makrophytenflächen aus dem Orthophotomosaik im Greifswalder Bodden. Darstellung der 3 m Tiefenlinie

Die visuelle Kontrolle ist ein subjektives Verfahren und stark abhängig vom Vorwissen/-bildung des Auswerters. („it looks good“). Jedoch liefert die visuelle Kontrolle wichtige Eindrücke über die Plausibilität der erreichten Ergebnisse. Der Vergleich mit Referenzdaten aus den Videobefahrungen und den Tauchtransekten zeigt eine gute Übereinstimmung zwischen der semiautomatische Klassifikation und den Referenzdaten.

7 Literaturverzeichnis

BARTELS, S., KLÜBER, U. (1998) Die räumliche Verbreitung des Makrophytobenthos und seine Akkumulation von Nährstoffen und Schwermetallen. Teil 1: Erfassung des Bedeckungsgrades des Greifswalder Boddens mit submersen Makrophyten. Greifsw. Geograph. Arb., 16: 316–325.

CHRISTKE, K. (1996): Remote Sensing and GIS-Technology for Evaluation of Macrophytes in the Greifswalder Bodden. Int. Arch. Photogramm. Remote Sens., 31 (B7): 142–145.

GEISEL, T. (1986): Pflanzensoziologische Untersuchung am Makrophytobenthos des Greifswalder Boddens. Diploma thesis. University of Rostock, Rostock: 95 S.

Satellitengestützte Waldflächenkartierung für die deutsche Treibhausgasberichterstattung

KATJA OEHMICHEN¹

Im Rahmen der UNFCCC-Klimaberichterstattung wurde ein nationales Berichtssystem entwickelt, mit dem die Emissionen von Treibhausgasen der deutschen Wälder erfasst werden. Im Fokus der Treibhausgasberichterstattung steht die Änderung des Kohlenstoffvorrates in den fünf Bereichen oberirdische Biomasse, unterirdische Biomasse, Totholz, Streu und Boden. Ein entscheidender Parameter für die Ermittlung der Kohlenstoffemissionen ist dabei die Waldfläche. Mit dieser Arbeit wird ein aus terrestrischen Daten und satellitengestützter Erdbeobachtung kombiniertes Verfahren vorgestellt, mit dem Wald- und Nichtwaldflächen kartiert werden können. Die Datengrundlage bilden Satellitenszenen der Sensoren Landsat 7 und Quickbird und die auf Stichprobenbasis erhobenen Informationen der terrestrischen Bundeswaldinventur (BWI). Dieses Verfahren zur Erstellung von Waldmasken nach der internationalen Walddefinition des Kyoto-Protokolls wurde auf rund 28 % der deutschen Waldfläche durchgeführt, um damit eine für Deutschland geltende Aussage ableiten zu können. Die Gesamtgenauigkeiten der weitestgehend automatisiert erstellten Waldmasken für die Untersuchungsgebiete liegen zwischen 92 % und 96 %. Im Weiteren wurden die Kartiererergebnisse der Sensoren Landsat 7- und Quickbird miteinander verglichen.

1 Einleitung

Mit der Berichterstattung nach der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen (UNFCCC) und dem Kyoto-Protokoll unter den Artikeln 3.3 und 3.4 ist Deutschland verpflichtet, die Freisetzung und Festlegung von Treibhausgasen in den Wäldern Deutschlands in einem nationalen System zu erfassen und zu berichten. Die Emissionsberichterstattung basiert auf dem Ansatz der Landnutzungskategorien, wobei eine Unterteilung in die sechs Kategorien Wald, Ackerland, Grünland, Feuchtland, Siedlungen und andere Landnutzungen erfolgt. Um die Veränderungen der Landnutzungsformen erfassen zu können und die Historie der Landnutzungen zu verfolgen, werden diese noch weiter unterteilt. Dabei werden gleichbleibende Landnutzungen, wie verbleibende Waldflächen, und Umwandlungen der Landnutzungskategorien, wie beispielsweise Neuwald, d. h. Flächen die durch Aufforstung oder natürliche Sukzession auf zuvor anderweitig genutzten Flächen entstanden sind, sowie der umgekehrte Fall, d. h. Umwandlung von Wald in andere Landnutzungsklassen, also Entwaldung, unterschieden. Die Grundlage für die Berichterstattung des Waldes bildet die Ermittlung der Waldflächen und der waldbezogenen Landnutzungsänderungen, da diese als Aktivitätsdaten in die Emissionsberechnung einfließen. Basierend auf diesen Flächenangaben werden die Treibhausgasemissionen in Form von Senken oder Quellen für die

1) Katja Oehmichen, Institut für Waldökologie und Waldinventuren, Johann Heinrich von Thünen-Institut, Bundesforschungsinstitut für Ländliche Räume, Wald und Fischerei, Alfred-Möller-Str. 1, D-16225 Eberswalde, E-Mail: katja.oehmichen@vti.bund.de

folgenden fünf Bereiche, die als „Pools“ bezeichnet werden, ausgewiesen: oberirdische Biomasse, unterirdische Biomasse, Totholz, Streu und Boden. Für die Herleitung der Schlüsselgröße Waldfläche wurde daher ein aus terrestrischen Daten und satellitengestützter Erdbeobachtung kombinierter Ansatz untersucht, mit dem Wald- und Nichtwaldflächen kartiert werden können.

2 Daten und Untersuchungsgebiete

Als Datenquellen wurden die terrestrischen Informationen der zweiten Bundeswaldinventur (BWI 2), die zwischen 2000 bis 2002 erhoben wurden, und Satellitenszenen der Sensoren Landsat 7 und Quickbird verwendet. Die modifizierten Landsatszenen (multispektrale Auflösung: 25 m, panchromatische Auflösung: 12,5 m) wurden zwischen 1999 und 2001 aufgenommen. Die Quickbirdszenen (multispektrale Auflösung: 2,4 m, panchromatische Auflösung: 0,6 m), die eine Fläche von rund 580 km² des Untersuchungsgebietes Pfälzerwald abdeckt, stammt aus dem Jahr 2004. Die Genauigkeit der Georeferenzierung der Satellitendaten liegt im akzeptablen Subpixelbereich. Als zusätzlicher Parameter wurde der Vegetationsindex NDVI berechnet und zur Waldmaskenerstellung hinzugezogen. Daneben wurden weitere digitale Daten, wie Orthofotos, topographische Karten und digitale Landschaftsmodelle in das Verfahren integriert.

Die Auswahl der fünf Untersuchungsgebiete (UG) erfolgte nach verschiedenen Kriterien in Hinblick auf die Walddefinition (Abb. 1). Dazu gehörten u. a. unterschiedliche Altersklassen, Mischungsformen, Bestockungs- und Überschirmungsgrad, Bestandesstruktur, Abdeckung der Hauptbaumarten, unterschiedliche Verteilung der Waldflächen und Berücksichtigung der unterschiedlicher Stichprobendichten der terrestrischen Erhebung der BWI. Mit einer Gesamtfläche von 30.850 km² der Untersuchungsgebiete wurden 28 % des Waldes in Deutschland abgedeckt.

3 Methodik

Der Ausgangspunkt für die Ausweisung der Waldflächen für die Klimaberichterstattung ist die von Deutschland im Rahmen der Marrakesh Accords gewählte Walddefinition (UBA 2006). Diese Walddefinition weicht nur geringfügig von der der nationalen Waldinventur ab (POLLEY ET AL. 2010, TOMTER ET AL. 2010), so dass Wald nach der BWI-Walddefinition ermittelt wird (BMVEL 2001). Demnach ist Wald im Sinne der BWI jede mit Forstpflanzen bestockte Grundfläche. Als Wald gelten auch kahl geschlagene oder verlichtete Grundflächen, Waldwege, Waldeinteilungs- und Sicherungstreifen, Waldblößen und Lichtungen, Waldwiesen, Wildäsungsplätze, Holzlagerplätze, im Wald gelegene Leitungsschneisen, weitere mit dem Wald verbundene und ihm dienende Flächen einschließlich Flächen mit Erholungseinrichtungen, zugewachsene Heiden und Moore, zugewachsene ehemalige Weiden, Almflächen und Hutungen sowie Latschen- und Grünerlenflächen. Heiden, Moore, Weiden, Almflächen und Hutungen gelten als zugewachsen, wenn die natürlich aufgekommene Bestockung ein durchschnittliches Alter von fünf Jahren erreicht hat und wenn mindestens 50 % der Fläche bestockt sind. In der Flur oder im bebauten Gebiet gelegene bestockte Flächen unter 1.000 m², Gehölzstreifen unter

10 m Breite und Weihnachtsbaum- und Schmuckreisigkulturen sowie zum Wohnbereich gehörende Parkanlagen sind nicht Wald im Sinne der BWI. Wasserläufe bis 5 m Breite unterbrechen nicht den Zusammenhang einer Waldfläche (BMVEL 2001).

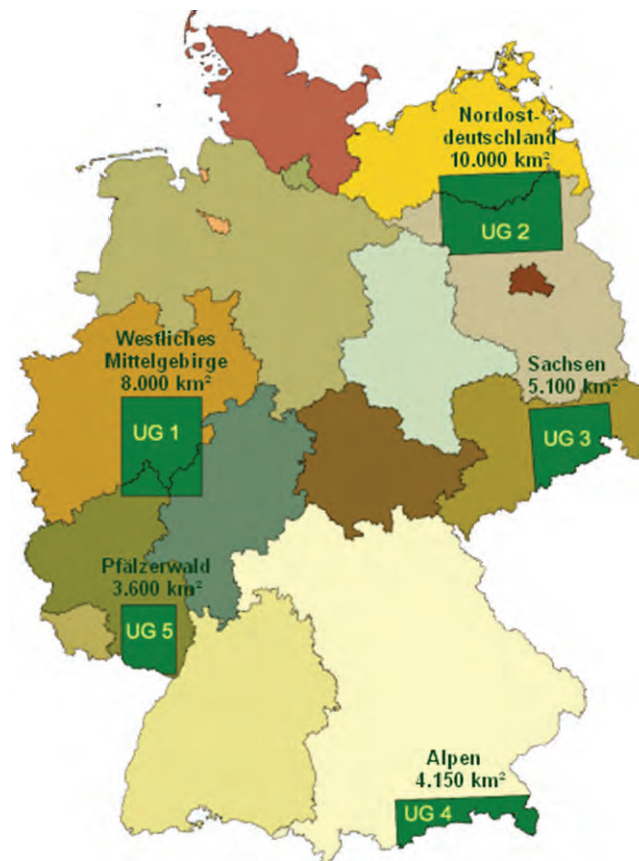


Abb. 1: Lage und Größe der Untersuchungsgebiete

4 Methodik

Der Ausgangspunkt für die Ausweisung der Waldflächen für die Klimaberichterstattung ist die von Deutschland im Rahmen der Marrakesh Accords gewählte Walddefinition (UBA 2006). Diese Walddefinition weicht nur geringfügig von der der nationalen Waldinventur ab (POLLEY ET AL. 2010, TOMTER ET AL. 2010), so dass Wald nach der BWI-Walddefinition ermittelt wird (BMVEL 2001). Demnach ist Wald im Sinne der BWI jede mit Forstpflanzen bestockte Grundfläche. Als Wald gelten auch kahl geschlagene oder verlichtete Grundflächen, Waldwege, Waldeinteilungs- und Sicherungstreifen, Waldblößen und Lichtungen, Waldwiesen, Wildäsungsplätze, Holzlagerplätze, im Wald gelegene Leitungsschneisen, weitere mit dem Wald verbundene und ihm dienende Flächen einschließlich Flächen mit Erholungseinrichtungen, zugewachsene Heiden und Moore, zugewachsene ehemalige Weiden, Almflächen und Hutungen sowie Latschen- und Grünerlenflächen. Heiden, Moore, Weiden, Almflächen und Hutungen gelten als zugewachsen, wenn die natürlich aufgekommene Bestockung ein durchschnittliches

Alter von fünf Jahren erreicht hat und wenn mindestens 50 % der Fläche bestockt sind. In der Flur oder im bebauten Gebiet gelegene bestockte Flächen unter 1.000 m², Gehölzstreifen unter 10 m Breite und Weihnachtsbaum- und Schmuckreisigkulturen sowie zum Wohnbereich gehörende Parkanlagen sind nicht Wald im Sinne der BWI. Wasserläufe bis 5 m Breite unterbrechen nicht den Zusammenhang einer Waldfläche (BMVEL 2001).

4.1 Spektralwertextraktion

Die BWI-Walddefinition bildet die Basis und ist gleichermaßen das Ziel für die Erstellung der Waldmasken. Zur Erfassung des spektralen Bereiches des Waldes und des Nichtwaldes wurden repräsentative Referenzflächen in Form der erhobenen Wald- und Nichtwaldinformationen der BWI 2 ausgewählt und den Klassen „Wald“ und „Nichtwald“ zugeordnet. Der Wald nach BWI-Definition kann einerseits durch das Reflexionsverhalten von Bäumen anhand bestockter Holzbodenflächen wiedergegeben werden, die im Weiteren als Holzboden bezeichnet werden. Andererseits umfasst der Wald ebenso nicht bestockte Flächen, wie Waldwege, Holzlagerplätze, Wildwiesen und Wildäcker sowie im Wald gelegene Felsen, Blockhalden, Kiesflächen und Gewässer. Diese Flächen differenzieren sich aufgrund ihrer spektralen Eigenschaften deutlich vom bestockten Holzboden und sind zugleich den Nichtwaldsignaturen sehr ähnlich. Deshalb wurden sie durch die Verwendung zusätzlicher Daten in weiteren Verfahrensschritten bei der Ausweisung als Waldflächen berücksichtigt. Die Extraktion der spektralen Werte aus den Satellitenbildern erfolgte über die Verknüpfung der BWI-Punkte mit deren Koordinaten.

4.2 Iteratives Schwellenwertverfahren

Als effektive Methode zur Klassifizierung von Satellitendaten hat sich das Schwellenwertverfahren erwiesen. Dabei werden aus den spektralen Signaturen des Holzbodens für jeden betrachteten Kanal k eine untere Grenze $G_u(k)$ und eine obere Grenze $G_o(k)$ festgelegt. Anschließend wird für jedes Pixel geprüft, ob es in allen Kanälen innerhalb der definierten Grenzen liegt. Ist dies der Fall, wird es als Holzboden deklariert, andernfalls als Nichtwald. Dabei wird die Zielstellung verfolgt, eine optimale Zuweisung der Signaturen in eine der beiden Objektklassen mit einer minimalen Fehlklassifizierungsrate zu erreichen. Dieses methodisch einfache Schwellenwertverfahren wurde für die Stratifizierung der Satellitendaten in Holzboden und Nichtwald zu einem iterativen Schwellenwertverfahren weiterentwickelt. Ausgehend von der Annahme einer 95%igen Genauigkeit (Abb. 2) wurden nach Gleichung 1 schrittweise bessere Schwellenwerte erreicht. Von der bisher besten Schwellenwertkombination wird per Zufall eine Grenze ausgewählt und für diese alle zulässigen Varianten durchgerechnet. Ergibt eine der Varianten eine höhere Genauigkeit als die bisher beste Kombination, wird sie gespeichert. Dieser Vorgang der iterativen Verbesserung wird solange wiederholt, bis keine weitere Steigerung der Genauigkeit zu beobachten ist. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass sich das nach circa 1.000 Iterationen gefundene Optimum nicht mehr verbessern lässt. Die Ermittlung der Schwellenwerte nach diesem Verfahren erfolgte mittels der dafür entwickelten Software EstimateThreshold (OEHMICHEN & WILLKOMMEN 2004), in der zusätzlich ein Verfahren zur Genauigkeitsanalyse implementiert ist.

$$(1) \quad \begin{aligned} G_u(k) &= \mu(k) - 2\sigma(k) \\ G_o(k) &= \mu(k) + 2\sigma(k) \end{aligned}$$

mit

$$\mu(k) = \frac{\sum_{i=1}^n HB_i(k)}{n}$$

$$\sigma(k) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (HB_i(k) - \mu(k))^2}{n^2}}$$

mit

- Gu = untere Grenze
- Go = obere Grenze
- k = Kanal
- μ = Mittelwert
- σ = Standardabweichung
- HB_i = Wert des i-ten Holzbodenreferenzpunktes
- n = Stichprobenumfang

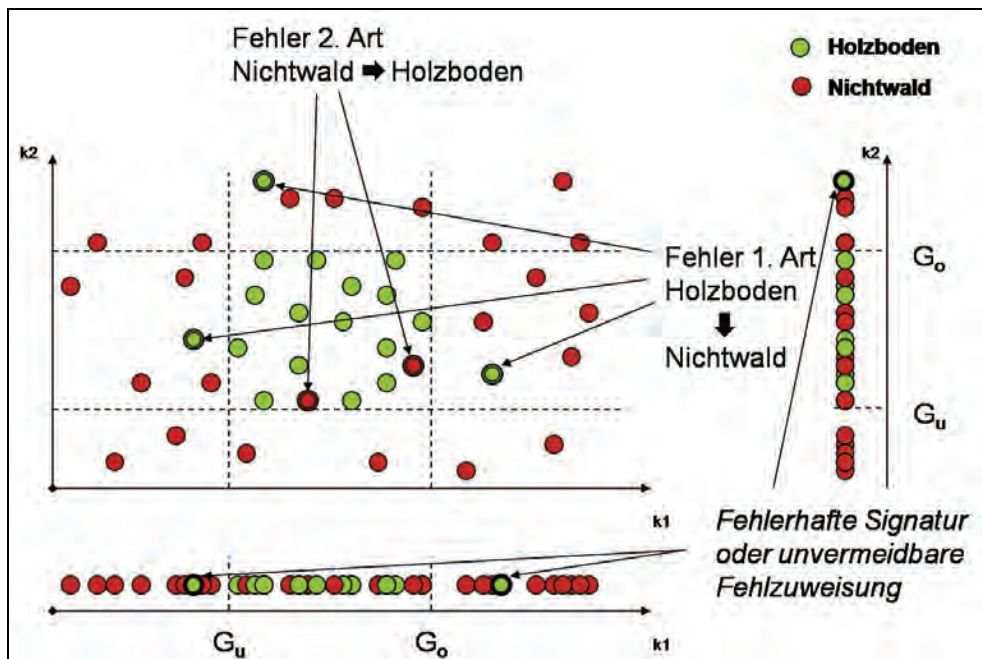


Abb. 2: Schwellenwertermittlung unter Annahme der 95%igen Genauigkeit

4.3 Waldmaskenerstellung

Mit den ermittelten Schwellenwerten wurden binäre Holzbodenmasken erstellt, die an die BWI-Waldefinition angepasst wurden. Die einzelnen Adaptionsschritte umfassen beispielsweise die Eliminierung von Holzbodenflächen die kleiner als 1.000 m² sind, da diese nicht die laut BWI-Waldefinition geforderte Mindestgröße bestockter Flächen erreichen. Daneben waren u. a. auch Korrekturen kleiner Nichtwaldflächen innerhalb der Holzbodenmasken sowie die Kontrolle und gegebenenfalls Überarbeitung von verschneidungsbedingten Lageabweichungen erforderlich. Zur Einschätzung der Qualität der Waldmaske wurde abschließend eine Validierung der erzielten Klassifikationsergebnisse durchgeführt, wobei statistische Kenngrößen wie Gesamtgenauigkeiten, Kappa-Koeffizienten (ALTMANN 1991, KOMAGATA 2002) und Vertrauensintervalle (FREUND 1992) analysiert wurden.

5 Ergebnisse

Für die Kartierung der Wald- und Nichtwaldflächen mit dem iterativen Schwellenwertverfahren wurden Gesamtgenauigkeiten zwischen 92,46 % und 96,01 % für die Landsat 7-Waldmasken erreicht, wofür BWI-Punkte als Referenz hinzugezogen wurden. Die Genauigkeitsanalyse der Quickbird-Waldmaske ergab eine leicht höhere Übereinstimmung zwischen Klassifikationsergebnis und Referenzdaten, die bei 96,39 % lag. Die erzielten guten bis sehr guten Genauigkeiten werden auch durch deren Lage in den Vertrauensintervallen belegt (Tab. 1).

Tab. 1: Übersicht zu den Gesamtgenauigkeiten und Vertrauensintervallen der Landsat 7- und Quickbird-Waldmasken

Waldmaske des Untersuchungsgebietes	Gesamtgenauigkeit	Vertrauensintervall nach FREUND (1992)	
		untere Grenze	obere Grenze
Westliches Mittelgebirge	92,75%	91,71%	93,68%
Nordostdeutschland	96,01%	95,38%	96,56%
Sachsen	95,47%	94,58%	96,23%
Alpen	92,46%	90,61%	93,97%
Pfälzerwald (Landsat 7)	95,17%	94,41%	95,83%
Pfälzerwald (Quickbird)	96,39%	94,54%	97,62%

Für das Untersuchungsgebiet Sachsen wurde ein Vergleich der Waldflächen anhand verschiedener Datenquellen durchgeführt. Aus den Ergebnissen der Flächenbilanz (Tab. 2) geht die auf Basis der BWI-Daten ermittelte Waldfläche mit einem Waldanteil von 29,68 % und einer Waldfläche von 147.789 ha als größte hervor. Die mittels Fernerkundung erkannte Fläche der Holzbodenmaske ist mit 143.433 ha kleiner. Nach der Adaption der binären Holzbodenmaske an die BWI-Waldefinition reduziert sich die Waldfläche auf 140.975 ha. Damit stellt diese Waldmaske die geringste Waldfläche dar. Allerdings ist diese Flächenbilanz nur ein summarischer Vergleich der Gesamtwaldfläche ohne Lagebezug. Das schließt nicht aus, dass im

Detail Lageabweichungen zwischen dem Wald laut BWI und der Waldmaske vorhanden sein können.

Tab. 2: Übersicht Flächenbilanz für das UG Sachsen

Datengrundlage	Waldfläche [ha]	Waldanteil [%]	Gesamtfläche [ha]
Waldmaske	140.975	28,31	498.016
Vegetationslayer (TK)	141.126	28,34	498.016
Holzbodenmaske	143.433	28,80	498.016
BWI-Wald	147.789	29,68	498.016

Der Vergleich der Sensoren Landsat 7 und Quickbird im Untersuchungsgebiet Pfälzerwald anhand der Waldmasken ergab mit 96.39 % eine um 1.38 % höhere Verifizierungsgenauigkeit der Quickbird-Waldmaske. Aus der höheren Auflösung der Quickbird-Daten resultiert eine höhere Detailschärfe, die sich u. a. an den Grenzen zwischen den Objektklassen Wald und Nichtwald zeigt. Dadurch wird eine präzisere Abgrenzung möglich und der in der Landsat-Maske sichtbare „Stufen-Effekt“ ist deutlich reduziert (Abb. 3). Die Stärken des hochauflösenden Sensors kommen insbesondere bei kleinräumigen Auswertungen zum Tragen, wie bei der Detektierung von Freiflächen minimaler Ausdehnung oder der exakten Erkennung von Waldrändern, die jedoch mit der gegebenen Zielstellung nicht ausgeschöpft wurden.

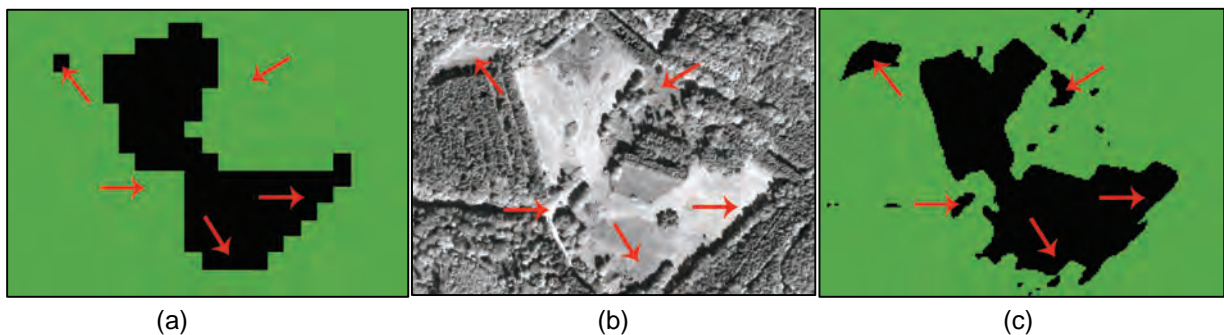


Abb. 3: Vergleich der Waldmasken eines Ausschnittes des UG Pfälzerwald: a) Landsat 7-Waldmaske (grün-Wald, schwarz-Nichtwald), c) Quickbird-Waldmaske, b) Referenz: panchromatisches Quickbird-Bild

6 Diskussion

Das Verfahren zur satellitengestützten Waldflächenkartierung (OEHMICHEN 2007) ermöglicht eine weitestgehend automatisierte großflächige Abbildung der aktuellen Waldbedeckung mit hohen Genauigkeiten. Dadurch wird der Treibhausgasberichterstattung eine entscheidende Datengrundlage für die Erstellung der Emissionen des Waldes in Form aktueller Waldflächen zur Verfügung gestellt. Die Waldfläche hat einen direkten Einfluss auf die Berichterstattung, denn je präziser die Waldfläche geschätzt werden kann, desto genauer können die Kohlenstoffvorräte der einzelnen Pools für den Wald berechnet werden.

Da das Verfahren eine Einbindung verschiedener Datenquellen hinsichtlich der Satellitensensoren und der terrestrischen Daten ermöglicht, können zeitnah Waldflächen mit den jeweils zur Verfügung stehenden Daten ausgewiesen werden. Ebenso ist eine Anpassung der Waldkartierung je nach Ausrichtung der zugrunde liegenden Walddefinition realisierbar. Die Methode der satellitengestützten Waldflächenerfassung liefert reproduzierbare Ergebnisse, womit auch über lange Zeiträume ein Vergleich von Waldflächen möglich ist. Damit wird eine wesentliche Anforderung an die Erstellung der Treibhausgasinventare nach den UNFCCC-Richtlinien erfüllt, nach der Inventare transparent, konsistent, vergleichbar, vollständig und akkurat sein sollen.

Für weitere Verbesserungen der waldbezogenen Emissionsberichterstattung werden Möglichkeiten zur Erfassung von Umwandlungen der verschiedenen Landnutzungskategorien in Wald und der von Wald in andere Landnutzungsklassen untersucht. Damit verbunden ist einerseits die teilweise schwierige Abgrenzung und zugleich Erkennung der Landnutzungsklassen, insbesondere bei Übergangsformen, und andererseits stellt die Auswahl und Verfügbarkeit von geeignetem Datenmaterial hohe Anforderungen an die Umsetzung dieser Aufgabe.

7 Literaturverzeichnis

- ALTMANN, D. G., 1991: Practical Statistics for Medical Research. London, 611 p.
- BMVEL (HRSG.), 2001: Aufnahmeanweisung für die Bundeswaldinventur II (2001 - 2002), 2. korrigierte, überarbeitete Auflage, Mai 2001, Bonn: Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft, 108 S.
- FREUND, J., 1992: Mathematical Statistics 5e. Englewood Cliffs, N.J., Prentice-Hall.
- KOMAGATA, N., 2002: Chance Agreement and Significance of the Kappa Statistic. URL: <http://www.tcnj.edu/komagata/pub/Kappa.pdf> (last accessed: 14.02.2008).
- OEHMICHEN, K. & WILLKOMMEN, J., 2004: EstimateThreshold. Software.
- OEHMICHEN, K., 2007: Satellitengestützte Waldflächenkartierung für die Bundeswaldinventur. Hamburg: Universität Hamburg, Zentrum Holzwirtschaft, 105 S. URL: <http://www.sub.uni-hamburg.de/opus/volltexte/2007/3172/> (letzter Zugriff: 20.05.2010)
- POLLEY, H.; SCHMITZ, F.; HENNIG, P.; KROIHER, F., 2010: National Forest Inventory Reports: Germany, 223-243. In: TOMPPO, E.; GSCHWANTER, T.; LAWRENCE, M.; MCROBERTS, R.E., 2010: National Forest Inventories. Pathways for Common Reporting. Springer, ISBN 978-90-481-3232-4
- TOMTER, S.M.; BONHOMME, C.; GABLER, K.; GAGLIANO, C.; GASPARINI, P.; GSCHWANTNER, T.; KROIHER, F.; POLLEY, H.; ROBERT, N.; RONDEUX, J.; SCHADAUER, K.; SCHMITZ, F.; VIDAL, C., 2010: Towards Bridge Building Procedures for Forest Area Estimates: Examples from European National Forest Inventories (in review)
- UBA, 2006: Germany's Initial Report under Article 7, Paragraph 4 of the Convention, Report on the Determination of the Assigned Amount. Dessau: Umweltbundesamt, 51 S. URL: http://unfccc.int/files/national_reports/initial_reports_under_the_kyoto_protocol/application/pdf/aa_report_germany__initial_report__engl_final.pdf (last accessed 31.05.2010)

Sehr echtzeitnahe Auflösungsverbesserung multispektraler Fernerkundungsdaten

HANS-HERMANN VAJEN¹, HENRIKE BARKMANN¹ & CHRISTIAN KRAFFT¹

Zusammenfassung: Neue Fernerkundungssensoren, insbesondere die mit hoher räumlicher Auflösung, liefern neben den Bildern in mehreren schmalen Bändern des sichtbaren Spektrums häufig auch eines in einem panchromatischen Band, das nahezu den gesamten Wellenlängenbereich des sichtbaren Spektrums umfaßt. Die schmalen, multispektralen Bänder entsprechen oft den Farbkanälen blau, grün und rot sowie dem nahen Infrarot im Wellenlängenbereich von 800 bis 1100 nm. Die räumliche Auflösung der panchromatischen Bilder ist in der Regel zwei- oder viermal besser als die der multispektralen. Das bedeutet, daß ein Bildpunkt in einem Multispektralbild der 4- bzw. 16-fachen Fläche eines Bildpunktes im panchromatischen Bild entspricht.

Ein Optimum bei der Interpretation der Sensordaten erreicht man durch die Fusion der multispektralen und der panchromatischen Daten. Voraussetzung dafür ist, daß man die geometrische Auflösung der Multispektraldaten so verbessert, daß sie mit den panchromatischen Daten vergleichbar werden. Mögliche Interessenten des Verfahrens sind Lieferanten und Anwender hoch aufgelöster Fernerkundungsdaten, die oben beschrieben wurden. Es gibt eine Reihe von Lieferanten, die sogenannte „pan sharpening“ Daten als optionale Produkte anbieten. Das Verfahren benötigt möglichst zeitgleich aufgenommene, multispektrale und panchromatische Bilddaten und setzt eine möglichst exakte Koregistrierung der multispektralen und panchromatischen Bilddaten voraus. Es wird als Testimplementation im Projekt GENESI-DR (<http://www.genesi-dr.eu/>, EC Grant Agreement no. 212073) verwendet. Bei Umsetzung des Verfahrens in eine entsprechende Hardware könnte eine Echtzeitverarbeitung möglich werden.

1 Einleitung

Das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. hat als Service seines Deutschen Fernerkundungsdaten zentrums ein Zentrum für satellitengestützte Kriseninformation eingerichtet. Dessen Aufgabe ist die möglichst schnelle Aufbereitung und Analyse von Satellitendaten im Katastrophenfall. Mit diesen Lageinformationen wurden bereits in vielen Fällen Partner bei der Bewältigung von Krisensituationen unterstützt.

Die Nutzung von Satellitendaten zur Informationsgewinnung unterliegt naturgemäß einigen Einschränkungen. So sind die meisten Satelliten nicht sofort in der Lage geeignete Daten zu erheben. Ihre Nutzbarkeit ist begrenzt durch ihre Bahn- und Lageparameter, durch die Abbildungseigenschaften ihrer Sensoren aber auch durch die Witterungsbedingungen über dem Krisenort. Oft genug sind es aber die ersten Informationen die nach einer gewissen Zeit vorliegen und die damit geeignet sind sich einen ersten Überblick über die Situation an einem fernen Ort zu verschaffen.

1) Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Kalkhorstweg 53, D-17235 Neustrelitz

2 Aufgabenstellung

Aus den Anforderungen, die für die Nutzung von Satellitendaten zur Gewinnung von Lageinformationen in Krisenfällen gestellt werden, ergibt sich die Aufgabenstellung, die Daten möglichst schnell, genau und detailliert zu verarbeiten. Die verwendeten Satellitenbilddaten sind daher häufig sehr hoch aufgelöst und in mehreren Spektralbändern verfügbar. Aktuelle satellitengestützte Fernerkundungssensoren liefern häufig neben räumlich hochaufgelösten Multispektralbildern räumlich noch höher aufgelöste panchromatische Bilddaten. Hinzu kommt, daß es mittlerweile auch räumlich sehr hoch aufgelöste Bilder von Radarsensoren gibt, die nahezu unabhängig von Beleuchtungs- und Witterungsbedingungen arbeiten. Für die gewünschte Detailliertheit wird natürlich eine große Datenmenge benötigt, die jedoch in kürzester Zeit – wenn möglich in Echtzeit – verarbeitet werden soll. Unabhängig davon besteht immer das Bestreben Algorithmen zur Datenverarbeitung zu beschleunigen.

Im vorliegenden Fall bestand die Aufgabe darin, die Auflösung multispektraler Satellitenbilddaten mittels dazugehöriger panchromatischer Bilddaten in Nahe- Echtzeit zu verbessern. Dazu existieren bereits verschiedene Verfahren, u.a. das so genannte „pan sharpening“ mittels Farbraumtransformation. Das Deutsche Fernerkundungsdatenzentrum orientiert seit Jahren auf automatische Prozeßketten, die die verschiedensten Sensordaten sehr schnell mit möglichst multisensoriell arbeitenden Algorithmen verarbeitet. Daher wurde als Alternative das im folgenden vorgestellte Verfahren für eine echtzeitnahe Verbesserung der Auflösung entwickelt, das auch bestens für eine Umsetzung in Hardware geeignet ist.

3 Problemlösung

Um räumlich besser aufgelöste Bilddaten zu erhalten, muß ein Sensor sein Sichtfeld mit einer höheren Frequenz abtasten. Man kann eine höhere Auflösung allerdings auch durch eine „künstliche“ Erzeugung von zusätzlichen Abtastwerten erlangen, die durch geeignete Interpolationsverfahren gewonnen werden. Eine Interpolationsmethode ist dann gut geeignet, wenn sie den Verlauf zwischen zwei tatsächlichen Abtastpunkten möglichst fehlerfrei nachzubilden vermag. Durch diesen Verarbeitungsschritt wird das Ausgangsbild in das Format des Ergebnisbildes gebracht, es wird größer. In der Regel werden jedoch dadurch keine neuen Strukturinformationen erzeugt. Diese kann man jedoch dem Bild durch die Verwendung eines zweiten, besser aufgelösten Bildes des betrachteten Sichtfeldes hinzufügen.

Ein zweiter, ggf. parallel durchzuführender Prozessschritt ermittelt dafür aus dem zweiten Bild die Strukturinformationen in Form von Wichtungsfaktoren. Im letzten Prozessschritt wird aus beiden Zwischenprodukten das räumlich höher aufgelöste Multispektralbild errechnet. In diesem Bild bleiben die radiometrischen Eigenschaften des ursprünglichen Multispektralbildes erhalten. Es muss an dieser Stelle jedoch klar gesagt werden, dass das Ergebnis unter zwei Annahmen erzielt wurde:

1. Die verwendete Interpolationsmethode bildet den Verlauf der Bildfunktion zwischen den tatsächlich gemessenen Bildpunkten richtig nach.

2. Die Strukturinformationen der höher aufgelösten Ausgangsdaten können prinzipiell auf die niedriger aufgelösten Ausgangsdaten übertragen werden.

Der gesamte Prozess lässt sich wie folgt darstellen:

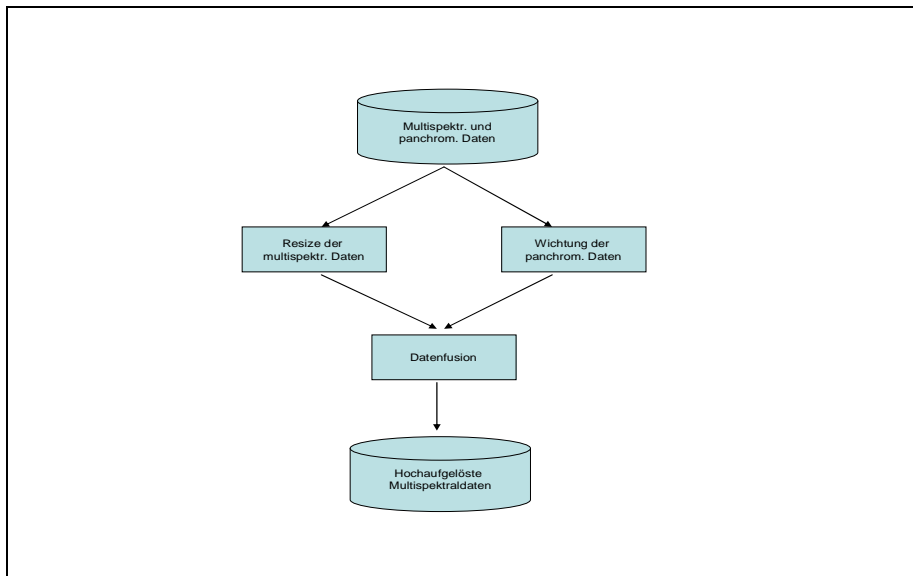


Abb. 1: Verfahren zur effektiven Auflösungsverbesserung von multispektralen Fernerkundungsdaten

Aus Abb. 1 ist erkennbar, dass die beiden ersten Prozessschritte leicht parallelisiert werden können. Da auch die implementierten Algorithmen recht einfach sind, kann durch eine entsprechende Hardwarelösung eine noch schnellere, wenn nicht sogar Echtzeitverarbeitung erreicht werden. Der grobe Entwurf einer Hardwarelösung könnte so aussehen:

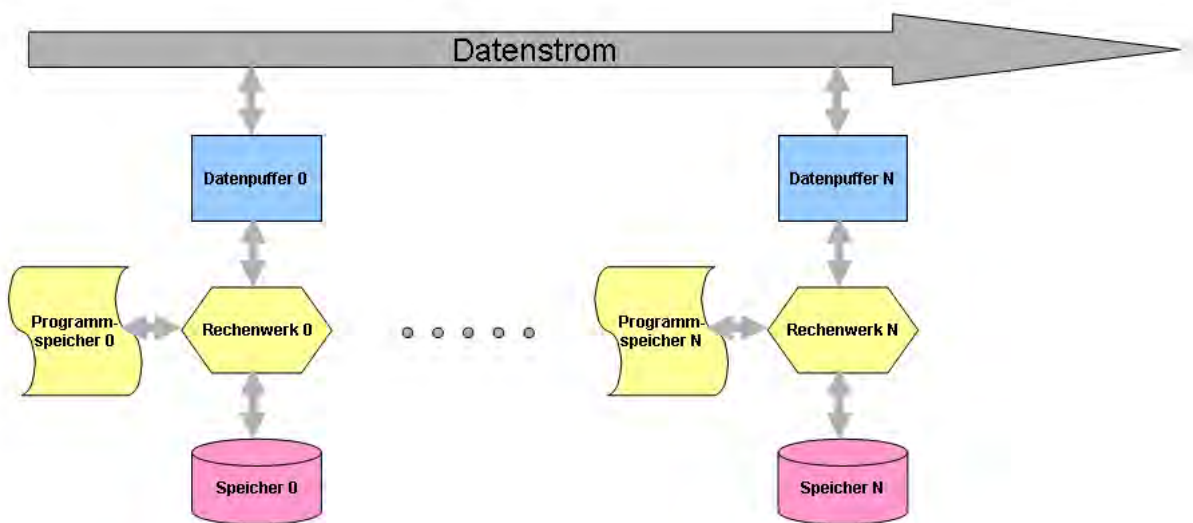


Abb. 2: Vorrichtung zur effektiven Auflösungsverbesserung von multispektralen Fernerkundungsdaten mit N+1 parallelen Rechenwerken

Die Hardwarelösung könnte auf frei programmierbaren Gate Arrays basieren, die bei einfachen Operationen einen hohen Datendurchsatz ermöglichen. Im gezeigten Beispiel übernehme in einem ersten Schritt ein Rechenwerk die Berechnung der Strukturinformationen aus dem panchromatischen Band, während parallel dazu N Rechenwerke die N Multispektralbänder verarbeiten. Im zweiten Schritt würden in N Rechenwerken die Strukturinformationen mit den interpolierten Multispektraldaten verknüpft.

4 Ergebnisse

Eine Implementation des Verfahrens hat dessen Praxistauglichkeit für Fernerkundungsdaten für die verschiedensten Sensoren bewiesen. Insbesondere der Erhalt der radiometrischen Eigenschaften der Multispektraldaten sichert eine informationserhaltende, schnelle Weiterverarbeitung dieser Daten zu hochwertigen Datenprodukten in Nahe- Echtzeit.

Satellit	Auflösungsverhältnis pan : ms	Bilddimension (im pan)	Datentyp	ungefähre Prozessierungszeit
LANDSAT 7	1 : 4	13840*11920	unsigned int	1:50 min
IKONOS	1 : 16	12616*15372	unsigned int	3:10 min
QuickBird	1 : 16	27504*27560	unsigned int	10 min
Spot 5	1 : 16	24000 *24000	unsigned int	6:20 min

Tab. 1: Verarbeitungszeiten für verschiedene Fernerkundungsdatensätze

Die Verarbeitungszeiten in der Tabelle beziehen sich auf eine Implementation mit C++ unter Windows XP Professional mit einer Pentium ® 4 CPU, 3.80 GHz. Es wurde hierbei noch keine Compileroptimierung und keine Zerlegung des Prozesses in Ausführungsstränge (threads) verwendet. Bezüglich Laufzeit gibt es also Reserven.

Das in Abb. 3 gezeigte Bildbeispiel für Daten des Satelliten IKONOS zeigt anschaulich den Informationsgewinn bei Multispektraldaten. Der rechte Bildausschnitt zeigt das in der geometrischen Auflösung verbesserte Bild. Deutlich sind hier einzelne Sträucher, parkende Autos und Gebäudeteile auf den Dächern wie z.B. Gaubenfenster zu erkennen. Die Histogramme der Bilder belegen, dass auch die radiometrischen Eigenschaften erhalten blieben.

5 Nutzung des Verfahrens in GENESI-DR

Das Verfahren wird in einer JAVA- Implementation im EU- Projekt GENESI-DR angewandt. GENESI-DR (Ground European Network for Earth Science Interoperations – Digital Repositories - <http://portal.genesi-dr.eu/>) ist ein Projekt, welches von der ESA und der Europäischen Kommission im Januar 2008 ins Leben gerufen worden ist. Hier soll ein Netzwerk verschiedener Institutionen entstehen, mit dem Ziel Nutzer und Produzenten von Fernerkundungsdaten zusammenzubringen. Im Rahmen von GENESI-DR werden Lösungen erarbeitet, die es Benutzern nicht nur erlaubt, nach Fernerkundungsdaten zu suchen, sondern

diese auch zu prozessieren. Die Hauptanforderung liegt hierbei auf der flexiblen Verkettung von Verarbeitungsschritten, sowie der Nutzung verteilter Rechenkapazitäten.



Abb. 3: Farbkomposit aus Daten des Satelliten IKONOS, original mit 4m Auflösung (links), bearbeitet mit verbesserter Auflösung 1 m (rechts)

Die Anwendung von Airborne Laser Scanning auf rutschungsgefährdetem Terrain Fallbeispiel: Kliffküsten der Halbinsel Jasmund/Rügen

SVEN JANY, ANNEGRET FREDEL (MILAN GEOSERVICE GMBH)

Zusammenfassung: Das physikalisch, ökologische Gesamtsystem Erde rückt für einen Großteil der Bevölkerung immer mehr in den Vordergrund. Der Georaum beschreibt das mehrdimensionale Kontinuum des Erdkörpers mittels euklidischer und topologischer Eigenschaften. Aber auch allgemeine Eigenschaften (physikalische und chemische) sowie Entwicklungseigenschaften werden untersucht und abgebildet.

*Um dieses System verständlich zu repräsentieren und zu gestalten, ist eine Vielzahl von Informationen notwendig. Ursprünglich basierten Geoinformationen ausschließlich auf Landkarten. Mit dem Zeitalter der Digitalisierung stellen geographische Informationen inzwischen eine elementare Grundlage für weit entwickelte Computeranwendungen dar. Die Anforderungen an die erhobenen Daten sind in den vergangenen zehn Jahren erheblich gestiegen. **Zeitnähe, Effizienz und Reproduzierbarkeit** der Erhebung stehen an erster Stelle. Die Datenverarbeitung erfolgt problemorientiert. Neue, schlüssige Entwürfe auf dem Gebiet des Umweltmonitoring, mit denen eine mannigfaltige Nutzung der Daten ermöglicht wird, sind daher dringend erforderlich.*

*Verschiedene Disziplinen liefern geographische Informationen. So ist neben der Photogrammetrie das **Laserscanning** eines der hervorstechendsten Verfahren im Bereich der Datengewinnung. Hier werden Informationen mit geringem finanziellem Aufwand schnell und detailgenau erfasst.*

Auf Grund des besonderen Geländeprofiles des nordöstlichen Küstenbereichs der Insel Rügen, kommen die Vorteile des Verfahrens auf diesem Gebiet besonders zum Tragen. So sind trotz schwer zugänglichem Terrain digitale Geländemodelle von hoher Qualität zu erfassen.

1 Einführung

Das Airborne Laser Scanning (ALS, am.: LIDAR – Light Detection and Ranging) ist im Bereich der Fernerkundung eine verhältnismäßig junge Methode, die allerdings in den vergangenen Jahren zunehmend für die digitale Erfassung und Darstellung von Oberflächenstrukturen zum Einsatz kommt. Auf Grund der berührungslosen Erfassung der Erdoberfläche ist die Datengewinnung durch eine besonders hohe Effektivität gekennzeichnet, da der Messvorgang größtenteils automatisch abläuft. Die digitale Aufnahme der Daten mit Hilfe dieses flugzeuggestützten Vorgangs ermöglicht die Erfassung weitläufiger Gebiete mit großer Punktdichte. Das präzise System arbeitet auch in schwer erreichbaren Bereichen sehr wirtschaftlich.

2 Das Prinzip des Verfahrens

2.1 Funktionsweise des Laserscanners

Die Funktionsweise eines Laserscanners ist prinzipiell mit der eines Echolotes zu vergleichen. Demnach wird die Distanz zwischen Messgerät und Bodenpunkt mittels eines Laserscanners bestimmt. Die Entfernungsmessung geht dabei aus der Messung der Zeitspanne hervor, die zwischen dem Aussenden des Laserimpulses und der Reflexion des zurückkommenden Laserimpulses verstreicht. Die Messinstrumente sind lotrecht unter dem Trägerflugzeug montiert und senden einen gepulsten oder kontinuierlichen Laserimpuls aus. Dieser benötigt für die gesamte Messstrecke bei einer angenommenen Flughöhe von 1000m und einer Lichtgeschwindigkeit von 299.792km/s 6,671 Mikrosekunden.

2.2 Ermittlung der Geländehöhe

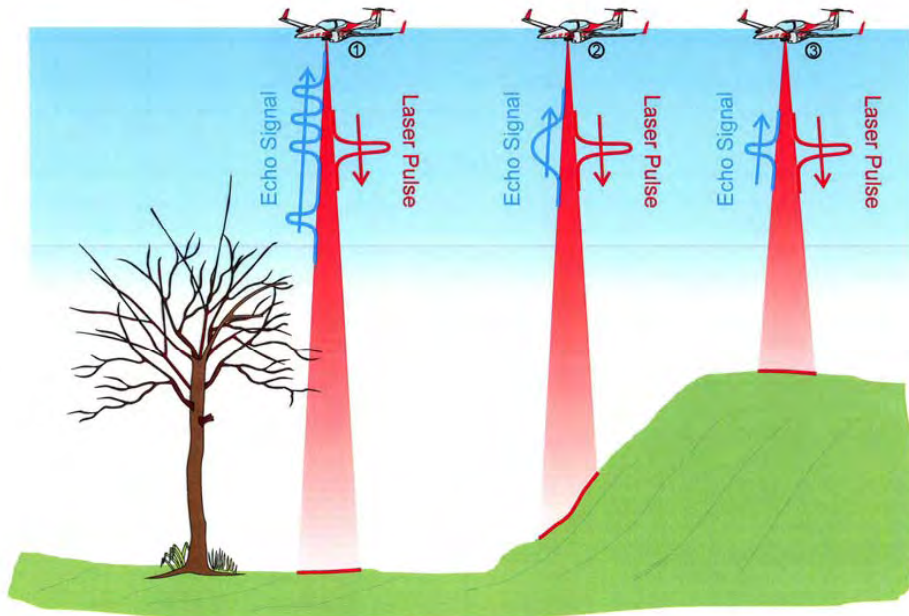


Abb.1 : Das Messprinzip des flugzeuggestützten Laserscannings

Für die Bestimmung der Geländehöhen müssen die Variablen Position und Neigung des Trägerflugzugs zwingend bekannt sein. In das Messgerät sind zwei Navigationssysteme integriert, welche die Abweichung durch die Fluglage und die Bewegung des Flugzeugs berücksichtigen (vgl. Abbildung 1):

- Das *Global Positioning System* (GPS) und
- Das *Inertial Navigation System* (INS).

Das Global Positioning System ermittelt die genaue Position des Flugzeuges im Verhältnis zur Erdoberfläche. Unter Beachtung der Länge, Breite und Höhe erfolgt dies im Sekundentakt.

Das INS ermittelt drei Fluglageparameter: *Pitch* (Neigung um die Querachse), *Roll* (Neigung um die Längsachse) und *Yaw* (Drehung um die Hochachse). Die Messgenauigkeit des verwendeten Systems bestimmt die Maschenweite der Punktwolke, die durch den Prozess des Laserscannings entsteht.

2.3 First- und Last-Pulse Informationen

Wie bereits erwähnt, wird der Laser von Erdoberflächenstruktur reflektiert und im Messinstrument wiederum erfasst. Auf diese Weise wird die Höhenlage der reflektierenden Oberfläche aus der benötigten Zeitdifferenz zwischen Aussendung und Erfassung des Laserimpulses interpretiert. Auf Grund der Durchlässigkeit der Vegetation für einen Teil des Laserstrahls, wird dieser mehrfach, zeitversetzt reflektiert. So senden sowohl Vegetationsoberfläche als auch die teilweise darunter liegenden Erdoberfläche mehrere Laserimpulse, welche vom Messgerät registriert werden. Die resultierende Zeitdifferenz beschreibt die unterschiedlichen Höhen der gescannten Oberfläche.

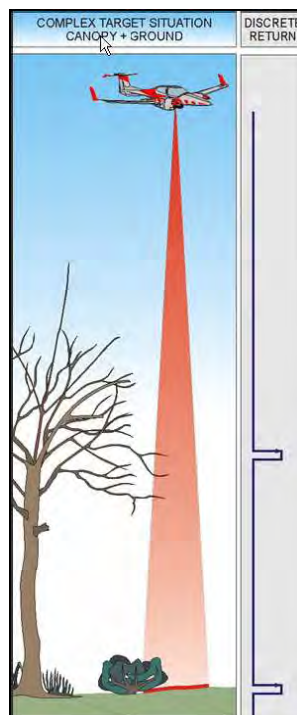


Abb.2 : First und Last Pulse

Als „First Pulse“ wird der zuerst registrierte Laserimpuls bezeichnet. Das zeitversetzt eintreffende Laserecho wird hingegen als „Last Pulse“ bezeichnet (vgl. Abbildung 2). Auf Grundlage der aus einer Befliegung resultierenden zeitversetzten Pulsdaten sind unterschiedliche Informationen visualisieren. So werden die Oberflächenbeschaffenheit wie auch die Beschaffenheit des Geländes mit Hilfe verschiedener Datenformate dargestellt. In Verbindung mit den Rohdaten bilden sie die Arbeitsbasis für die zu generierenden Produkte.

2.4 Befliegung

Die Befliegung des zu erfassenden Gebiets wird mit dem Trägerflugzeug in einzelnen, parallel liegenden Streifen durchgeführt. Hierbei werden alle für die anschließende Auswertung relevanten Daten erfasst. Die Flugstreifen überlappen sich quer zur Flugrichtung.

In gleichmäßigen Abständen wird vom Trägerflugzeug ein Laserstrahl ausgesendet. Dieser Einheit ist ein schnell rotierender oder kippender Spiegel (Scanner) vorgelagert. Er leitet den Laserstrahl quer zur Bewegung des Flugzeugs bzw. des Helikopters ab. Das Zusammenwirken aus vorwärts gerichteter Flugbewegung und dem Schwingen des laserstrahlableitenden Spiegels ergibt am Erdboden ein gleichförmiges Scanmuster. Abbildung 3 zeigt links ein typisches Scanmuster eines rotieren Polygon-Spiegelscanners. Erkennbar ist die systematische Anordnung der Laserpunkte, die optimal über den Geländestreifen verteilt sind.

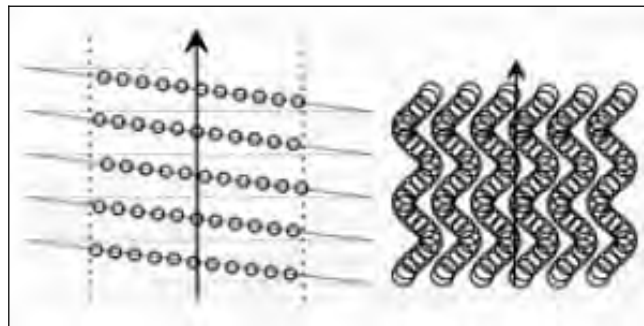


Abb.3 : Polygonscanner (links)
Muster eines Schwingenspiegels (rechts)

Mit diesem System können Flugstreifen verschiedener Breiten erfasst werden. Sie sind abhängig von der Flughöhe und dem Scanwinkel. Die Streifenbreite am Boden kann wie folgt berechnet werden:

$$s = 2 \times \text{Flughöhe} \times \tan(\text{Scanwinkel}/2) \quad (1)$$

Bei einer angenommenen Flughöhe von 600m und einem Winkel von 45° (typisch) ergibt sich so eine Flugstreifenbreite von 497m.

Mit Hilfe der genannten, einstellbaren Systemparameter sind nun verschiedene Punktdichten möglich. Durch die Variante der Vielfachüberlappung der Flugstreifen ist auch eine sehr hohe Konzentration der Punkte realisierbar. Typisch für ein Raster von einem Meter sind drei bis vier Punkte pro Quadratmeter. Bei einem 0,5m – Raster liegt die Dichte bei sechs bis acht Punkten. Auch die Art des Auftrags bedingt die Nähe der Punkte. So bevorzugen Archäologen gern zehn bis

zwölf Punkte pro Quadratmeter in einem 0,5m-Raster. Bei Trassenbefliegungen werden oft 15 bis 20 Punkte gefordert.

Bei allen Laserscannern sind die Parameter Messrate, Scanwinkel und Scanfrequenz variabel einstellbar. Zusammen mit der Flughöhe über Grund, der Fluggeschwindigkeit und dem Abstand der Fluglinien bestimmen sie die Dichte und die Verteilung der Laserpunkte im Aufnahmegebiet. Alle Systeme können mit einer Digitalen Messkamera kombiniert werden.

2.5 Vorteile des ALS gegenüber anderer Messverfahren auf einem Blick

Tab.1 : Vorteile des ALS auf einem Blick

	Terrestrische Vermessung	Photogrammetrie	Airborne Laser Scanning
Vorteile	1. Messungen sind wiederholbar 2. extrem genaue punktuelle Oberflächen- erfassung, Einzelpunkt- vermessung 3. sehr effiziente Punkt- verteilung bei der Erfassung der Topographie	1. Bild der Topographie liegt vor 2. effiziente großräumige Erfassung der Topographie 3. Erfassung von Geländeleitlinien, Bruchkanten	1. gleichmäßige, dichte Punkterfassung 2. flächenhafte reprä- sentative Aussagen 3. aktives Messverfahren 4. Punkterfassung auch wenn keine Struktur vorhanden 5. Objektrekonstruktion mit nur einem Aufnahmestrahl 6. keine teuren Auswerte- geräte nötig 7. bei dichter Erfassung, jederzeit nachträgliche Sonderauswertung der Daten möglich 8. Multi-Echo Messungen erfassen zum Teil auch Bodenpunkte unter der Vegetation

3 Fallbeispiel Rügen

Die Kliffe der Halbinsel Jasmund gelten auf Grund ihrer exponierten Nordost Lage als eine der Steilküsten, die einer intensiven glazialen Stauchung ausgesetzt war. Der Aufbau verschiedenen Schichten von Geschiebemergeln und pleistozänen Ablagerungen ist deutlich nachvollziehbar. Sie sind beinahe kontinuierlich, keilförmig in die mächtigen Kreide-Komplexe eingeschuppt. Die typische Höhendifferenz zwischen Außen- und Boddenküste ist in diesem Stauchmoränengebiet auffällig deutlich ausgeprägt. Der Höhenabfall von Nordost nach Südwest geht mit einer Bruchstörung einher. Diese verläuft von Nordwest nach Südost und wurde nach der ersten Ablagerung von Geschiebemergel angelegt. Hangrutschungen von Kreidemassen können auf diese Bruchzone zurückgeführt werden.

3.1 Massenbewegung als Rutschungsauslösender Prozess

Bei einer Hangrutschung kommt es zu einer unwillkürlichen Bewegung von Gestein, Boden oder Regolith entlang einer gegen die Horizontale geneigten Fläche. Dieses Ereignis wird auch als Massenbewegung bezeichnet. Sie erfolgt ausschließlich unter Einwirkung der Schwerkraft. In kleineren oder größeren Maßstäben findet dieser Prozess überall auf der Erdoberfläche statt. International wird dieses Phänomen unter dem Begriff „landslides“ zusammengefasst. Gewöhnlich ist das anstehende Gestein so beständig und solide gelagert, dass es von einer solchen Bewegung unbeeinflusst bleibt. Hat der Hang jedoch einen gewissen Neigungswinkel erreicht, so brechen auch hier Gesteinsmassen ab. Die Verlagerung von Materie auf ein niedrigeres Niveau, wie sie auch an dem Steilküstenbereich der Insel Rügen auftritt, ist auf die sinkende innere Festigkeit des Locker- oder Festgesteins zurückzuführen.

Die massenhafte Bewegung von Gestein oder Boden ist jedoch nicht als einheitlicher Prozess zu beschreiben. Vielmehr können unterschiedliche Bewegungsformen beobachtet werden.

3.1.1 Rutschungsverursachende Versagensmechanismen

Im Untersuchungsgebiet der Halbinsel Jasmund wie auch in anderen rutschungsgefährdeten Gebieten werden die Kliffabbrüche durch zwei wesentliche Faktoren begünstigt. Zum einen ist der Neigungswinkel der Steilküste entscheidend. Ab einer bestimmten Gradzahl versagen die Scherkräfte und versetzen die Materie in Bewegung.

Fördernd wirkt sich jedoch auch ein zweiter Faktor aus. Eine auffällige geologische Struktur, wie sie der Situation im vorliegenden Terrain entspricht, wirkt sich negativ auf die Hangstabilität aus. An Grenzflächen zwischen zwei verschiedenen Schichten können die Reibungskräfte früher versagen. Die Gesteinsmasse wird auch bei unauffälliger Hangneigung schneller in Bewegung gesetzt.

Auf diese Weise sind die in der nachstehenden Abbildung 4 visualisierte Versagensmechanismen sowohl auf Grund des Neigungswinkels als auch auf Grund der Geologie der Steilküste im Bearbeitungsgebiet anzutreffen.

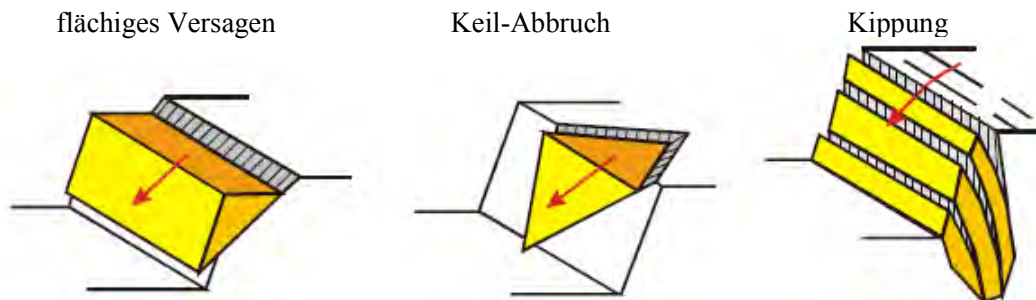


Abb.4 : Potentielle Versagensmechanismen im Untersuchungsgebiet

3.2 Auswertung der erhobenen ALS-Daten

Digitale Höhenmodelle wie sie auch im gewählten Fallbeispiel aus einer ALS- Befliegung erzeugt werden, weisen eine Rasterweite von bis zu 1m und besser auf. Die Höhenauflösung beträgt dabei 0,01m. So ergibt sich eine Lagegenauigkeit der Höhenmodelle, die besser als $\pm 0,5\text{m}$ für jeden Rasterpunkt liegt. Für über 95% aller Rasterwerte (bzw. 2σ) resultiert daraus eine absolute Höhengenaugigkeit von besser als 0,15m.

Auf Grund des steilen Geländes liegt die Messdichte im Fallbeispiel Rügen bei mehr als 20 Punkten je m^2 . Diese hohe Messdichte gewährleistet auch die Abbildung von kleinräumigen Strukturveränderungen der Oberfläche.

3.3 Visualisierungs der erfassten ALS-Daten

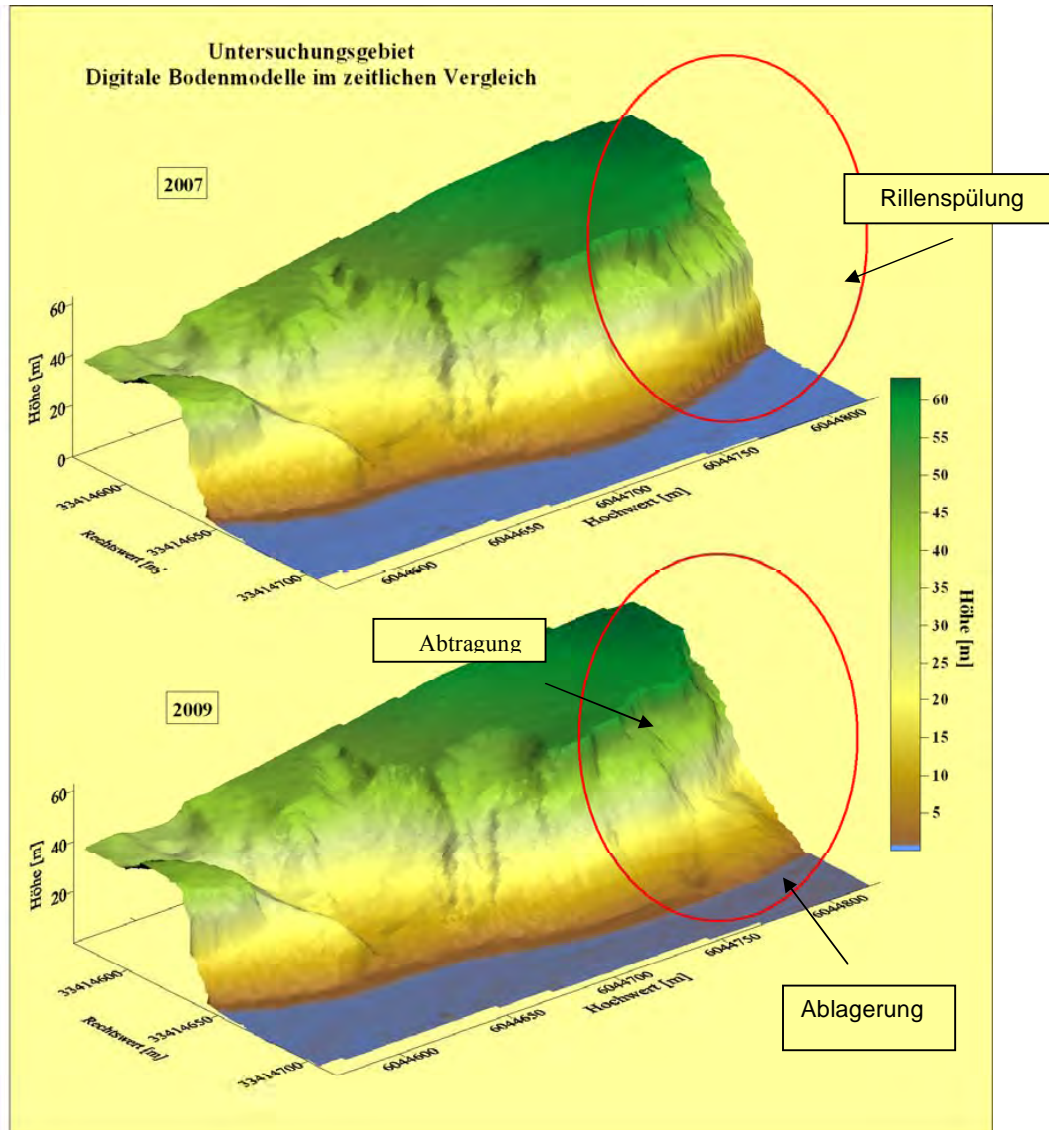
Um den erhobenen Daten ihre Abstraktheit zu nehmen und so dem Betrachter eine Verarbeitung der Daten zu ermöglichen, erfolgt deren visuelle Aufbereitung. Auf diese Weise treten Zusammenhänge deutlich in Augenschein.

Unter der Verwendung der visuellen Darstellung kann das Rutschungsereignis genau lokalisiert werden. Des Weiteren kann das Ausmaß und die Ausdehnung der abgegangenen Materie verdeutlicht werden.

3.3.1 Das Dreidimensionale Geländemodell - DTM

In der nachstehenden Abbildung 5 wurde das Digital Terrain Modell (DTM) in einem Blockbild modelliert. Aus dem Vergleich der dargestellten Bodenmodelle aus den Jahren 2007 und 2009 ist das Rutschungsereignis deutlich nachzuvollziehen und zu lokalisieren. Wie die Markierung in der Darstellung 5 verdeutlicht, ist der Abgang der Bodenmaterie im Norden des Untersuchungsgebiets festzustellen. Visuell ist dies zum einen an dem veränderten Anstieg des Steilhangs zu erkennen. Im Jahr 2009 steigt das Kliff sanfter an, als noch im Vorjahr. Ferner ist festzustellen, dass die Geländekante sich zurückverlagert hat, währenddessen sich der unmittelbare Uferbereich auf Grund des abgelagerten Materials in Richtung Seeseite vorverlagert hat.

Diese detaillierte Visualisierung in Verbindung mit der Genauigkeit der erfassten Daten bietet den zuständigen Institutionen die Möglichkeit an ähnlichen Geländeabschnitten genauere Vorhersagen zu tätigen und gegebenenfalls präventive Maßnahmen einzuleiten.



3.3.2 Isoliniendiagramm

Mit Hilfe des Isoliniendiagramms werden die erfassten Laserdaten aus der Draufsicht visuell dargestellt (Abbildung 6). Wie schon im vorangegangenen Kapitel, wird bei dieser Auswertung auf die Daten des DTM zurückgegriffen.

Um die Veränderungen des Steilhangs innerhalb eines Jahres in einer Grafik zu verdeutlichen, werden die Erhebungen direkt gegenübergestellt. Die Contourlines liegen im Jahr 2007 im Abgangsbereich deutlich näher beieinander als 2009. Somit ist mit Hilfe einer weiteren Visualisierungsvariante der veränderte Anstieg der Kliffküste nachgewiesen. Unterstützend werden die Ergebnisse der Tabelle 2 aufgeführt.

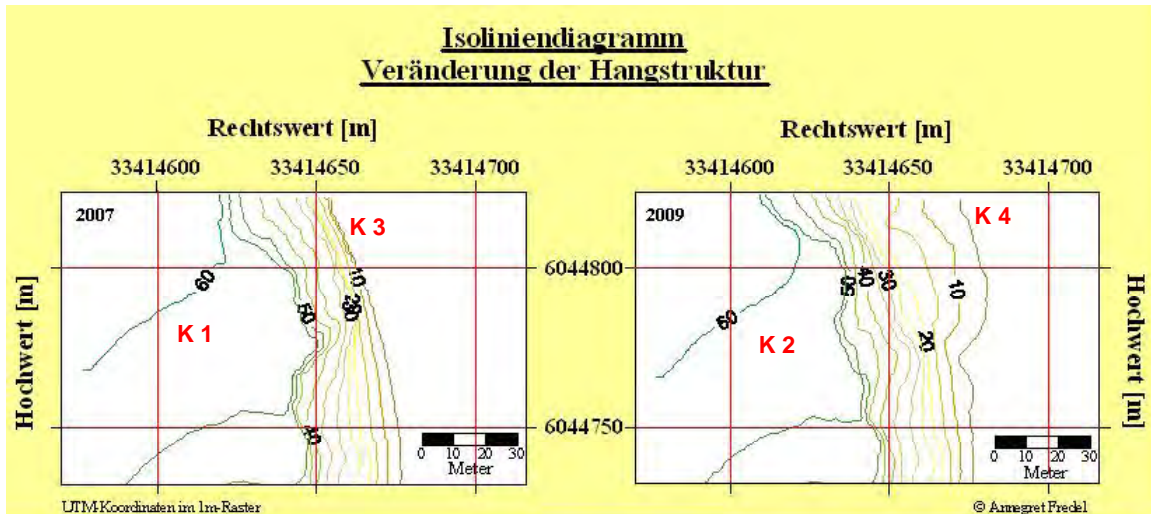


Abb.6 : Veränderung der Hangstruktur

Tab.2 : Geländeanstieg

		Distanz / 30 Höhenmeter	Höhenanstieg auf 1m
2007	M 1	6,4m	4,68m
	M 2	4,8m	6,25m
	M 3	4,5m	6,66m
	M 4	5,1m	5,88m
	M 5	7,1m	4,22m
	M 6	7,7m	3,89m
2009	M 7	31,4m	0,95m
	M 8	28,8m	1,04m
	M 9	33,3m	0,90m
	M 10	25,6m	1,17m
	M 11	30,1m	0,99m
	M 12	35,3m	0,85m

Ferner ist festzuhalten, dass im übrigen Bereich des Untersuchungsgebiets nur geringe Veränderungen der Geländestruktur stattgefunden haben. Hier betragen die Höhenunterschiede maximal +/- 2m (vgl. Abbildung 7). Kleinere Abweichungen sind durch natürliche erosive Vorgänge bedingt, denen jeder Punkt auf der Erdoberfläche ausgesetzt ist.

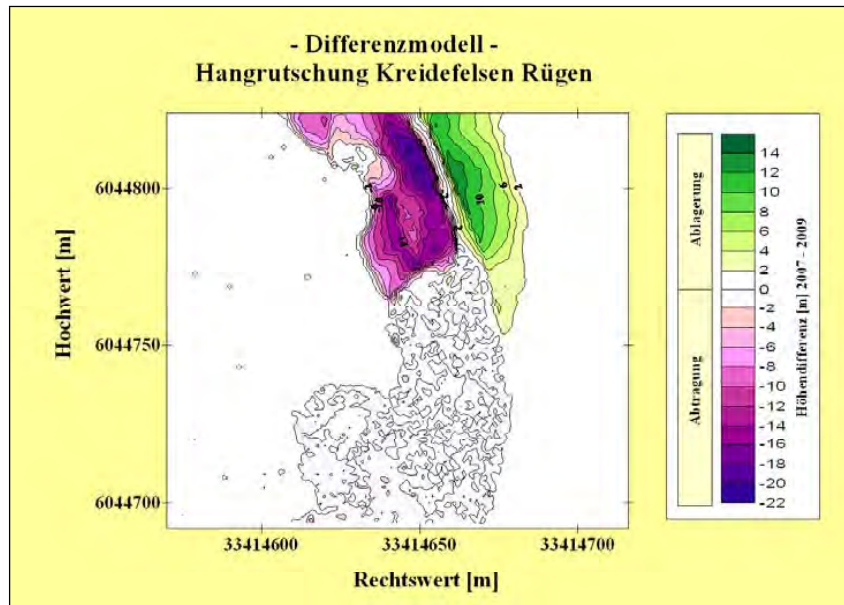


Abb.7 : Veränderung der Hangstruktur im Zeitvergleich

3.4 Volumenberechnung der Abgangsmasse

Setzen sich Gesteins- bzw. Bodenmassen in Bewegung, so ist die Veränderung in der Volumenbilanz nachzuvollziehen. Die Masse gleitet, fließt oder stürzt entlang einer geneigten Ebene. Gründe für die spontan auftretenden Bewegungen liegen häufig in der inneren Festigkeit des Gesteins. Das Material wird brüchig und zerfällt in kleinere Bestandteile.

Auch das gewählte Fallbeispiel weist diese Unterschiede in dem Massenhaushalt der jeweiligen Laserdatenerfassung auf. Die Massenveränderung wird unter der Verwendung der Software RiScan Pro berechnet.

3.4.1 Das Gesamtvolumen

Zunächst wird das Volumen des gesamten Steilküstenkörpers aus 2007 und 2009 errechnet. Die Berechnung in den Vergleichsjahren weisen offensichtliche Unterschiede auf. Das Gesamtvolumen des gewählten Kliffküstenabschnitts der Halbinsel Jasmund ist im Jahr 2009 geringer als im Jahr der ersten Erfassung. So weist das Gesamtvolumen im 1,0m Raster bei der zweiten Erfassung 6678m³ weniger auf als 2007. Die Differenz im Massenhaushalt ist auf den fluvialen Einfluss des Meeres zurückzuführen.

Tab.3 : Gesamtvolumina

Rastergröße	Gesamtvolumen 2007 [m ³]	Gesamtvolumen 2009[m ³]
1,0m	136.443,63	129.765,51

3.4.2 Berechnung der Abgangsmasse

Für die Wertung des Rutschungsereignisses durch die zuständigen Behörden ist auch die Masse des Materials interessant, das sich in Bewegung gesetzt hat.

Aus den Werten der nachstehenden Tabelle 4 geht ein Defizit im Massenhaushalt von 14.974m³ im Jahr 2009 hervor. Wird dieses Abgangsvolumen mit den Hangrutschungen Rügens in den vergangenen Jahren verglichen, kann dieses Ereignis der Massenbewegung als ein durchschnittlicher Wert eingeordnet werden.

Tab.4 : Teilvolumina I

Rastergröße	Teilvolumen 2007 [m ³]	Teilvolumen 2009 [m ³]
1,0m	84.201,68	69.227,16

4 Literatur

BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT (2009): Geoinformation.

KATZENBEISSER, R.; KURZ, S. (2004): Airborne Laser-Scanning, ein Vergleich mit terrestrischer Vermessung und Photogrammetrie. In: Photogrammetrie Fernerkundung Geoinformation

KATZUNG, G./ KRIENKE, H.D./ STRAHL, U. (2004): Rügen. In: KATZUNG, G. (2004): Geologie von Mecklenburg-Vorpommern.

KKVA (2000): Leitfaden Qualitätssicherung – Photogrammetrie und DTM Generierung, Konferenz der kantonalen Vermessungsämter (CH).

KRAUS, K. (2001): Photogrammetrie Band III.

LENHART, D./ KAGER, H./ EDER, K./ HINZ, St./ STILLA, U. (2006): Hochgenaue Generierung des DGM vom vergletscherten Hochgebirge – Potential von Airborne Laserscanning.

LODDENKEMPER, M./ PETRING, J./ SCHROTH, R. (o.J): Airborne Laser Scanning zur Generierung Digitaler Geländemodelle. In: Fachtagung Elbe. Posterbeiträge aus weiteren Projekten. Dresden.

RIEGL MEASUREMENT LASER SYSTEMS GMBH (2009): www.riegl.com

STRAHLER, A. H./ STRAHLER, A. N. (2005): Physische Geographie. 3. Auflage. Stuttgart.

Wissensbasierte Objekterkennung

in 3D-Punktwolken und Bildern

ANDREAS MARBS, FRANK BOOCHS, HELMI BEN HMIDA & HUNG QUOC TRUONG¹

Ziel unseres Vorhabens ist die Entwicklung effizienter, intelligenter Methoden für eine automatisierte Auswertung von terrestrischen Laserscanner- und Bilddaten. Im Gegensatz zu den bisherigen Ansätzen wird hier das Ziel verfolgt, bereits vorhandenes Wissen über die zu vermessenden Objekte in die Auswertung einfließen zu lassen. Dieses Vorwissen kann beispielsweise in Datenbanken, Bestands- oder Bauplänen enthalten sein und gestattet somit eine gezielte, objektorientierte Detektion, Identifizierung und gegebenenfalls Modellierung von komplexen Geometrien und Objekten. Von entscheidender Bedeutung ist dabei die Abbildung und Formalisierung des Wissens, damit es zur Unterstützung der Punktwolkenverarbeitung taugt. Im nachfolgenden Beitrag sollen erste Konzeptideen und Lösungsansätze des erst kürzlich gestarteten Forschungsvorhabens präsentiert werden.

1 Einleitung

Seit einigen Jahren haben sich Terrestrische Laserscanner (TLS) als „Arbeitspferd“ für die Vermessung von Objekten und Gelände zur Bestandserfassung und Kartenfortführung etabliert. Diese Geräte bieten den Vorteil dass sie in sehr kurzer Zeit eine große Menge an 3D-Informationen automatisch erfassen können. Neuere Gerätegenerationen, insbesondere die so genannten Phasen-Scanner, bieten eine immer schnellere Erfassung bei immer besser werdender geometrischer Punktwolkenqualität und gleichzeitig höherer Reichweite. Die seit 2002 durchgeführten Untersuchungen auf den Laserscanner-Testeinrichtungen des i3mainz sowie die praktischen Erfahrungen mit fünf verschiedenen terrestrischen Laserscannern, die im Besitz des i3mainz sind bzw. waren, belegen dies (BÖHLER & MARBS 2010).

Vor allem die großen, in kurzer Zeit zu gewinnenden Datenmengen führen zu einem veränderten Verhalten des Benutzers im Außendienst. Während bei den langsameren Impuls-Scannern Scanausschnitt und Auflösung aus Zeitgründen in der Regel gezielt an die Aufgabenstellung angepasst werden müssen, können mit einem Phasen-Scanner üblicherweise Vollscans mit einer Auflösungsstufe ausgeführt werden, die vor allem für nähere Objektbereiche eine sehr hohe, jedoch in dieser Dichte meist nicht benötigte Auflösung liefert. Weiterhin liegen oft noch zusätzlich gewonnene Daten vor, z.B. in Form von Panoramaaufnahmen vom Scannerstandpunkt oder extern gewonnenen Fotoaufnahmen der gescannten Szene.

Die Beschleunigung der Arbeit im Außendienst führt jedoch aufgrund der riesigen Datenmengen zu einer zunehmenden Verschiebung des Arbeitsaufwandes in den Innendienst. Das hat nicht selten – je nach Aufgabenstellung – zur Folge, dass das Verhältnis der Arbeitszeit im Außendienst zum Zeitaufwand im Innendienst zwischen 1:5 und 1:30 liegt. Die

¹ i3mainz, Institut für Raumbezogene Informations- und Messtechnik, FH Mainz, Lucy-Hillebrand-Str. 2, 55128 Mainz; E-Mail: (marbs, boochs, benhmida, truong)@geoinform.fh-mainz.de

Auswertetechniken bestehen dabei überwiegend aus manuellen, interaktiven Tätigkeiten. Dazu gehören das Löschen von unnötigen Bereichen, das Navigieren in der komplexen Punktwolke, das Selektieren von Teilbereichen und das Extrahieren bzw. Modellieren von Geometrien. Dabei ist es unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten anzustreben, die in einem automatischen Messvorgang gewonnenen Daten auch in einem größeren Maße automatisiert auszuwerten.

2 Stand der Wissenschaft und Technik

Entsprechende Entwicklungen von Auswertelgorithmen konzentrierten sich in der Vergangenheit zu einem großen Teil auf den Bereich des Airborne Laserscanning z.B. zur Dachrekonstruktion für 3D-Stadtmodelle. Hierbei sind vor allem Arbeiten der TU Delft (VOSSelman et al. 2004) und der TU Dresden (HOFMANN et al. 2003, SCHWALBE 2004) zu nennen. Hier werden verschiedene bekannte Verfahren zur Punktwolken- und Bildverarbeitung, wie z.B. Region Growing, Parameterraumanalyse, Projektionsverfahren oder Linienverfolgung geschickt kombiniert, um zum Ziel zu kommen. Auf Bildverarbeitungsalgorithmen basierende Techniken werden auch bei der Segmentierung und Klassifizierung von Bäumen (morphologische Operatoren) und bei der automatischen Modellierung von Zylindern und Ebenen in technischen Anlagen (Parameterraumanalyse) aus TLS-Daten eingesetzt (VOSSelman et al. 2004). Alle genannten Methoden sind jedoch ausschließlich daten-getrieben und bedürfen der gezielten Auswahl und Steuerung durch einen Fachmann.

Für die Erkennung von komplizierten Objekten sind rein daten-getriebene Methoden jedoch weniger gut geeignet, weil mit wachsender Komplexität des Datenmaterials die Mehrdeutigkeiten in Bezug auf seine Bewertung zunehmen und die Grundlage für eindeutige Entscheidungen verloren geht. Diese Problematik lässt sich nur durch weitergehende Zusatzinformationen umgehen, die der Algorithmik einen Rahmen geben, mit dem die Bewertungsvielfalt eingeschränkt und damit die Entscheidungsgrundlage robuster wird.

Beispiele für die Nutzung von semantischen Informationen und Vorwissen über die zu erkennenden Objekte finden sich in der Literatur unter anderem bei PU & VOSSelman (2006), die mittels sogenannter „Feature constraints“ Bedingungen über die Größe, die Position, die Richtung oder die Topologie von Objekten definieren und somit die Erkennung von Objekten steuern. Eine noch konsequentere Einbindung von objektbezogenem Vorwissen wird unter anderem in CRUZ & BOOCHS (2007) und GRAU (2000) präsentiert. Das Vorwissen über die aufgenommene Szene mit ihren Objekten und Nachbarschaftsbeziehungen wird hier in Form eines semantischen Netzes bzw. einer Ontologie abgelegt, wodurch nach einer Vorsegmentierung bzw. Geometrierkennung in einer Szene schrittweise eine Bedeutungszuweisung ermöglicht wird.

3 WiDOP

Die Idee eines etwas anderen Ansatzes für die Nutzung von Ontologien zur Objekterkennung in räumlichen Daten wurde bereits in BOOCHS et al. (2008) vorgestellt. Anders als bei den obigen Ansätzen sollen hier nicht nur bereits erkannten oder segmentierten Objekten Bedeutungen zugewiesen werden. Stattdessen soll die Semantik bereits von Anfang an objektbezogen die

mathematische Algorithmik zur Detektion und gegebenenfalls Modellierung bzw. Rekonstruktion der jeweiligen Objekte steuern. Dies ist z.B. dann möglich, wenn bereits umfangreiches Vorwissen in Form von Bestands- oder Planungsdaten (CAD, GIS) mit detaillierten geometrischen Objektbeschreibungen, kombiniert mit einem anwendungsbezogenen Regelwerk vorhanden ist. Eine solche Regel könnte beispielsweise lauten: „Wenn Raum x ein Büro der Größe y ist, befinden sich dort zwei Schreibtische und zwei Drehsessel“. Die Punktwolkenalgorithmik könnte dann gezielt so ausgewählt und parametrisiert werden, dass das Inventar des Büroraums auf Basis bekannter Geometrien der Möbel und ggf. vorhandener Nachbarschaftsbeziehungen automatisiert gesucht, erkannt und lokalisiert wird.

Eine solche Zielsetzung ist in vielen Anwendungsbereichen von Interesse und wird am i3mainz im Rahmen des Projektes WiDOP – Wissensbasierte Detektion von Objekten in Punktwolken für Anwendungen im Ingenieurbereich – verfolgt. Die exemplarischen Anwendungsbereiche finden sich hier bei der Bahnvermessung (Partner: DB Netz AG, Metronom Automation GmbH) sowie beim Facility Management (Partner: Fraport AG). Die Aufgabenstellungen sind in beiden Fällen ähnlich. Es sollen fortlaufend 3D-Daten der interessierenden Bereiche (Streckennetz, Gebäude) aufgenommen und analysiert werden, um vorhandene Bestandspläne zu aktualisieren und für Engstellenanalysen (Bahn) oder die Planung von Wartungs- und Umbauarbeiten (Fraport) bereitzustellen. Dieser Prozess ist bislang von erheblichem interaktivem Aufwand geprägt. Punktwolken und Bilddaten der Bahnstrecken bzw. Gebäude werden manuell durchsucht und die interessierenden Geometrien und Objekte werden erkannt, identifiziert und gegebenenfalls modelliert. Die auf diesem Wege gefundenen bzw. veränderten Objekte werden dann in die aktualisierten Bestandsdaten aufgenommen.

Ziel des Projektes WiDOP ist es nun, diesen Prozess mittels wissenschaftlicher Verfahren zu automatisieren. Von entscheidender Bedeutung sind dabei zum einen die Abbildung und Formalisierung des Wissens, um es für den Rechner verarbeitbar zu machen (Idee des Semantic Web) und zum anderen die Verarbeitung des Wissens zur gezielten Steuerung mathematischer Algorithmen zur Punktwolken- und Bildverarbeitung. In den folgenden Absätzen sollen diese beiden Schwerpunkte näher erläutert werden.

3.1 Wissensbasis

Das ursprüngliche Konzept des Semantic Web, das auf einer Idee des World-Wide-Web-Mitbegründers Tim Berners-Lee basiert, sieht vor, die Bedeutung der im Internet auf Webseiten dargebotenen Inhalte mit Hilfe von Annotationen zu erfassen und somit eine semantische Vernetzung zwischen verschiedenen Webseiten zu ermöglichen. Dies würde es beispielsweise gestatten, Suchergebnisse viel gezielter an die Anfragen des Benutzers anzupassen oder sogar neues Wissen auf Basis der weltweit vorgehaltenen Daten zu generieren.

Voraussetzung ist eine einheitliche Beschreibungssprache, mit der Webseiten annotiert werden und die von Computern „verstanden“ und verarbeitet werden kann. Eine solche standardisierte Sprache ist die Web Ontology Language OWL, die vom World Wide Web Consortium (W3C) entwickelt und spezifiziert wurde. Diese muss jedoch nicht auf Webseiten limitiert sein sondern kann grundsätzlich auf beliebige „Ressourcen“ angewandt werden, und somit eine Form der Wissensrepräsentation für unterschiedlichste Anwendungen darstellen.

Das Konzept des Semantic Web mit der Beschreibungssprache OWL aufgreifend, treten bei WiDOP die zu detektierenden Objekte sowie die mathematischen Algorithmen an die Stelle von Webseiten. Es muss das Ziel sein, alle verfügbaren Informationen über diese vorhandenen „Ressourcen“ in einer ontologie-basierten Wissensbasis abzubilden, über Relationen und Regeln miteinander zu verknüpfen und dieses Wissen für eine intelligente, automatisierte Objekterkennung zu nutzen.

Die Strukturierung einer solchen Ontologie und ihre Befüllung mit Inhalten, die aus der vorhandenen Wissensbasis abgeleitet sind, ist der erste Schwerpunkt des WiDOP-Projektes. Wie oben erwähnt, sind die zu hinterlegenden Informationen im Wesentlichen zwei Hauptklassen zuzuordnen, den Objekten und den Algorithmen. Die Objektinformationen bestehen z.B. aus Position und Ausrichtung, Form und Größe, Oberflächenbeschaffenheit und Farbe, Nachbarschaftsbeziehungen und vielen mehr. Weiterhin können Informationen über die Objektrepräsentation in der Punktwolke hinterlegt werden. Beispielsweise werden bei der Bahnvermessung Objekte im Umgebungsbereich des Gleises nur aus einer Richtung, nämlich vom fahrenden Lichttraummesszug erfasst. Dementsprechend bildet sich ein Objekt in der zugehörigen Punktwolke nur partiell ab. Ebenso könnten Informationen über die zu erwartende Punktdichte auf dem Objekt hinterlegt bzw. generiert werden, sofern die verwendete Scanauflösung und die Entfernung zum Scanner bekannt sind. Die Algorithmen zur Objekterkennung lassen sich mit solchen Informationen viel gezielter steuern und sind damit robuster und effektiver.

3.2 Algorithmik

In der zweiten Hauptklasse werden die Informationen über die Algorithmen selbst hinterlegt. Diese werden zunächst in mehrere Unterklassen unterteilt, wie z.B. Algorithmen zur Vorverarbeitung, Segmentierung, Objekterkennung und Modellierung. Nachfolgend seien exemplarisch einige Algorithmen aufgeführt.

Tab. 1: Auswahl einiger Algorithmen

Klasse	Algorithmus	Parameter / Input	Verwendung für
Vorverarbeitung	Noise reduction	Filtermatrix	Punktwolken
	Uniform sampling	Punktabstand	Punktwolken
	Histogrammstreckung	Anfangs- /Endgrauwert	Bilder
	Projektion	Projektionsebene	Punktwolken
Segmentierung	Bounding Box	Koordinaten	Punktwolken
	Region Growing	Startpunkte, Ähnlichkeitswert	Punktwolken, Bilder
	Krümmungsbasierte S.	Ähnlichkeitswert	Punktwolken
Objekterkennung	Hough-Transformation	Geometrieparameter	Punktwolken, Bilder
	Kantenoperatoren	Filtermatrix	Bilder
Modellierung/ Rekonstruktion	Best Fit	Punktauswahl, Objekt	Punktwolken
	Template Matching	Template	Punktwolken, Bilder

Die hier aufgeführte Auswahl besteht aus sehr einfachen und etablierten Verfahren zur Verarbeitung von Punktwolken und Bildern. Dies ist auch beabsichtigt. Das Konzept sieht vor, einen sehr grundlegenden, modular aufgebauten „Werkzeugkasten“ vorzuhalten, aus dem sich die Wissensverarbeitung entsprechend der Regeln und der Wissensbasis bedienen kann. Dadurch werden auch komplexere kombinierte Verarbeitungsverfahren ermöglicht. Beispielsweise kann es nötig sein, zunächst eine Segmentierung der Punktwolke mittels einer Bounding Box durchzuführen. Dies ist selbstverständlich nur dann möglich, wenn die ungefähre Objektposition aus der Wissensbasis bekannt ist (z.B. aus Entwurfsplänen). Anschließend könnte eine Rauschreduktion durchgeführt werden, wenn das Objekt z.B. mit einem qualitativ schlechten Scanner erfasst wurde und die Datenqualität dadurch mangelhaft ist. Als letzter Schritt kann ein 3D-Template-Matching-Verfahren durchgeführt werden. Voraussetzung ist, dass es ein 3D-Modell des zu erkennenden Objektes gibt, welches entweder aus früheren Durchläufen der Objekterkennung stammt oder aus einem vorhandenen Objektkatalog bekannt ist.

Ein solcher Entscheidungs- und Verarbeitungsprozess wäre sehr flexibel und an verschiedenste Objektkonstellationen und Rahmenbedingungen adaptierbar. Selbstverständlich muss das zugrunde liegende Regelwerk die Basis für eine solche Entscheidungsfindung liefern (welche Algorithmen sind in welcher Reihenfolge mit welchen Parametern auszuführen?). Näheres dazu soll weiter unten erläutert werden.

4 Wissensmodellierung / Ontologie

Der Aufbau einer Ontologie für das Projekt WiDOP ist derzeit noch in der Entwicklung. Grundsätzlich soll ein zweistufiger Ansatz verfolgt werden. Erstens der Aufbau einer allgemein gültigen Ontologie, welche Klassen und Relationen für die wissensgestützte Objekterkennung in räumlichen Daten liefert. Zweitens eine Spezialisierung dieser Allgemeinontologie für bestimmte Anwendungen, hier beispielsweise für die Bahnvermessung und das Facility Management auf einem internationalen Flughafen.

Ein exemplarischer Ausschnitt aus der noch im Aufbau befindlichen WiDOP-Ontologie ist in Abb. 1 dargestellt. Hierbei handelt es sich um eine vereinfachte grafische Darstellung der Klassen in der Ontologie. Die Klassenstruktur bildet das Grundgerüst für die Festlegung von Relationen (*properties*). Die dargestellten „is-a“-Verbindungen legen lediglich die Beziehung der Klassen zueinander fest (Hauptklassen, Unterklassen) und sind bedeutsam für Vererbungsvorgänge. So würde eine Eigenschaft, die der Klasse „Edge_operators“ zugewiesen wird, auch auf die Unterklassen „Laplace_operator“ und „Sobel_operator“ vererbt.

Das eigentliche Wissen steckt allerdings in den noch zu definierenden Relationen zwischen den Klassen – und dementsprechend dann auch zwischen den Instanzen der Klassen, also den eigentlichen Daten, die sich innerhalb jeder Klasse befinden. Ein einfaches Beispiel sei im Folgenden beschrieben.

Die Klasse „Room“ steht mit den Klassen „Wall“, „Ceiling“ und „Floor“ in einer Beziehung. Alle sind gleichzeitig Unterklassen der Klasse „Object“. „Room“ kann mehrere „Walls“ enthalten aber nur einen „Floor“ und „Ceiling“. Gleichzeitig kann definiert werden, dass „Walls“ und „Floor“ bzw. „Ceiling“ senkrecht aufeinander stehen. Objekteigenschaften werden in der Klasse „Characteristics“ verwaltet. So würde man die Unterklasse „plane“ (eben) und „Wall“

miteinander in Beziehung setzen. Zusätzlich könnte man definieren, dass „Walls“ immer senkrecht stehen, indem man eine Unterklasse der Klasse „plane“ einführt, die „normal_vector“ lautet und das Attribut „horizontal“ besitzt. Damit wäre für jede Instanz der Klasse „Room“ eines Gebäudes klar, dass der Raum aus Wänden aufgebaut ist, die ebene Objekte sind, die senkrecht zueinander stehen. Diese Information ist für einen Menschen ohne weiteres nachvollziehbar. Für einen Computer ist das jedoch nicht der Fall, sondern muss explizit mittels einer solchen Ontologie festgelegt werden. Erst die Festlegung und Strukturierung dieses Wissens in Form von Relationen erlaubt es dem Rechner, automatisiert logische Rückschlüsse zu ziehen und in diesem Fall die passende Algorithmik zu Detektion von senkrechten Ebenen anzuwenden.



Abb. 1: Exemplarischer Ausschnitt aus der WiDOP-Ontologie

Die technische Grundlage zur Erstellung einer Ontologie bildet der freie Ontologie-Editor Protégé. Diese JAVA-basierte Anwendung gestattet die Definition von Klassen und Relationen sowie das Füllen der Ontologie mit Instanzen. Protégé beruht auf der Ontologiesprache OWL. Neben dem rein manuellen Aufbau einer Ontologie können bestimmte Quelldaten (Vorwissen) auch automatisiert in OWL überführt werden. So verwaltet WiDOP-Projektpartner Metronom die mittels Lichtraummesszug erfasste Daten und Objekte bei der Bahnstreckenvermessung in einer XML-Struktur. Da auch OWL eine XML-basierte Sprache ist, können die Daten mit geeigneten Tools automatisiert konvertiert werden. Im Falle des Facility Management bietet das IFC-Format als Standard für die Beschreibung von Gebäudemodellen eine gute Grundlage zur Erzeugung einer Ontologie für die Gebäudestruktur. Entsprechende Konverter sind in der Entwicklung (siehe SCHEVERS & DROGEMULLER, 2006) und werden derzeit hinsichtlich ihrer Eignung für WiDOP untersucht.

5 Wissensverarbeitung

Die größte Herausforderung ist jedoch nicht die Strukturierung und Formalisierung des Vorwissens, sondern dessen geschickte Nutzung und Verarbeitung für die Objekterkennung in den Messdaten. Die Kernproblematik ist dabei die Frage, wie die Beziehung zwischen den zu erkennenden Objekten und den zu verwendenden Algorithmen hergestellt wird.

Der naheliegende Ansatz besteht darin, Objekte und Algorithmik über jeweils gemeinsame Objektcharakteristiken miteinander zu verknüpfen. Wenn beispielsweise ein Algorithmus in der Lage ist, mittels Projektion einer Punktwolke in die Horizontalebene und anschließender Linienverfolgung senkrecht stehende Ebenen zu erkennen, so ist es naheliegend, diesen Algorithmus mit den entsprechenden Objektcharakteristiken in der Ontologie zu verknüpfen. Auf diese Weise würden alle Instanzen, die über diese Eigenschaften verfügen (hier z.B. die verschiedenen Wände der Klasse „Walls“, siehe oben), automatisch mit dem entsprechenden Algorithmus verbunden und könnten somit in der Punktwolke gefunden werden.

Ein solches Vorgehen, das rein auf Relationen zwischen Klassen beruht, wird jedoch nur in einfachen Fällen funktionieren. Komplexere Entscheidungsprozesse sind nur über ein Regelwerk, also mit Hilfe von *rules* durchführbar. Ein solches Regelwerk muss sich sowohl des Wissens über die Objekte einer bestimmten Domain, hier also Bahnvermessung oder Facility Management, bedienen, als auch dem Wissen über die Auswirkung der mathematischen Verfahren bis hinunter zur Parametrisierung der einzelnen Algorithmen (z.B. geschickte Wahl der Filtermatrizen für den Kantenoperator). Weiterhin soll ein Feedback der Algorithmik zur Wissensbasis gewährleistet sein, so dass das Ergebnis einer Objekterkennung in Form eines Binärwertes (TRUE, FALSE) oder einer qualitativen Aussage (Standardabweichung o.ä.) in die Wissensverarbeitung zurückgegeben wird und so gegebenenfalls die Anpassung der Algorithmik für eine zweite Iteration bewirkt.

Da sich das Projekt WiDOP noch im Anfangsstadium befindet, können über den Teil der Wissensverarbeitung noch keine detaillierten Aussagen getroffen werden. Derzeit wird untersucht, ob das Regelwerk auf konventionelle IF-THEN-Regeln aufbauen wird, oder ob es geschickter ist, unscharfe Beschreibungen für bestimmte Zustände und Rahmenbedingungen einzuführen (Fuzzy Logic).

6 Zusammenfassung und Ausblick

Dieser Beitrag präsentiert erste Ideen und Ansätze zur Wissensbasierten Detektion von Objekten in Punktwolken und Bildern im gleichnamigen, erst kürzlich gestarteten Forschungsprojekt am i3mainz. Unsere Lösung wird ontologiebasiert sein und sich damit an den Konzepten des Semantic Web orientieren. Das Vorwissen über die zu erkennenden Objekte (z.B. aus Bestandsplänen), über die einzusetzende Objekterkennungsalgorithmik und über die eigentlichen Messdaten soll in einem Wissensmodell strukturiert werden, um es so für automatisierte rechnergestützte logische Entscheidungsprozesse zur Verfügung zu stellen. Die Wissensverarbeitung wird auf einem Regelwerk aufbauen, das im Wesentlichen die Wahl und Parametrisierung der Algorithmik zur Objekterkennung steuert.

Die Arbeiten in der näheren Zukunft werden sich auf den Auf- und Ausbau der Ontologie, die Strukturierung und Bewertung der vorhandenen Algorithmik und die logische Verknüpfung der Algorithmik mit den Objekten bzw. ihren Charakteristiken konzentrieren. Als nächster Schritt folgen dann der Aufbau des Regelwerks sowie die Implementierung der Wissensverarbeitung und Algorithmik zur Durchführung der ersten praktischen Tests. Das Projekt wird im Herbst 2012 abgeschlossen sein.

7 Dank

Das im vorliegenden Aufsatz beschriebene Projekt wird vom Bundesministerium für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 1758X09 finanziert, wofür sich die Autoren herzlich bedanken.

8 Literaturverzeichnis

- BÖHLER, W. & MARBS, A., 2010: Investigating Laser Scanner Accuracy. http://scanning.fh-mainz.de/scannertest/results_300305.pdf (aufgerufen am 26. Mai 2010).
- BOOCHS, F., KERN, F., MARBS, A., SCHÜTZE, R., 2009: Ansätze zur geometrischen und semantischen Modellierung von großen, unstrukturierten 3D-Punktmengen. DGPF Tagungsband 18 / 2009, Jena.
- CRUZ, CH. & BOOCHS, F., 2007: Reconstruction of Architectural Objects from 3D Scanner Survey. In: Seyfert, E. (Hrsg.): DGPF-Tagungsband 16: 95-102.
- GRAU, O., 2000: Wissensbasierte 3D-Analyse von Gebäudeszenen aus mehreren frei gewählten Stereofotos. Dissertation, Universität Hannover.
- HOFMANN, A.D., MAAS, H.-G., STREILEIN, A., 2003: Derivation of roof types by cluster analysis in parameter spaces of airborne laserscanner point clouds. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing Vol. 34, Part 3/W13, pp. 112-117.
- PU, S. & VOSSELMAN, G., 2006: Automatic extraction of building features from terrestrial laser scanning. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, vol. 36, part 5.
- SCHEVERS, H. & DROGEMULLER, R., 2006: Converting the Industry Foundation Classes to the Web Ontology Language. Proceedings of the First International Conference on Semantics, Knowledge, and Grid.
- SCHWALBE, E., 2004: 3D building model generation from airborne laser scanner data by straight line detection in specific orthogonal projections. ISPRS Commission III / WG3. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 35, Part B, S. 249-254.
- VOSSELMAN, G., GORT, B.G.H., SITHOLE, G., RABBANI, T., 2004: Recognising structure in laser scanner point clouds International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing Vol. 36, part 8/W2, pp. 33-38.

Automatische Detektion von Bombentrichtern in digitalisierten Luftbildern des 2. Weltkriegs

Laura Jensen¹, Martin Drauschke² & Wolfgang Förstner¹

Zusammenfassung: Bei der Suche nach Blindgängern aus dem 2. Weltkrieg in Deutschland werden vom Kampfmittelbeseitigungsdienst seit den 90er Jahren auch Luftbilder der Alliierten Streitkräfte verwendet (CARLS & MÜLLER, 2007). Da eine automatische Detektion von Blindgängerverdachtspunkten ohne Kenntnis der Orientierung der Bilder und einer Georeferenzierung unmöglich ist, haben wir ein automatisches Verfahren zur Detektion von Bombentrichtern entwickelt. Mit Hilfe dieses Verfahrens können Bombentrichterdeckkarten erstellt werden, so dass die digitalisierten Bilder oder Bildausschnitte maschinell vorsortiert werden können. Unser Ansatz berücksichtigt die vielen Erscheinungsformen und Größen von Bombentrichtern, indem wir einerseits mehrere Trichterklassen lernen und andererseits die Repräsentanten dieser Klassen skalieren. Durch Korrelation werden die Kandidaten für Bombentrichter gefunden, die dann mittels der linearen Diskriminanzanalyse (LDA) als solche klassifiziert werden.

1 Einleitung

Im 2. Weltkrieg wurden durch die Luftstreitkräfte der Alliierten schätzungsweise bis zu 2 Millionen Tonnen Munition über deutschen Städten, Industriestandorten und Verkehrswegen abgeworfen, wovon ebenfalls Schätzungen zufolge 10 Prozent nicht detonierten (AH KMR, 2007). Allein in Nordrhein-Westfalen werden noch über 60 Jahre nach Ende des Kriegs jährlich mehr als 1000 Blindgänger mit einer Explosivstoff-Nettomasse von ca. 26 Tonnen entschärft³. Vor und nach den Bombardierungen wurden die Zielgebiete zu deren Erkundung bzw. zur Ergebnisüberprüfung der militärischen Operation überflogen, wobei mehr als eine Million Senkrechtluftbilder entstanden. Diese Luftbilder werden vom Kampfmittelbeseitigungsdienst seit den 90er Jahren zusammen mit weiteren Dokumenten und historischen Unterlagen sowie Geo- und Infrastrukturdaten genutzt, um die nicht detonierten Bomben aufzuspüren (AH KMR, 2007; CARLS & MÜLLER, 2007).

Aufgrund der großen Menge von Luftbildern und deren zeitaufwendiger Interpretation ist es wünschenswert, die Suche nach Blindgängern in den Luftbildern zu automatisieren. Dabei ist es schon bei manueller Inspektion sehr schwierig, die Blindgänger zu erkennen, da sie meist sehr klein und unauffällig sind. Zudem haben andere kriegsbedingte Strukturen wie Einmannlöcher eine ähnliche Erscheinungsform in den Luftbildern. LÜCKE ET AL. (2007) haben ein Verfahren entwickelt, das Blindgänger halbautomatisch unter Verwendung eines neuronalen Netzes

¹ Laura Jensen, Wolfgang Förstner, Professur für Photogrammetrie, Institut für Geodäsie und Geoinformation, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, Nußallee 15, 53 115 Bonn, Email: ljensen@uni-bonn.de, wf@ipb.uni-bonn.de

² Martin Drauschke (Korrespondierender Autor), Lehrstuhl für Photogrammetrie und Fernerkundung, Institut für Angewandte Informatik, Universität der Bundeswehr München, Werner-Heisenberg-Weg 39, 85 577 Neubiberg, Email: Martin.Drauschke@unibw.de

³ siehe <http://www.im.nrw.de/sch/725.htm>, zuletzt aufgerufen am 02. Juni 2010

detektiert. Es findet allerdings keine Verwendung in der Praxis, da dieser Ansatz eine zu hohe Fehlklassifikationsrate aufweist.

Da Blindgänger nur in Gebieten zu finden sind, die auch bombardiert wurden, wollen wir zunächst die Trichter der detonierten Bomben in den Luftbildern detektieren. Dies kann bereits auf einem einzelnen Bild realisiert werden. Das Verfahren kann später noch dahingehend erweitert werden, dass nach einer Georeferenzierung der Luftbilder eine Bombentrichterdichtekarte analog zu MERLER ET AL. (2005) erstellt wird, oder es wird eine Zeitreihenanalyse mit einem Szenenvergleich vor und nach der Bombardierung durchgeführt.

2 Konzept für die automatische Detektion von Bombentrichtern

Wir haben ein Verfahren zur Detektion von Bombentrichtern in einzelnen Luftbildern realisiert. Daher wählten wir einen erscheinungsbasierten Ansatz, in dem wir lediglich die Bildintensitäten auswerten. Um möglichst viele Variationen von Bombentrichtern erkennen zu können, berücksichtigen wir mehrere Luftbilder beim Lernen eines Modells für diese Objektklasse. Die Bombentrichter unterscheiden sich erstens in ihrer Größe, zweitens in der Struktur des Auswurfs und drittens in der Helligkeit bzw. der räumlichen Verteilung der Helligkeiten. Die Größenunterschiede sind auf verschiedenen Bombenkonstruktionen sowie auf die unterschiedlichen Bildauflösungen zurückzuführen. Im 2. Weltkrieg wurden Bomben mit einem Explosivgewicht zwischen 2 kg bei einer Stabbrandbombe und 6 t bei einer britischen Luftmine verwendet (AH KMR, 2007). Folglich entstehen auch unterschiedlich große Trichter. Der Auswurf variiert durch die unterschiedliche Stärke der Detonation, aber auch durch die verschiedene Beschaffenheit der Böden. Die Helligkeitsunterschiede kommen am häufigsten durch Wechsel des Sonnenstands (Schattenwurf) oder durch Wasser im Trichter vor. Abbildung 1 zeigt die Variationsbreite der Bombentrichter, die verschieden großen Trichter stammen alle aus demselben Luftbild.

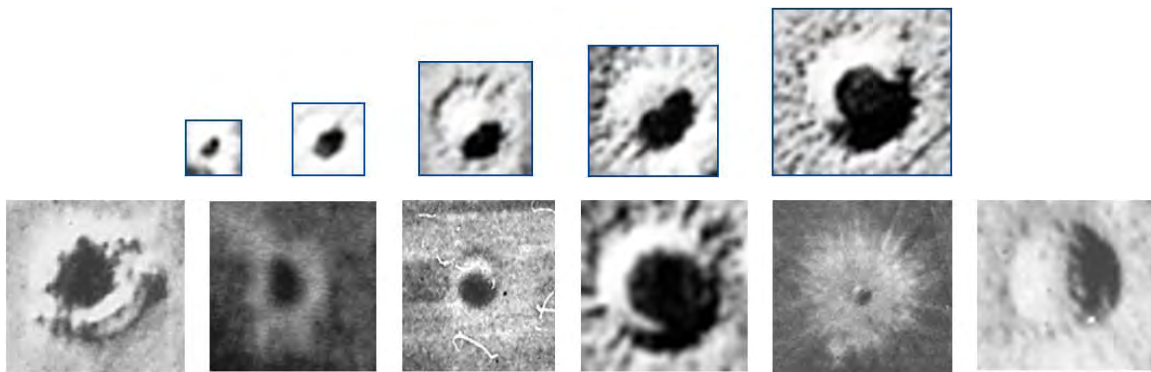


Abb. 1: Größen- und Formvariationen der Bombentrichter.

Unser Ansatz besteht aus drei Arbeitsschritten. Zuerst werden die Bilder optisch verbessert, d.h. wir führen eine Kontrastverbesserung mit Multidodging-Ansatz von DRAUSCHKE ET AL. (2009) durch und richten die Bilder so aus, dass der Sonnenstand auf allen einheitlich ist. Dann suchen wir geeignete Kandidaten im Bild und anschließend klassifizieren wir diese unter Berücksichtigung ihrer Umgebung.

Für die Auswahl der Kandidaten haben wir drei Detektionsverfahren verglichen. Durch die häufig kreisförmige Form des Bombentrichters im Bild eignet sich der Punktoperator von

FÖRSTNER & GÜLCH (1987) für die Kandidatenauswahl. Alternativ dazu haben wir auch den SIFT-Operator von LOWE (2004) ausprobiert, der insbesondere im Computer Vision eingesetzt wird. Als dritte Möglichkeit haben wir die Kreuzkorrelation mit verschiedenartigen und unterschiedlich großen Trichter-Templates in Betracht gezogen.

Ein gefundener Kandidat wird durch die Position im Bild, d.h. der x- und y-Koordinate des (Sub)-Pixel, und die Größe seiner Umgebung charakterisiert. Beim Punktoperator kann die Größe der Umgebung vom Suchfenster abgeleitet werden, beim SIFT-Operator definiert der dazugehörige Maßstab die Größe der Umgebung und bei der Korrelation die Größe des Templates.

Nach Skalierung der Umgebung aller gefundenen Kandidaten auf eine einheitliche Größe, wird aus den Bildintensitäten ein Merkmalsvektor erstellt. Diese werden dann klassifiziert, wobei die entsprechenden Klassenzugehörigkeiten (Trichter oder kein Trichter) durch Abgleich mit manuell annotierten Bombentrichtern erfolgt. MERLER ET AL. (2005) haben für ihre Klassifikation von Bildausschnitten verschiedene Boosting-Ansätze verwendet, die aber eine sehr hohe Komplexität haben (350 Stunden auf einem Pentium IV Prozessor mit 3 GHz fürs Lernen!). Daher haben wir uns für eine deutlich einfache Methode, die Klassifikation mit linearer Diskriminanzanalyse (LDA), entschieden.

3 Durchführung

3.1 Vorbereitung der Bilder

Bei der Digitalisierung der Aufnahmen aus dem 2. Weltkrieg kann wegen der großen Anzahl von Luftbildern keine ständige Anpassung der Beleuchtungsparameter erfolgen, siehe dazu die Ausführungen von DRAUSCHKE ET AL. (2007). Aus diesem Grund wurde in den vergangenen Jahren ein Algorithmus zur Kontrastverbesserung in den digitalisierten Bildern von DRAUSCHKE ET AL. (2009) entwickelt. Vor der Trichterdetektion erreichen wir so eine Anpassung aller Luftbilder in Bezug auf die Verteilung der Grauwerte, die Bilder weisen ähnliche Histogramme auf.

Da die Aufnahmezeit der Luftbilder bekannt ist, könnte man bei georeferenzierten Bildern den Sonnenstand modellieren und eine weitere Angleichung der Bilder bewirken. Durch das Fehlen der präzisen Orientierung der Bilder haben wir die Luftbilder manuell gedreht und derart ausgerichtet, dass die Sonne immer von unten strahlt und daher die Schatten immer noch oben fallen.

Vom Kampfmittelbeseitigungsdienst der Bezirksregierung Arnsberg haben wir 18 verschiedene Luftbilder zur Verfügung bestellt bekommen, die ein eher ländlich geprägtes Gebiet zeigen. Nach der Drehung der Bilder haben wir 34 vollständige Ausschnitte für die Trichterdetektion herausgesucht, die jeweils eine Größe von 2.400×2.000 Pixel haben. Alle Bildausschnitte liegen in der Originalauflösung vor, die Bombentrichterdichte variiert stark zwischen diesen Bildern.

Für die Klassifikation der Trichterkandidaten haben wir uns für ein überwacht Verfahren entschieden und deshalb alle 1.099 Bombentrichter in den 34 Bildausschnitten manuell annotiert. Dabei wurden sowohl die Position als auch der Radien des Trichters und des Auswurfkreises abgespeichert. So können die Trichter auch als gefunden markiert werden, in deren unmittelbarer Nähe wir Kandidaten gefunden haben.

3.2 Experimente zur Kandidatensuche

Wie im Abschnitt 2 bereits erwähnt, haben sowohl die Bombentrichter als auch der Auswurf verschiedene Größen und Formen, aber häufig eine kreisförmige Struktur. Aus diesem Grund haben wir für die automatische Detektion von Trichterkandidaten drei Verfahren vergleichend untersucht: der Punkt- bzw. Kreismittelpunktdetektor von FÖRSTNER & GÜLCH (1987), den im Computer Vision beliebten SIFT-Operator von LOWE (2004) als auch die Detektion mittels Kreuzkorrelation mit einem Trichter-Template.

Der Punktoperator von FÖRSTNER & GÜLCH (1987) kann die kleinen Bombentrichter als Punkte erkennen, und die größeren als Kreise, deren Mittelpunkt er dann ausgibt. Wir haben das Suchfenster so angepasst, dass es die meisten Bombentrichter umrandet. Die Abbildung 2 zeigt links die vom Punktoperator gefundenen Trichterkandidaten. Der SIFT-Operator von LOWE (2004) arbeitet ohne weitere Angabe von Parametern und liefert markante Bildstrukturen in verschiedenen Maßstäben. In der Abbildung 2 zeigen wir rechts die Ausgabe des SIFT, die Größe der Kreise wird durch den Maßstab der detektierten Strukturen festgelegt.

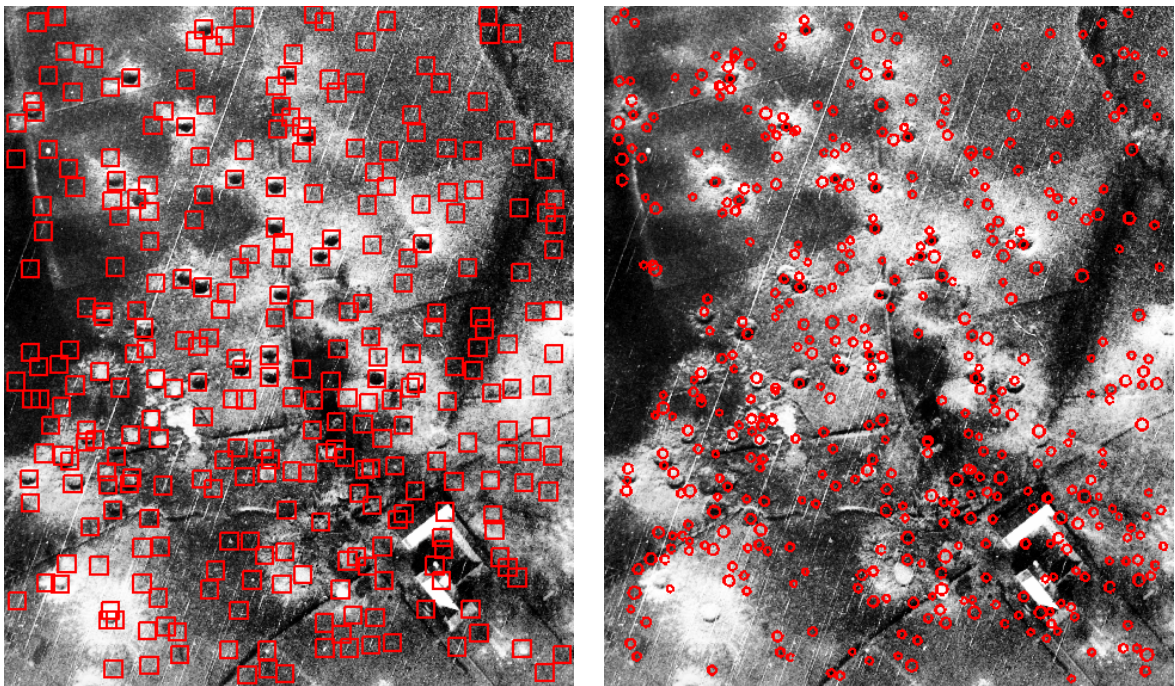


Abb. 2: Ausgabe der Kandidatensuche. Links: Punktoperator von FÖRSTNER & GÜLCH (1987). Rechts: SIFT-Operator von LOWE (2004).

In den 34 Bildausschnitten wurden 8.193 Kandidaten durch den Punktoperator und 107.497 Kandidaten durch den SIFT-Operator gefunden. Dem stehen aber nur 1.099 annotierte Bombentrichter gegenüber. Ein annotierter Bombentrichter gilt als gefunden, wenn in seinem Trichterkreis mindestens ein Kandidat gefunden wurde. Bei beiden Ansätzen werden ca. 80 Prozent der annotierten Trichter als Kandidaten gefunden.

Als Alternative zu den beiden Struktur-Detektoren bietet sich die Kreuzkorrelation mit einem oder mehreren Templates an. Die Kreuzkorrelation des Bildes mit einem Template liefert eine

Korrelationsmatrix, die die Ähnlichkeit des Templates mit dem entsprechenden Bildbereich repräsentiert. Wir haben als Template ein Bild verwendet, das einen möglichst allgemeinen und repräsentativen Trichter zeigt. Die Positionen der lokalen Maxima dieser Korrelationsmatrix werden als mögliche Trichterpositionen im Bild akzeptiert, wenn sie einen größeren Korrelationswert als 0,7 haben. Die Größenvariationen der Trichter können durch Verwendung des Templates in verschiedenen Größen berücksichtigt werden.

JENSEN (2008) hat ein für alle Trichter geltendes Trichter-Template als Durchschnitt aller annotierten und auf eine einheitliche Größe skalierten Bombentrichter berechnet und dieses in fünf verschiedenen Größen verwendet. Dieses Trichter-Template zeigt eine dunkle, kreisförmige Struktur vor hellem Hintergrund, d. h. die verschiedenen Erscheinungsformen der Bombentrichter bleiben unberücksichtigt. Mit diesem Template wurden 70 Prozent der annotierten Trichter gefunden, zeitgleich aber auch mehrere tausend Bildausschnitte, die keine Trichter zeigen. Eine - im Folgenden dargestellte - Spezialisierung der Templates bringt demgegenüber zwei Verbesserungen mit sich: wir können die Anzahl der gefundenen Bombentrichter erhöhen und gleichzeitig die Anzahl der falschen Kandidaten verringern.

3.3 Kandidatensuche mit mehreren Templates

WENZEL & FÖRSTNER (2008) haben ein interaktives Verfahren zur Erstellung von Templates vorgestellt. Zuerst wird ein charakteristischer Bildausschnitt als erstes Template definiert. Durch Kreuzkorrelation werden dann diesem Template ähnliche Bild gefunden. Falsche Korrespondenzen werden interaktiv gelöscht, dann wird das Template als Mittelung aller gefundenen Bildausschnitte aktualisiert. Nach mehreren Iterationen ist das erste Template ziemlich stabil, so dass nun weitere Templates definiert werden können.

Wir haben diese Vorgehensweise für die Bombentrichter angewandt und auf diese Weise acht Klassen von Bombentrichtern definiert. Die acht Templates dieser Trichterklassen werden in Abbildung 3 gezeigt.

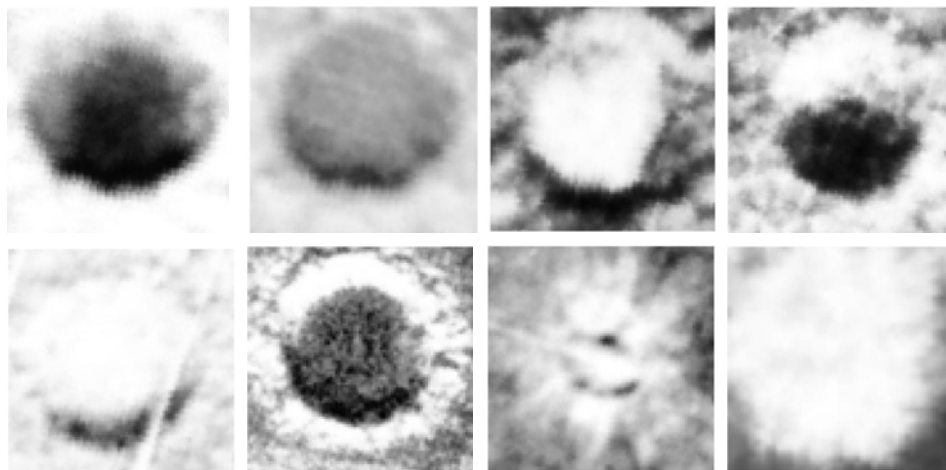


Abb. 3: Templates der acht Trichterklassen.

In unseren Experimenten haben wir mit diesen acht Templates 815 der 1099 annotierten Bombentrichter gefunden, was einer Detektionsrate von 74 Prozent entspricht. Der Anteil der falschen Kandidaten liegt bei nur 16 Prozent. Selbst ohne weitere Klassifikation dieser Kandidaten ist damit die Suche nach Bombentrichtern erfolgreich und deutlich besser als die anderen untersuchten Verfahren.

Analog zu Abbildung 2 zeigen wir in Abbildung 4 die Ergebnisse der Kreuzkorrelation sowie das Originalbild als Vergleich. Die verschiedenen Templategrößen werden durch verschieden große Boxen gekennzeichnet. In unseren Versuchen haben wir vier verschiedenen Seitenlängen für unsere Templates verwendet: 55, 85, 115 und 165 Pixel. Die meisten annotierten Bombentrichter haben einen Durchmesser von 85 Pixel. Da die Kreuzkorrelation noch gut mit Maßstabsdifferenzen von 20 Prozent umgehen kann, haben wir die anderen Templategrößen mit Abweichungen um 40 Prozent ausgesucht.

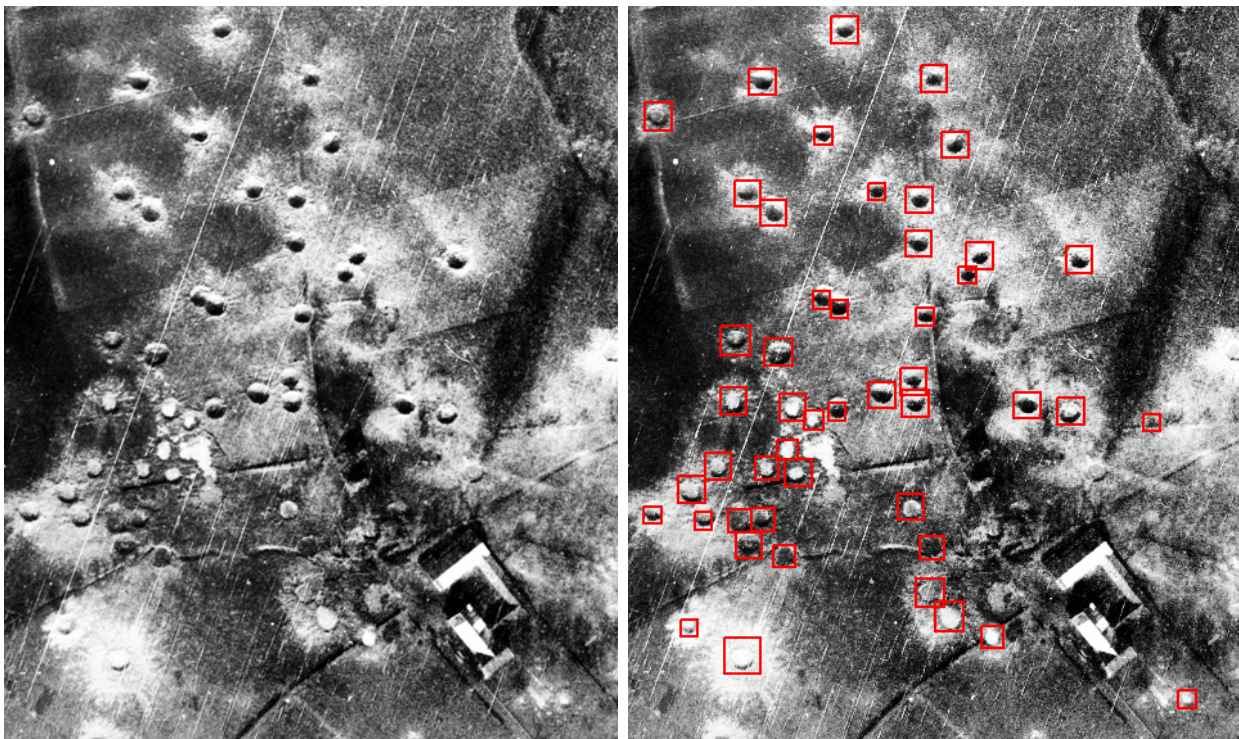


Abb. 4: Luftbildausschnitt (links) und Ergebnis der Kandidatensuche mittels Kreuzkorrelation und acht Trichter-Templates in vier verschiedenen Fenstergrößen (rechts).

3.4 Merkmalsvektor der Trichterkandidaten

Jeder gefundene Trichterkandidat besteht aus einer Position und der Fenstergröße des Templates, mit dem der Kandidat gefunden wurde. Nun muss für jeden Kandidaten ein Merkmalsvektor erstellt werden, der dann bei der Klassifikation verwendet wird. Die korrekten und falschen Kandidaten haben alle eine sehr ähnliche, kreisförmige Struktur, unterscheiden sich aber stark in der Umgebung. Daher vergrößern wir die Fenstergröße eines Kandidaten um das 1,5-fache.

Die verschiedenen großen Fenster der Kandidaten könnten je nach Größe unterschiedlich klassifiziert werden, d. h. wir klassifizieren alle Kandidaten, die durch Kreuzkorrelation mit dem 55×55 großen Template gefunden wurden, und für die anderen Kandidaten könnten wir eigene Klassifikatoren trainieren. JENSEN (2008) hat aber schon gute Klassifikationsergebnisse erzielt, obwohl sie alle Kandidaten auf eine einheitliche Fenstergröße skaliert hat, so dass wir diese Vorgehensweise beibehalten haben.

Wir haben die Fenster aller Kandidaten auf eine einheitliche Größe von 85×85 Pixel skaliert. Da wir die Fenstergrößen der Templates auf 1,5-fache vergrößert haben, werden die Fenster der kleinsten Kandidaten nochmals leicht vergrößert, die der anderen aber stark verkleinert. Anschließend wird die Matrix der interpolierten Bildintensitäten in einen Vektor überführt, der 7.225 Merkmale vereint.

3.5 Klassifikation der Trichterkandidaten

Für die Klassifikation der Trichterkandidaten mit der linearen Diskriminanzanalyse (LDA) hat JENSEN (2008) bereits gute Ergebnisse erzielt. Wir haben zusätzlich die Verwendung von Support Vektor-Maschinen (SVM) überprüft, aber von ihrer Verwendung wieder abgesehen, da sie sich zu sehr an die Trainingsdaten anpassen und daher zum Overfitting des Klassifikators führen. Aus Platzgründen können die hier verwendeten Techniken nicht weiter erklärt werden, wir verweisen dazu auf einführende Literatur, z. B. das Lehrbuch von DUDA ET AL. (2001).

Da unser Merkmalsraum eine Dimension von 7.225 aufweist, ist die LDA bei der Berechnung der Eigenwerte sehr instabil. Deshalb haben wir der Projektion in den LDA-Unterraum eine Hauptachsentransformation (PCA) vorgeschaltet. Die PCA projiziert jeden Merkmalsvektor in einen Unterraum, der 95 Prozent der Varianz der Merkmale darstellt. Er hat die Dimension 66.

Mit der LDA erfolgt dann eine weitere Projektion in einen anderen Unterraum, der bei unserem 2-Klassen-Fall die Dimension 1 hat. Im LDA-Unterraum entscheidet der Abstand zum nächsten Klassenmittelpunkt über die Ausgabe des Klassifikators.

Unsere Klassifikation haben wir mit einem Leave-One-Out-Test durchgeführt, d. h. wir haben 34 Versuche durchgeführt, in jedem Versuch mit allen Kandidaten aus 33 Bildausschnitten gelernt, und dann mit den Kandidaten des fehlenden Bildes getestet. In unseren Tests erreichen wir eine Fehlerrate von ungefähr 10 Prozent. Das Klassifikationsergebnis ist ausreichend für die Einschätzung, ob der Bildausschnitt viele Bombentrichter zeigt oder wenige.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Wir haben ein Verfahren entwickelt, um in digitalisierten Luftbildern des 2. Weltkriegs Bombentrichter zu finden. Mittels Kreuzkorrelation lassen sich die meisten Bombentrichter finden, wenn man mit verschiedenen Trichter-Templates in mehreren Größen arbeitet. Diese Vorauswahl ist schon sehr zuverlässig in Bezug auf die Detektionsrate, zudem werden nur wenige Nicht-Trichter als Kandidaten gefunden. Mit der linearen Diskriminanzanalyse konnten die meisten der Kandidaten richtig klassifiziert werden, d. h. die Trennung in Trichter und Hintergrund ist wirksam.

Eine Bombentrichterdeckkarte kann leider erst bei georeferenzierten Luftbildern erstellt werden, aber unser Verfahren ist in der Lage einzuschätzen, ob ein Bildausschnitt viele oder

wenige Bombenrichter aufweist. Eine Georeferenzierung der Bilder ermöglicht auch eine Zeitreihenanalyse, mit der noch wirksamer Bombenrichter detektiert werden könnten. Dann könnte man die automatische Erkennung von Blindgängern untersuchen.

5 Literaturverzeichnis

- BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR, BAU UND STADTENTWICKLUNG & BUNDESMINISTERIUM DER VERTEIDIGUNG (HRSG.), 2007: Arbeitshilfen zur wirtschaftlichen Erkundung, Planung und Räumung von Kampfmitteln auf Liegenschaften des Bundes (AH KMR). 678 S., erhältlich unter http://www.ofd-hannover.de/KMR/KMRDocs/Downloads/Arbeitshilfen_KMR/, zuletzt aufgerufen am 02. Juni 2010.
- CARLS, H.-G. & MÜLLER, W., 2007: Die Aktualität der Vergangenheit – der Krieglufbildbestand “JARIC” in der modernen Kampfmittelbeseitigung. PFG, **2007** (2), S. 121-129.
- DRAUSCHKE, M., BRUNN, A., KULSCHEWSKI, K. & FÖRSTNER, W., 2007: Automatic Dodging of Aerial Images. In: SEYFERT, E. (Hrsg.): Publikationen der DGPF, Band 16: Von der Medizintechnik bis zur Planetenforschung – Photogrammetrie und Fernerkundung für das 21. Jahrhundert. Muttentz 2007, S. 173-180.
- DRAUSCHKE, M., FÖRSTNER, W. & BRUNN, A., 2009: Multidodging: Ein effizienter Algorithmus zur automatisierten Verbesserung von digitalisierten Luftbildern. In: SEYFERT, E. (Hrsg.): Publikationen der DGPF, Band 18: Zukunft mit Tradition. Jena, 2009, S. 61-68.
- DUDA, R. O., HART, P. E. & STORK, D. G., 2001: Pattern Classification. John Wiley & Sons.
- FÖRSTNER, W. & GÜLCH, E., 1987: A Fast Operator for Detection and Precise Location of Distinct Points, Corners and Centers of Circular Features. In: Proceedings Intercommission Conference on Fast Processing of Photogrammetric Data. Interlaken, Schweiz, 1987, S. 281-305.
- JENSEN, L., 2008: Automatische Detektion von Bombenrichtern. Bachelorarbeit, Institut für Geodäsie und Geoinformation, Universität Bonn.
- LOWE, D. G., 2004: Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints. IJCV, **60** (2), S. 91-110.
- LÜCKE, C., CRUSE, C. & MÜTERTHIES, A., 2007: Entwicklung und operationelle Anwendung der halbautomatisierten Krieglufbildanalyse zur Detektion von Blindgängern. PFG, **2007** (7), S. 495-502.
- MERLER, S., FURLANELLO, C. & JURMAN, G., 2005: Machine Learning on Historic Air Photographs for Mapping Risk of Unexploded Bombs. In: Image Analysis and Processing - ICIAP 2005. LNCS 3617. Cagliari, Italien, 2005, S. 735-742.
- WENZEL, S. & FÖRSTNER, W.: Semi-supervised incremental learning of hierarchical appearance models. In: Proceedings of the 21st Congress of the International Society for Photogrammetry and Remote Sensing. Vol. XXXVII, Part B3b-2. Peking, China, 2008, S. 399-404.

A MDV - Based approach for appearance enhancement of historical images

M. Alfraheed¹, A. Alamouri², S. Jeschke³

Abstract:

The approach based on the Mahalanobis Distance Value (MDV) is introduced for appearance enhancement of objects included in images; and especially for study cases dealing with historical images. In those cases, this approach allows an automatically reducing of the noise pixels and distortion parameters associated with an image. First of all, an image is divided into Seed Regions (SRs) based on watershed transformation. Each SR created is divided into non-overlapping subregions based on the Intensity Values (IVs) associated with (MDV). Subregions which have the same MDV and different intensity values have to be separated. Therefore, the subregion with the minimum MDV is considered as Reference Partition (RP) used for the separation process. IVs of a final generated subregion are replaced by the IV which has the largest frequency associated with. As a result, each subregion takes a new color which is relatively close to its original color but more clear and low gradient. The performance of the MDV-based approach is expressed through a comparison to other approaches used for appearance enhancement of images (like: Gaussian filter).

1 Introduction

The resolution of an image plays an important role in automated object recognition. Usually, a high image resolution improves this process. Unfortunately, a high image resolution is not always available (e.g. historical images). In this context, most of historical images are of analogue types and have to be scanned in order to obtain digital data. These new digital data often include different distortion parameters (e.g. radial parameters). This leads to new challenges for image understanding. In this article, an effective approach for the appearance enhancement of objects (e.g. buildings, parts of buildings) included in historical images will be investigated. Hereby, noise pixels and distortion parameters will be automatically reduced.

The principle of our contribution, which is called MDV-based approach, depends on processing small object partitions of the historical image instead of the whole object. Therefore, the MDV-based approach enhances the small parts of the image's objects. In this approach, the term "Seed Region (SR)" is here defined for representing the semi-similar intensity values through a closed region. In SRs the scattered intensity values (which form the subregion) prevent the MDV-based approach to estimate the representative color of the subregion. The MDV-based approach adopts these scattered intensity values through redistributing them into subregion using MDV which is a multivariate measure of the separation of the data set in space (Gonzalez et al, 2004). The subregions which represent the levels of the MDV (except the first level) still prevent the MDV-approach to estimate the

¹ Institute of Information Management in Mechanical Engineering & Center of Learning and Knowledge Management Dennewartstraße 27, D-52068 Aachen
alfraheed@zlw-ima.rwth-aachen.de

² Institute for Geodesy and Geoinformation, Berlin Institute of Technology, Straße des 17. Juni 135, D-10623 Berlin, alamouri@mailbox.tu-berlin.de

³ Institute of Information Management in Mechanical Engineering & Center of Learning and Knowledge Management Dennewartstraße 27, D-52068 Aachen
sabina.jeschke@zlw-ima.rwth-aachen.de

representative intensity values. Therefore, the MDV-based approach considers the first level of the MDV as a reference subregion used for the separation process.

As a result, each partition will take a new color which is relatively close to its original color but more clear and low gradient. The suggested approach has several advantages over previously used methods (e.g. Gaussian Filter) which have been introduced by Gonzalez et al, (2004) for enhancing the appearance of the gray level images. The drawback of their developments is that these methods convergent the IVs based on static parameters instead of enhancement of the whole image. Furthermore, the approach enables more accurate object detection because the object's edges, which are generated from enhanced images, are clearer than those edges generated from un-enhanced images.

The investigations and implementations of the experiments achieved in this approach are based on the data acquired from the historical aerial images of Baalbek in Lebanon. These photos were taken in the year 1937 through the French mandate and located in the institute of *Français du Proche Orient* (IFPO) in Damascus as celluloid photographic film. They were performed on glass sheets with the size of 18×13 cm with four fiducial points. These images were scanned and sent to University of Technology Cottbus in Germany. Unfortunately the resolution of the scanner used is unknown, but by using image processing softwares (e.g. Adobe Photoshop CS2) it can be found that the photo's resolution is 96 dpi (dots per inch), i.e. the size of a pixel is $\sim 0.25 \times 0.25$ mm.

In the 3rd section of this article, the principle of the MDV-based approach and its four phases are expressed. Furthermore, we present the experimental results of the approach in the fourth section. Finally, we denote our conclusions and pose some ideas for future work.

2 Related work

Image appearance has a direct impact on image understanding; especially for historical images which are in most cases available only in analogue form. The scan-process of analogue images requests a superior performance in order to collect the data set without any type of distortion. In the context of the superior performance, the ability of UltraScan500 (a modern photogrammetric scanner manufactured by Vexcel Imaging Austria) to transform analogue images into digital format was discussed by Gruber & Leberl (2000). In addition, they introduced an approach for color enhancement within the scanning process in which images are scanned in parts. This leads to distortion factors (either photogrammetric or color factors). These factors are still available in the appearance of the historical aerial images. Therefore, Yuzhong & Jakkula (2007) have been developed two algorithms for removing the effects of the scattering and absorptions which represent the atmosphere effects. In the study case of Baalbek's historical images, both algorithms are not applicable for processing the distortions presented here because they require that the distortions affect on the whole image evenly. In our case, the distortion type of historical images of Baalbek affects unevenly on parts of the image.

In several image processing applications, the main purpose of the image enhancement is to detect the objects edges. Starting with this principle, Mansoor and et al. (2008) suggested an approach which detects the edges of the various objects in aerial images. Based upon fuzzy morphology, these edges are undergone to enhancement process as required. The result of this process enables to detect and enhance the required objects whose edges are approximately clear, whereas unclear objects will be eliminated. This conflicts with the

objective of this work which deals with all objects in the image. Therefore, fuzzy morphology based approach cannot be applied for our purpose.

Different methods of the spatial and frequency domain had been proposed for enhancement of historical images (Shi et al, 2005, 2009, 2004, Agam et al., 2007, Wang et al., 2003, Yahya et al., 2010). These approaches depend on an estimation of the background color for separating the background and objects of historical images from each other. In this context, it is difficult to apply these methods to Baalbek's images because the historical aerial images are composed of objects contiguous with each other. Therefore, there are no visible features describing the images' background.

According to (Gonzalez & Woods, 2002), the canny detector – which is an important filter used for edge detection – enhances the image at the initial step. The enhancement process depends on the usage of Gaussian filter which groups the semi-similar intensity values together based on the value of Standard Deviation SD. Performance of the Gaussian filter had been proved in several types of digital images. In the filter, the value SD should be already given as appropriate value. As a result, the intensity values of the whole region of the object in historical aerial image are replaced by a certain intensity value, whereas the whole region consists of different subregions. Starting from this challenge, another criterion will be investigated. It depends on grouping the semi-similar regions and redistributing the whole region of the object in historical aerial image based on MDV.

3 MDV- based approach

The main core of the MDV-based approach depends on processing the seed regions generated by grouping the semi-similar regions together. These semi-similar regions will be redistributed based on MDV. This process aims to increase the opportunity for extracting the noise intensity values. In addition, the new subregions of the image's objects on the historical images are determined. Consequently, the appearance of the objects on the historical images is improved as a result of the noise reduction. Furthermore, objects of the historical images are identified for analysis process. The principle of MDV-based approach consists of four stages which are shown in figure (1).

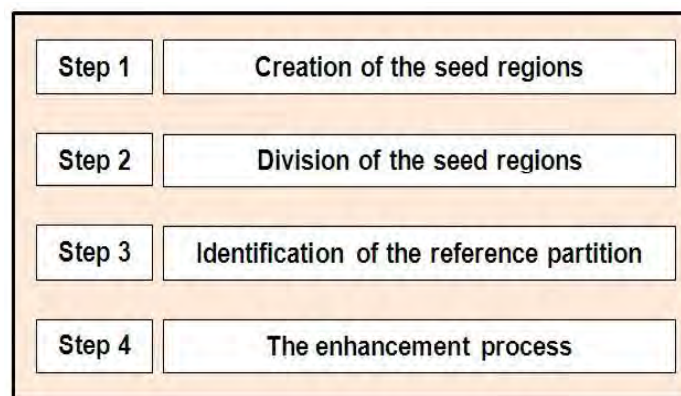


Figure (1): Main steps of the MDV-based approach

3.1 Creation of the seed regions

A seed region is an extension of the seed point which has been introduced in region growing algorithm (Gonzalez & Woods, 2002), for initializing the segmentation operations. In this work, the seed region is an initial closed region of the intensity values. It refers to groups of semi-similar intensity values instead of using an intensity value for initializing the enhancement process. This enables to deal with object partitions of the historical aerial images instead of a whole object. The approach enables therefore to enhance small parts of objects. In addition, the noise intensity values will be limited just in those small parts.

A basic method used for creation of a seed region is the manual selection of the required regions. This has an impact on reducing the efficiency of the MDV-approach; therefore this method is not desirable to be applied here. In several cases, the morphological operations (Gonzalez & Woods, 2002) are used to generate the required seed region automatically. In the case of historical aerial images, the object edges generated by morphological operations are not connected together. In addition, to link these edges, several morphological operations should be repeated many times on the historical aerial images. That leads to hide many parts of objects in edges. Therefore, the challenge related to the non-closed edges prevents the seed regions to be generated by morphological operations. This challenge has been solved by the watershed transformation (Gonzalez & Woods, 2002, Gonzalez et al, 2004). Generally, the watershed transformation is a powerful tool for image segmentation. By viewing an image as a geological landscape, this transformation considers any image as a topographic surface flooded by water from its minima. Watershed lines determine the boundaries that separate image regions. The watershed transform is applied to gray scale images to resolve a variety of intensity values and to segment the closed region in the image. The segmentation process of the watershed transform depends on extracting the watershed boundaries which divide the regional minima (M) in each other. The height of the regional minima is proportional to gray scale values (intensity values) in the historical aerial image. In addition, the transformation requires that each regional minima has a catchment basin $C(M)$ associated with regional minima. $C(M)$ denotes a set of coordinates of points in a catchment basin. In practice, the transformation operation is performed to express the following values:

$$T(n) = \{(s, t) \mid g(s, t) < n\} \quad (1)$$

$$C_n(M_i) = C(M_i) \cap T(n) \quad (2)$$

where:

g : input image, s, t : the index of the width and the height respectively, n : an increment value representing the height of the regional minima

The heights of the regional minima are arranged from (min + 1) to (max +1), so that the min and max are the minimum and maximum intensity values of the image, respectively. The result of the equation (1) represents the coordinates set of the points in image (g) lying below the plane (n), whereas the $C_n(M_i)$ represents the coordinates of the points belonging to a set of catchment basin as well as they satisfy the $T(n)$ conditions. In order to construct the watershed boundaries (object edges), both $C_n(M_i)$ and $C_n(M_{i+1})$ are compared together based on intersection operation \cap . If there is an overlapping between both sets, the border is determined between $C_{n-1}(M_i)$ and $C_{n-1}(M_{i+1})$. Otherwise, both (M_i) and (M_{i+1}) are grown. The result of the watershed transformation applied is shown in Figure (2).

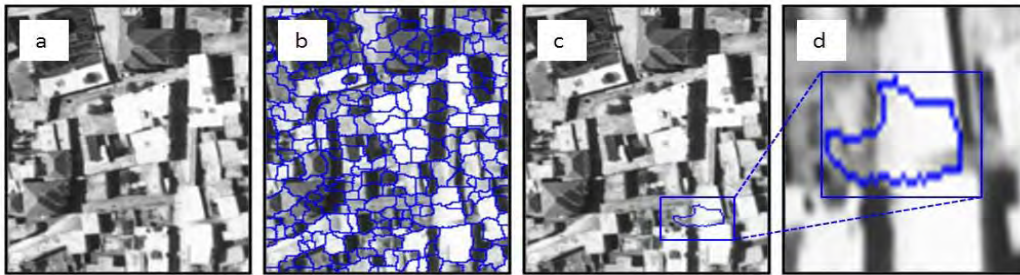


Figure (2): The results of the watershed transformation; (a): original image, (b): image based on watershed transformation, (c): a sample of a seed region created and (d): a close view (zoom in) of the seed region created

3.2 Division of seed region

Based on the watershed transformation an image's objects could be extracted based on the background. Figure (2, b) shows the results yielded by applying the watershed transformation to the historical image. These results reveal that the detected edges do not determine exactly the required object because the intensity values of that object do not vary smoothly. Despite the watershed transformation did not extract the required objects exactly but it created the seed regions successfully. However, the seed regions compose of scattered values which form different subregions. Therefore, the estimation of a certain intensity value will be invalid to represent the seed region. To overcome this challenge, the seed regions should be divided into subregions. That enables the MDV-based approach to enhance subregions which are smaller than seed regions. In addition, the intensity value estimated in the next phase will be more exclusively.

In practice, one of the suggested solutions for redistributing the intensity values of the seed region is to generate an optimal threshold value. Unfortunately, the histogram process of these values – which is a tool for generating the threshold value – is not able to adopt these scattered values because these values need more than a threshold value. In addition, the result of the redistributions will not be accurate. The basic method to find the threshold value is not applicable here.

The solution presented here adopts these scattered values depending on MDV in redistributing the intensity values. The MDV has been introduced in linear discriminant analysis of the statistic (Geoffrey, 1992). In this article, the MDV has been used to measure the distance between each intensity value of the seed region and the same set of the intensity values. MDV is calculated as following:

$$D_m(X) = \sqrt{(x - \mu)^T S^{-1} (X - \mu)} \quad (3)$$

where:

- X : intensity value
- μ : the mean of intensity values associated with a seed region
- S : covariance matrix
- $D_m(X)$: MDV of the value X

Intensity values of the seed region have been distributed based on MDV (cf. figure 3, a). In addition, the subregions are not overlapping. In figure (3, b), the yielded subregions have been colored to illustrate the results in the historical aerial image.

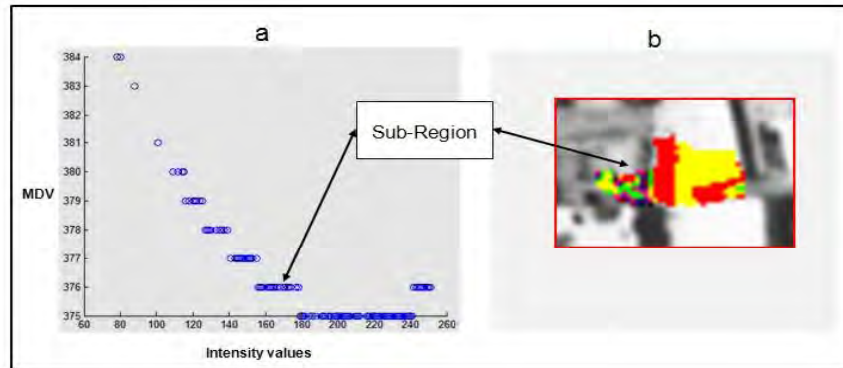


Figure (3): Results of the division process of seed regions; (a): the histogram of a partition based on intensity values and MDV, (b): illustration of the divided seed region

3.3 Identification of the Reference Subregion

The benefit achieved from division of seed regions is to facilitate the estimation task which aims to find a certain intensity value for each subregion. Due to that there are two subregions with the same MDV and different intensity values, a new problem is arisen which prevents the estimation task to be applied. To illustrate this problem clearly, figure (4) shows that the second level of the MDV equals 376 and the same level has two ranges of intensity values. Therefore, it is difficult to represent these ranges by a certain intensity value.

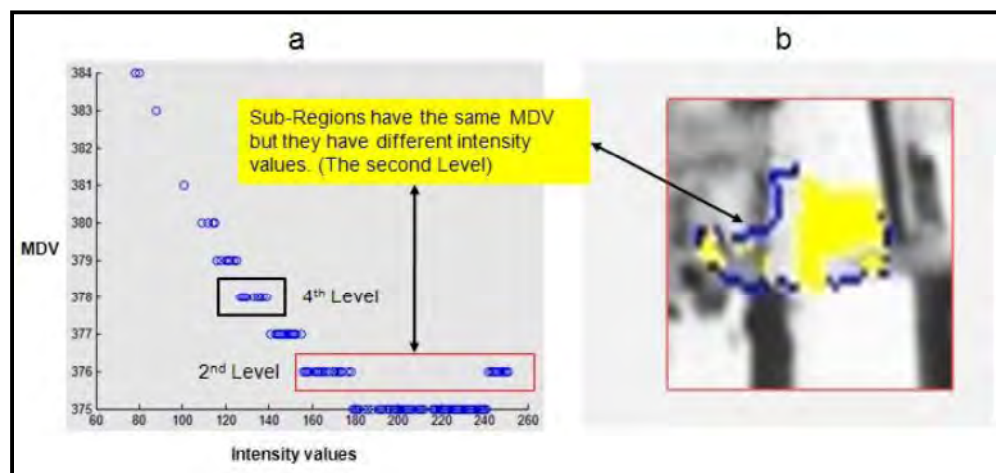


Figure (4): The estimation of a certain intensity value for each subregion. In this context, (a) shows the histogram of subregions based on intensity values and MDV, (b): a view of subregion with the same MDV and different intensity values

The MDV is a measurement of distance between two groups of numbers to find the similarity depending on calculating the distance between each value in the first group and the center of the second group (Geoffrey, 1992). In this article, both groups represent the same set of the intensity values of the seed regions. Consequently, the MDV measures the distance between each intensity value of the seed region and the center of the same seed region. In figure (5), the first level of the distance could be measured by one range (from A to B). In contrast, the

other levels of the distance have to be measured by two ranges (i.e. for the second level, the ranges are from C to A and B to D). Therefore, levels of MDV (except for the first level) consist of two ranges.

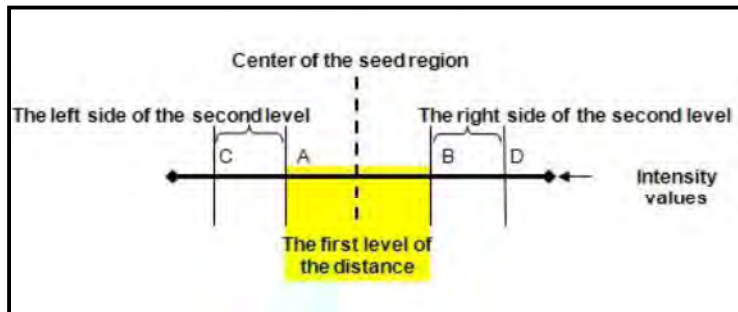


Figure (5): An Illustration of ranges of the MDV levels

The suggested solution of this challenge is that the first level of the MDV will be chosen to be the reference subregion in each seed region. Figure (6) shows that both sides of the first level will be separated. Consequently, subregions which have the same MDV and different intensity values will be distinguished by the right and left side of the reference subregion.

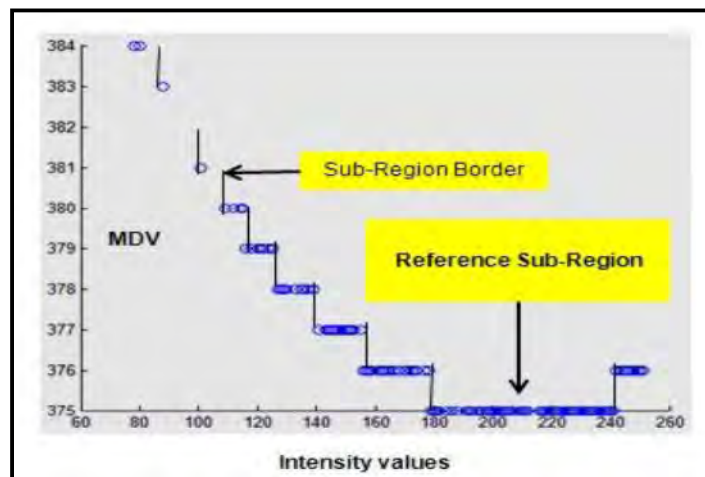


Figure (6): The histogram of subregions with borders of subregions

3.4 The estimation task

The main core of this step is to estimate a certain intensity value for each subregion of the historical aerial image. Therefore, each subregion will take a new intensity value which is relatively close to its previous intensity values but more clear and low gradient.

The estimation process depends on a histogram process for determination of a new intensity values. In the histogram process, each subregion is represented as the histogram which is given as a discrete function (Gonzalez & Woods, 2002, Gonzalez et al, 2004):

$$H(R_k) = N_k \tag{4}$$

where:

R_k : k th intensity value

N_k : the number of the pixels in the image (with respect that those pixels have the intensity value R_k)

Figure (7) shows an example of the histogram which represents the reference subregion created in section (3.3).

Once the histogram is created, the intensity value R_k associated with the largest N_k will be selected to be the new intensity value of the subregion. The largest N_k has been selected because the intensity value, which has the largest frequency in the histogram, is often the representative color of the subregion.

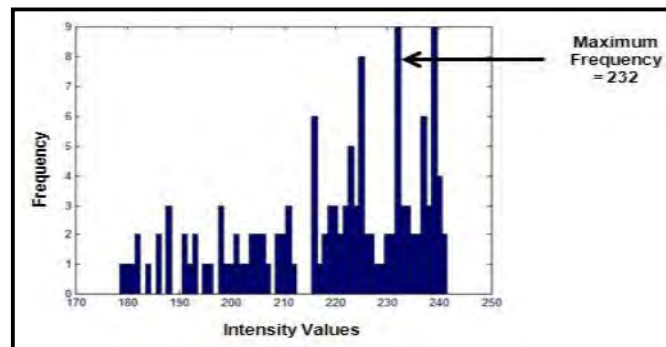


Figure (7): The histogram of a subregion

4 Experimental Results

The final results of the MDV-based approach illustrate its ability to enhance the color objects in the historical images. In this context, a seed region before and after the enhancement process is depicted in figure (8). In addition, figure (9) shows the achieved results of the whole historical image of Baalbek.

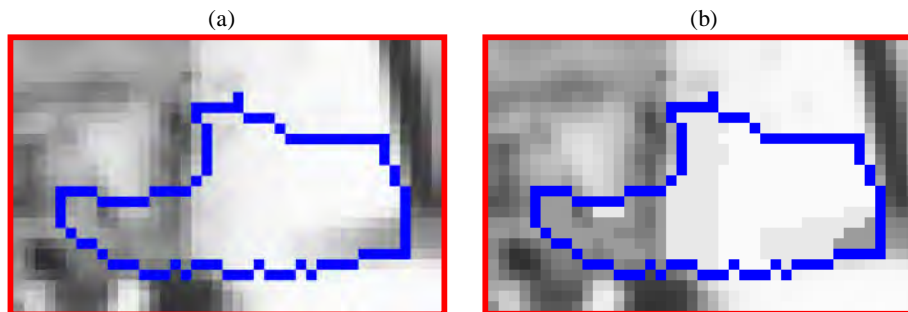


Figure (8): A seed region is enhanced by MDV-based approach;
(a): the seed region before enhancement, (b): the seed region after enhancement



Figure (9): The whole historical image has been enhanced by MDV-based approach; (a): the historical image before the enhancement, (b): the historical image after the enhancement process

These results are compared with results achieved by applying several special filters of the image enhancement. Figure (10, a-d) shows average, Gaussian, unsharp and disk filters supported by function *fspecial* in Matlab Software. In the figure (10, a), the average filter reduces the amount of the intensity variation of each pixel in the image. In contrast, the Gaussian filter is shown in the figure (10, b) and it aims to remove the noise intensity values from the image. The third filter presented in figure (10, c) is the unsharp filter which enhances edges through subtracting the smooth image from the original image. Finally, the figure (10, d) represents the disk filter which is a circular averaging filter with radius R. The radius value applied here is 5 (Gonzalez & Woods, 2002, Gonzalez et al, 2004).

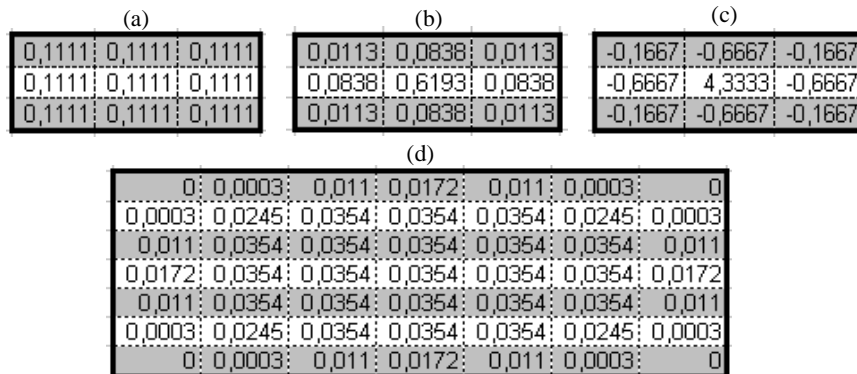


Figure (10): Special filters supported by function *fspecial*; (a): the average filter, (b): the Gaussian filter, (c): the unsharp filter and (d): the disk filter

Furthermore, the results achieved after applying the above-mentioned filters are depicted in the figure (11, a-f), where the figure (11, b) shows that the MDV-based approach groups successfully the semi-similar intensity values. In addition, each partition is replaced by a new color which is relatively close to its original color but shows more clarity and low gradient. The noise intensity values are removed. In contrast, figure (11, c-f) shows that other filter could not replace the small partitions of the historical image by an intensity value.

In addition, the figure (12) describes the effect of the MDV-based approach during the edge detection process before and after enhancement. The edges in figure (12, b) are more clear

than the edges achieved without enhancement (cf. figure 12, c). This confirms that the MDV-based approach enhances the detection process to be more accurate.

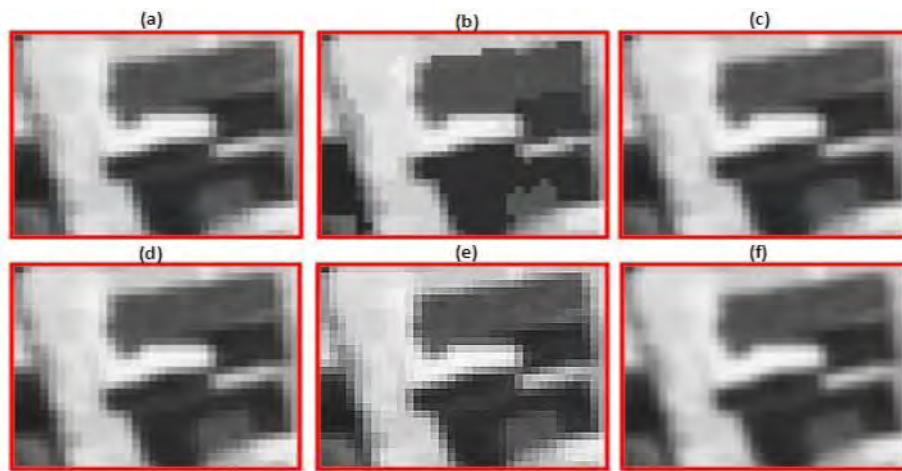


Figure (11): Illustration of the comparison between the result of the MDV-based and other enhancement filters; (a): the original image, (b): the result of the MDV-based approach, (c): the result of the average filter, (d): the result of the Gaussian filter, (e): the result of the unsharp filter and (f): the result of the disk filter

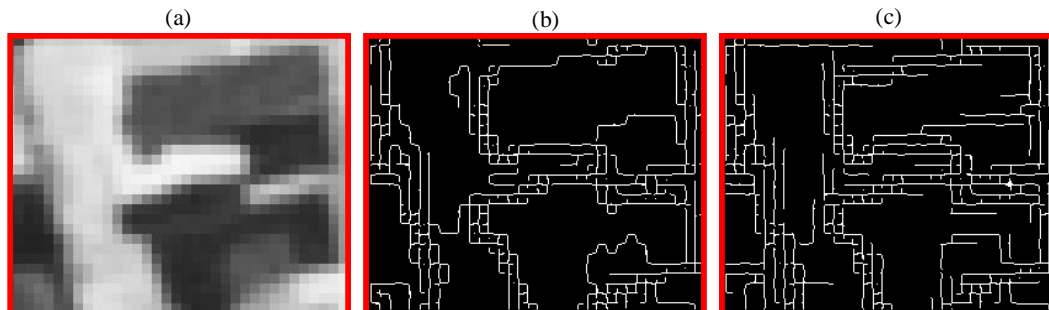


Figure (12): The edge detection of a sample of the historical image before and after enhancement process; (a): the original image, (b): the edge detection after enhancement process and (c): the edge detection before enhancement process

5 Conclusions

The MDV-based approach is introduced for appearance enhancement of objects in historical images of Baalbek. Within the MDV-based approach, a term “seed region” is defined for representing the semi-similar intensity values through a closed region. The MDV-based approach depends on the MDV for determining the distance of each intensity value in SR and the same set of IVs. As a result, the intensity values of these SRs will be redistributed into subregions. In addition, this redistribution enables the MDV-based approach to deal with partitions which are smaller than SR. Each partition is replaced by the intensity value which has the largest frequency associated with.

Each partition took a new color which is relatively close to the original color but more clear and low gradient. This leads to remove the noise intensity values from the partitions of the SR. Furthermore, the MDV-based approach allows the process of the objects detection to be more accurate. In future work, we aim to develop MDV-based approach to detect historical image objects. In this context, it will be geometrically proved how extent the detection process is sufficient and reliable. In other words, the geometric quality parameters (like the accuracy of points extracted which form for e.g. edges) should be taken into the account, because they take an important role in further applications (e.g. City Modelling).

6 References

- AGAM, G., BAL, G., FRIEDER, G. & FRIEDER, O., 2007: Degraded document image enhancement. Proceeding. SPIE 6500, pp: 65000C –1 – 65000C–11, 2007.
- BIN MANSOOR, A. & KHAN, Z. & KHAN, A., 2008 : An Application of Fuzzy Morphology for Enhancement of Aerial Images. Advances in Space Technologies, 2008. ICAST 2008. 2nd International Conference. pp: 143 – 148.
- GEOFFRY, J. M., 1992: Discriminant Analysis and Statistical Pattern Recognition. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.
- GONZALEZ, R.C. & WOODS, R. E., 2002: Digital Image Processing. Prentice Hall International.
- GONZALEZ, R.C., EDDINS, S. L. & WOODS, R. E., 2004: Digital Image Processing Using MATLAB, Prentice Hall International.
- GRUBER M. & LEBERL, F., 2001: High Quality Photogrammetric Scanning for Mapping, *ISPRS Journal for Photogrammetry and Remote Sensing*, 55, pp: 3113-329, Elsevier Publishers, The Netherlands.
- SHI. Z. & GOVINDARAJU. V., 2004: Historical document image enhancement using background light intensity normalization. 17th International Conference on Pattern Recognition, Cambridge, UnitedKingdon, 23-26 August 2004.
- SHI. Z., SETLUR, S. and GOVINDARAJU, V., 2005: Digital Image Enhancement using Normalization Techniques and their application to Palm Leaf Manuscripts.
- SHI. Z., SETLUR. S., & GOVINDARAJU, V., 2009: Digital Image Enhancement of Indic Historical Manuscripts. Advances in Pattern Recognition, Guide to OCR for Indic Scripts. pp: 249-267, Springer London.
- WANG, Q., XIA, T., LI, L. and TAN, C. L., 2003: Document image enhancement using directional wavelet. Computer Vision and Pattern Recognition, 2003. Proceedings. 2003 IEEE Computer Society Conference. pp: II-534 - II-539.
- YAHYA, S. R., SHEIKH ABDULLAH, S. N. H., OMAR, K., ZAKARIA, M. S. & LIONG, C. Y., 2010: Review on Image Enhancement Methods of Old Manuscript with Damaged Background. International Journal on Electrical Engineering and Informatic.
- YUZHONG, S. & JAKKULA, S.K., 2007: Aerial Image Enhancement Based On Estimation Of Atmospheric Effects. Image Processing, 2007. ICIP 2007. IEEE International Conference. pp: III - 529 - III – 532.

Vertical or Oblique Aerial Photography for Semantic Building Interpretation

PHILIPP MEIXNER¹ & FRANZ LEBERL¹

Zusammenfassung: Schrägluftbilder erfahren einen enormen Siegeszug. Ausgehend aus den USA und angetrieben von der Firma Pictometry werden weltweit Schrägluftbilder erflogen und für die Betrachtung und für einfache Messungen in urbanen Bereichen eingesetzt. Uns interessiert der Vergleich dieser Schrägluftbilder mit vertikal aufgenommenen traditionellen Luftbildern in der Anwendung auf die Analyse von Hausfassaden. Wir untersuchen, wie Schräg- gegenüber Vertikaltaufnahmen bei der Zählung der Geschosse und Fenster abschneiden. Vertikalbilder zeigen Fassaden am Bildrand oft unter etwa 25° zeigen, in Schrägaufnahmen sind dies 40°. Wir zeigen, dass eine Zählung der Fenster und Stockwerke in Vertikalbildern mit einer Genauigkeit im Bereich von etwa 90% möglich ist, dass aber in Schrägaufnahmen diese Zählung durch Verdeckungen beeinträchtigt ist. Schrägbilder weisen keine wesentlichen Vorteile auf, wenn Vertikalbilder mit hoher Überlappung bestehen.

Abstract: Oblique aerial photography has become a widely used resource for urban imaging. Originating in the US and championed by Pictometry, oblique images are now being acquired world-wide. We are interested in a comparison between oblique and vertical aerial photography, especially addressing the façades in urban areas and façade details such as the number of floors and windows. Can one automate these tasks, and how do vertical aerial images compare to oblique images? One can image facades in vertical aerial imagery at the image's edge under an angle of 25°. With new wide angle systems, this angle increases to 35°. Oblique cameras produce larger angles at 35 to 55°. With vertical images, high image overlaps are needed to obtain all façades at these angles. Our results show that vertical imagery is well-suited to façade analysis, and that oblique images deliver results compromised by occlusions. This indicates that the benefit of oblique images is questionable in cases where high overlap vertical images exist.

1 Introduction

In previous work we have shown that the automated count of floors and windows is feasible using vertical aerial imagery (Meixner & Leberl, 2010). The initial accuracies reach levels beyond 90%. Current efforts are directed towards an increase of that accuracy by the use of multi-images, and by the use of the 3rd dimension. Initial results from developing 3D point clouds of façades from vertical imagery and then using these in the façade analysis do offer encouragement. In the process one of course finds a relationship between the look angles used to image a façade and the accuracy of the analysis. Below 15°, the results become poor. At 20° and

¹ Institute for Computer Graphics and Vision, Graz University of Technology
{meixner, leberl}@icg.tugraz.at

beyond, the limitations of any façade analysis are more due to the occlusions by other buildings and by vegetation, or by the algorithm's ability to deal with balconies and other irregularities, than by a lack of image geometry and quality.

A new question emerged about the advantages of oblique aerial photography over vertical photography. The topic is relevant since the Internet inspires an interest in showing urban areas and modeling them in 3D from vertical and oblique aerial photography, aerial LiDAR and from street side imagery and street side LiDAR. Vertical aerial photography continues to be the workhorse for complete maps and orthophotos, whereas many dense 3D point clouds today are being produced by LiDARs (Leberl et al., in print). With the transition to digital sensing, image overlaps can increase without adding costs. This improves the accuracy of 3D data, the automation opportunities and the extent of occlusions. One can argue that the no-cost-per-image-paradigm has changed previous value systems: LiDAR may not add the value it once had over point clouds from film imagery, and highly overlapping digital vertical images may show facades in sufficient detail to eliminate the need for oblique photography.

Using a test area with about ~ 200 buildings and ~ 800 façades, we show that facades can be successfully analyzed from vertical aerial photography; oblique photography does not add value beyond that available from vertical photography in the analysis of façades. A qualitative visual inspection also raises doubts that oblique outperforms high quality, high resolution and high dynamic range vertical imagery.

2 Vertical and Oblique Aerial Cameras

2.1 Advances in Vertical Cameras

Vertical aerial cameras obviously produce centrally perspective imagery with the optical axis pointing towards the nadir. Until about 2003, such cameras operated with film and produced the minimum number of images needed for a project because there was significant variable cost associated with producing the film images, but also with manually processing these one by one. By 2003, digital aerial cameras began to get accepted and by this, the variable cost of creating an image was eliminated, the color capabilities got increased by a separate infrared channel and the radiometry improved from the film's 7 to 8 bit to beyond 12 bit. This is a 16-time increase from the film's 128 to 256 grey values to the digital system's 7000 values (Scholz & Gruber, 2009). Area array cameras initially produced images with 11.5 K by 7.5 K pixels, thereby assembled large format from multiple smaller image tiles. Today the same technology is at 17.5 K x 11.3 K pixels. A special development is the UltraCam-G with a swath width of nearly 30K pixels. However, aerial cameras are using a variety of technologies, including push broom sensing with a single image line that sweeps across the terrain, such as the Leica ADS-80.

The data quantities produced today by digital cameras exceed by two orders of magnitude what had previously been created via film. To eliminate the variable cost of processing an image has required that fully automated workflows become available. Such workflows now exist (Reitinger & Gruber, 2009).

At the border of a vertical aerial photograph, façades are visible under an angle of up to 36.5°, for example using a wide angle system such as the UltraCamXP-WA, or at 27.5 ° when a normal angle system is in use, such as the UltraCamXP. To ensure that all facades are imaged under as

large an angle as possible, images must be taken at rapid intervals along a flight line, and the flight swaths must overlap as much as economically reasonable. Therefore digital imaging missions have abandoned the traditional paradigm of minimum photos per project and now oftentimes produce overlaps at 80% in-flight and 60% across the flight line. In urban cores with high rise buildings one uses 90%/80% overlaps. The benefits are an increase in accuracy because where one had previously a single stereo model from two images, one now can work with 45 such stereo pairs using all variations of pairs from a 10-image overlap. The robustness of automation gets improved by this redundancy, reducing the need for manual labor. And occlusions are being avoided because one now can look at the bottom of any street canyon using the appropriate image. Inversely, high overlaps lead to having each façade showing up in 10 or more images and there always will be one where the façade is shown under a large look angle in excess of 20°.

2.2 Oblique Cameras

Oblique photography is being acquired with tilted centrally perspective cameras and an optical axis looking away from the nadir at an angle of perhaps 35°. The off-nadir angle under which a façade might get imaged lies between 35 ° and 65 ° (Prandi, 2008). Such aerial images are more descriptive to a naïve viewer than vertical photographs. However, the photogrammetric workflow with aerial triangulation, dense point cloud generation and interactive stereo measurements is far less developed and more difficult than with vertical photography. The purpose of producing oblique photography is the viewing of raw images to please the eye (“eye candy”) without any computer vision being applied to the images to produce derived data products. Therefore the oblique cameras typically have a much smaller pixel array than vertical mapping cameras. Petrie (2009) assembled a catalog of current oblique cameras and classified them into three different technologies. We add a 4th class here:

- **Fans** of digital cameras, all optical axes in one vertical plane, but looking in different directions to assemble a panoramic coverage. The application may predominantly be in defense-related surveillance. An example is the Zeiss KS-153 reconnaissance camera in Figure 1. DiMAC, IGI and RolleiMetric use a twin camera configuration. The German Space Agency (DLR) built a small format digital camera with 3 oblique cameras. The Russian NPO KSI organization has produced a camera that has, depending of the flying height, 4, 6 or 8 lenses to cover the largest possible area.
- **Block configurations** of multiple camera heads seek to create a larger field-of-view by arranging the tilted optical axes not in a plane, but spatially extended and covering a larger ground area from one single exposure station. These include also the vertically imaging cameras for mapping such as the Intergraph DMC. Other solutions are by RolleiMetric in its AICx4, IGI and American Space System Division with an assembly of 6 single oblique camera cones to survey larger areas.
- **“Maltese Cross” configurations** combine one vertical and multiple oblique cameras. This is the typical oblique systems used by Pictometry or Track-Air’s Midas system in Figure 2. The technology was used in the 1930 by the US Geological Survey and the US Army Corps of Engineers for mapping applications. Apart from Pictometry and TrackAir, there exist solutions by IGI with its Penta-DigiCAM system, by DiMAC with

the DIMAC oblique camera, by GetMapping with its Azicam, and by RolleiMetric with the Aero Oblique System (AOS).

- **Scanning area arrays** represent a new class of oblique technology. A single optical imaging cone with an area array sweeps by a scanning motion across the flight line and produces multiple images with varying optical axes. An example is Vision Map’s A3-system (see www.visionmap.com).

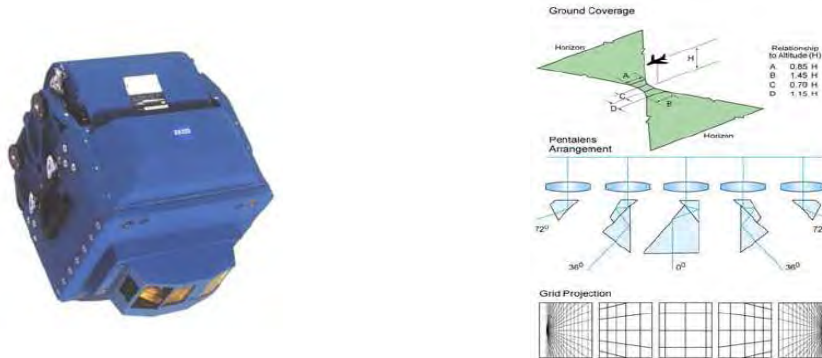


Figure 1: The ZEISS KS-153 Pentalens 57 oblique camera system using a fan arrangement Source: Petrie (2008)

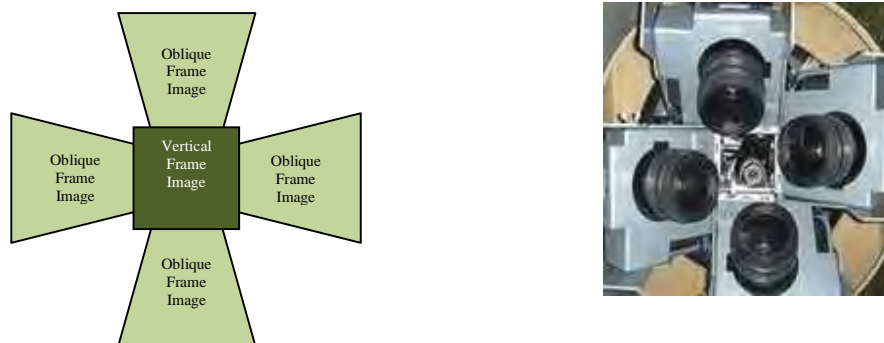


Figure 2: The Maltese Cross configuration with five camera heads (left) and an realization in the form of the TrackAir Midas System (right). Source: Petrie (2008)

3 Geometric Parameters of Oblique versus Vertical Photography

3.1 Oblique Camera Geometry

Oblique aerial imagery has been easy to come by in the form of Microsoft’s BING/Maps mapping website. The images have been produced with a Maltese Cross configuration. While exact technical data of such oblique images remain unavailable, we have taken it upon ourselves to reverse engineer them.

For this purpose we can access high quality vertical aerial photography from commercial sources taken, in our case, with the UltraCam-series of aerial cameras. Figure 3 presents an example of

an area in Graz (Austria) with a vertical coverage and superimposed the outlines of an oblique image. Also shown is the oblique image itself in its original geometry.



Figure 3: Detail from Microsoft Bing Maps. Left is the orthophoto and superimposed the outline of an oblique aerial image produced with the Pictometry system operated by Blom. Right is the oblique aerial image.

The oblique images have 2,672 rows and 4,000 columns representing a format defined from traditional consumer cameras at 36 mm x 24 mm.

Well-mapped terrain with large vertical structures including a church can serve as a test area to compute a resection in space with self-calibration, in which we compute the internal geometry with its focal length. The result is summarized in Table 1.

Pixel size in the image plane = 9µm	Near range off-nadir angle = 37 °
Focal length = 85.5mm	Far range off-nadir angle = 53 °
Viewing angle of the camera = 24° x 16°	Horizontal GSD at near range = 14 cm
Flying height above ground = 1,130 m	Horizontal GSD at far range = 19 cm
Distance to near range = 850 m	Distance to far range = 1530 m

Table 1: BING/Maps oblique imagery parameters reconstructed from known terrain points.

3.2 Vertical Image Geometry

Table 2 summarizes some relevant geometric parameters of a digital aerial camera in the form of the UltraCam-X and wide angle UltraCam XP.

	UltraCam X	UltraCam XP - WA
Image Rows x Columns	14, 430 x 9,420	17, 310 x 11,310
Image size in X and Y, in mm	103.9 x 67.8	
Pixel size in image plane (µm)	7.2	6
Focal length, mm	100	70
Max Look angle off-nadir (°)	27.5	36.5

Table 2: Some geometric data of two typical digital aerial cameras (from www.vexcel.com)

3.3 Pixel Sizes on Façades

For a vertically-looking camera, the pixel on a façade (FSD or Façade Sampling Distance) changes as a function of the look angle off-nadir α with

$$FSD = GSD / \tan(\alpha)$$

These results in Table 3 for a GSD at 10 cm, a typical value for urban aerial photography. The façade pixels are rectangular.

Angle (deg)	0.	5	10	15	20	25	30
Pixel vertical [cm]	∞	114	57	37	27	21	17

Table 3: Incidence or look angles and vertical pixel size within a façade. The horizontal pixel size is at 10 cm.

For an oblique camera, the pixel size within a vertical plane is defined by two angles. Angle β is the orientation of the optical axis off-nadir. Angle α is the angle between the optical axis and the actual imaging ray. The off-nadir angle β produces 2 GSD values, one in the direction of the inclination of the optical axis GSD_r , with r being the range direction or direction between nadir and the optical axis; and the GSD_a in azimuth direction

$$GSD_r = p * H * \cos(\alpha) / (f * \cos^2(\beta)); \quad GSD_a = p * H * \cos(\alpha) / (f * \cos(\beta))$$

A vertical façade is resolved as a function of where in the image it is located and this is defined by the second angle α , producing a vertical pixel dimension FSD_v :

$$FSD_v = p * H * \cos(\alpha) / (f / \sin(\beta))$$

Table 4 presents some vertical façade pixel sizes for the oblique camera with a look angle at 53° and compares this to pixel sizes from an UltraCam X with an angle with 22° . In this example, the vertical façade pixel sizes for the oblique camera at an angle of 53° and for an UltraCam X at an angle of 22° are almost identical. The simple conclusion is permitted that the pixel size not only is a function of the look angle, but also of the flying height and the GSD. While the look angle appears a lot less attractive from a consideration of look angles in the Ultracam, on a given façade, this does not propagate into an inferior geometric resolution.

	Degrees	Azimuth (cm)	Range (cm)	Façade vertical (cm)
Oblique camera (near range)	37	14.7	20.9	27.7
Oblique camera (far range)	53	19.6	27.7	20.9
UC-X	22	8.1	8.1	20.0

Table 4: Size of a pixel on a façade in cm, as a function of the look angle, in $^\circ$

3.4 Efficiency of Aerial Data Collection

A consideration of image pixel sizes ignores the efficiency of one versus another imaging approach and technology. Flying at a certain flying height to achieve small pixels, and producing

images with a large format will be more efficient than to fly with small formats for a small swath width and at a low flying height. An UltraCam for example produces 17.5 K pixels in one single flight line. An oblique camera will have to match this number to be comparatively productive. At a frame size of 4,000 pixels, one will not easily match the productivity of a vertical mapping camera.

4 Experimental Results

We work with a 400m x 400m test data set in the city of Graz (Austria). The vertical images were acquired with an UltraCamX (Vexcel/Microsoft) at a GSD of 10cm and 80/60 image overlaps. The oblique images were taken from the Microsoft BING/Maps website in its “Classic” version, and have a GSD of nominally 12cm.

4.1 Visual Comparison

A visual comparison of vertical versus oblique images in Figure 4 does not result in a clear advantage of one versus the other approach. At an off-nadir angle of about 45°, the oblique images have more significant occlusions, given that the vertical images show the same facades at an angle of only 27°. Regarding the radiometric range, one would give the vertical images an advantage. This visual impression from original images is overwhelmed by the differences in geometry. To eliminate that factor, we create rectified versions in the plane of the façade, as shown in Figure 5. Again, a visual comparison does not show a clear advantage of one over the other technology.

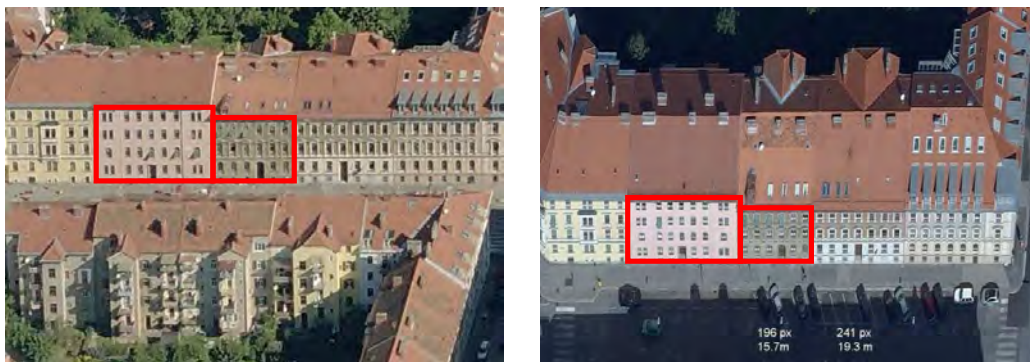


Figure 4: Oblique aerial image at 45° look angle taken from Microsoft Bing Maps (left); Vertical aerial image obtained from UltraCamX at a look angle of 27° (right).



Figure 5: The marked sections of Figure 4 have been rectified. At left are two sections from the oblique data at 45°; at right from the vertical data at 27°.

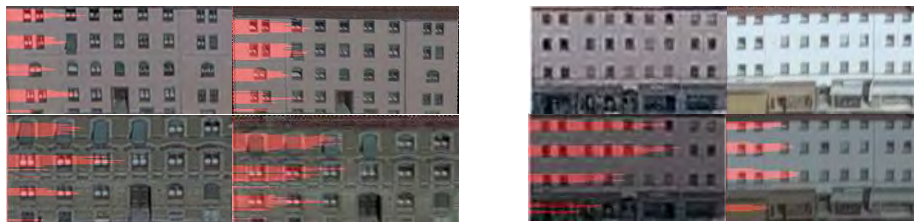


Figure 6: Two examples for floor detection using edge histograms. Left is for Fig 5. Note in the right example the advantage of image quality in the vertical data set (right).

4.2 Counting Floors

A less subjective and more quantitative comparison of oblique versus vertical is expected to result from analysing the images and extracting semantic information. A floor detection algorithm has been explained by Meixner & Leberl (2010). Figure 6 explains that a histogram is being built from horizontal Prewitt edges and local extrema of the histogram serve to get a floor count. Applying this approach to about 870 facades in the Graz test area's vertical images, and to a subset of 120 facades in the corresponding oblique images (from Bing/Maps) leads to Table 5. We find in this type of quantitative analysis that the result is seriously compromised by the occlusions which naturally are larger in the oblique images.

4.3 Counting Windows

A histogram-based count can also deliver the number and locations of windows. Figure 7 explains the principle of the approach. Of course one will want to apply various constraints on window size and distance between them etc. to overcome the effects of data noise. Table 5 shows the accuracy achieved in the Graz test data set from the facades on vertical and oblique images. Again, occlusions are the main obstacle to a competitive result from oblique images.

Angle [deg]	< 5	5 - 10	10 - 15	15-20	20-25	> 25	Oblique
Floor Detection	0	7 / 21	79 / 103	191 / 221	255 / 279	228 / 246	90/120
Floors Percentage	0%	33%	77%	86%	91%	93%	75%
Window detection	0	6 / 21	69 / 103	174 / 221	233 / 279	212 / 246	79/120
Windows Percentage	0%	29%	67%	79%	83%	86%	66%

Table 5: Counting floors (above) and windows (below) from vertical images and results depending on look angles. Last column is from oblique images where floor counts are compromised by occlusions.

In Table 5 the success rate of window and floor detection is calculated by dividing the total number of façades for every angle (e.g. 5-10) by the number of façades where the floors and windows are correctly determined (e.g. 7/21). As one can see the floor and window detection results for oblique images are not as good as the results using vertical aerial images. Reasons for that are the poor resolution of the oblique aerial images and occlusions from other buildings and vegetation. Concerning the floor detection occlusions are the main reason for these results. Concerning the window detection the poor resolution of the images is one of the reasons for the outcome.

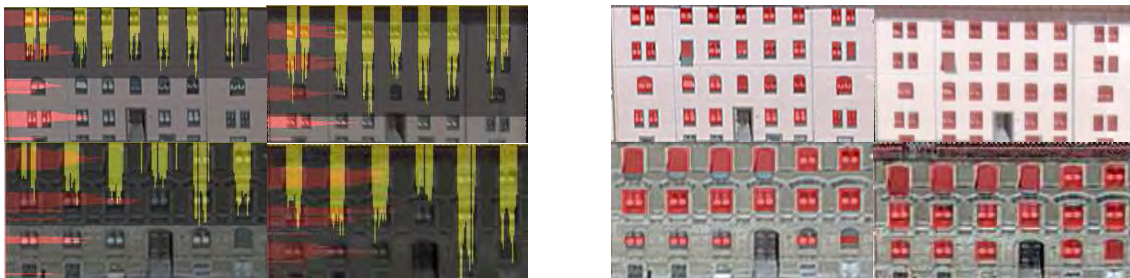


Figure 7: Window detection approach using edge histograms. To the right are the marked window locations and sizes, as detected.

5 Conclusions

We demonstrate that façades can be analyzed with a 90% success rate from vertical aerial photography. This is feasible since the images have been taken with large overlaps so as to image each façade at a sufficiently large look angle of 20° to 27° . We also show that the visual inspection of vertical versus oblique images favors the vertical data due to better radiometry at comparable pixel sizes. The major problems of oblique images are occlusions that prevent one from counting the correct number of floor and windows.

The efficiency of aerial imaging may favor vertical technologies over the oblique approach. Vertical images today produce 200 Megapixels per exposure, whereas oblique cameras still operate at the 10 Megapixel level. Even if one were to consider that in a Maltese Cross arrangement one operates with 5 such cameras, this still adds up to only 50 Megapixels.

A limitation of the current “normal angle” aerial cameras is the look angles one can achieve in the direction of flight at perhaps 17° off nadir. Solutions are either a cross flight pattern, or the use of a wide angle camera model such as the UltraCam Xp-WA with 26° in flight direction, or the use of the new single CCD-chip DMC-II, recently announced by Intergraph.

Going beyond a mere “eye candy” approach for the use of oblique images, one will quickly find that novel high-redundancy vertical aerial images offer a superior source of information about urban areas, street canyons and façades. We suggest that the benefits from vertical aerial photography have been undervalued, and that conversely benefits from oblique images have been overstated.

6 References

- LEBERL F., H. BISCHOF, T. POCK, A. IRSCHARA, S. KLUCKNER (2010) *Aerial Computer Vision for a 3D Virtual Habitat*. IEEE Computer, June 2010, pp.1-8
- LEBERL F., A. IRSCHARA, T. POCK, P. MEIXNER, M. GRUBER, S. SCHOLZ, A. WIECHERT (in print) *Point Clouds: LiDAR versus 3D Vision*. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing.
- MEIXNER P. LEBERL F. (2010) *From Aerial Images to a Description of Real Properties: A Framework*. Proceedings of VISAPP International Conference on Computer Vision and Theory and Applications, Angers 2010.
- PETRIE G. (2009) *Systematic Oblique Aerial Photography using Multiple Digital Frame Cameras*. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 75, No. 2, p. 102-107, 2009.
- PRANDI F. (2008) *Lidar and Pictometry Images Integrated Use for 3D Model Generation*. Proceedings of the XXI ISPRS Congress, Beijing 2008.
- SCHOLZ S., M. GRUBER (2009) *Radiometric and Geometric Quality Aspects of the Large Format Aerial Camera UltraCam Xp*. Proceedings of the ISPRS, Hannover Workshop 2009 on High-Resolution Earth Imaging for Geospatial Information, XXXVIII-1-4-7/W5, ISSN 1682-1777

Verbunduntersuchung von Glasfaserbewehrung in Beton

INGA FOCKE¹, RAIMUND SCHWERMANN², BONG-GU KANG³ & WILHELM BENNING⁴

Das Verbundverhalten von textiler Glaslangfaserbewehrung im Beton mit der umliegenden Betonmatrix wird quantitativ untersucht. Hierfür werden Rasterelektronenmikroskopaufnahmen von Querschnitten eines in Beton eingebetteten Faserbündels mit Hilfe von Bildverarbeitungsverfahren analysiert. Die Vorgehensweise wird anhand eines konkreten Beispiels gezeigt und erste Ergebnisse werden visualisiert.

1 Einleitung

Textile Glasfaserbewehrung im Beton wird im Sonderforschungsbereich (SFB) 532 „Textilbewehrter Beton- Grundlagen für die Entwicklung einer neuartigen Technologie“ (SFB 532) an der RWTH Aachen alternativ zur Stahlbewehrung untersucht (BRAMESHUBER 2006). Bewehrung im Beton dient hauptsächlich dazu, die vorhandenen Zugkräfte aufzunehmen. Die gewöhnliche Stahlbewehrung kann durch Feuchtigkeit korrodieren. Beton ist alkalisch und schützt dadurch den Stahl vor Korrosion, wozu aber eine Mindestbetondeckung notwendig ist. Durch diese Mindestbetondeckung haben Stahlbetonteile eine Dicke von ca. 60-80mm. Alternativ lassen gewebte Glasfasermatten als Bewehrung im Beton eine hohe gestalterische Freiheit durch dünnwandige und dadurch leichte Bauteile zu. Eine Glasfasermatte (Textil) ist eine Webstruktur aus sog. Rovings, die wiederum aus einem Bündel - hier im Beispiel 1600 – einzelner Glasfaser(-filamenten) bestehen.

Das Tragverhalten des Betonkörpers ist komplex, ein Hauptfaktor ist der Verbund zwischen textilen Glasfasern und Beton. Dieser ist abhängig von den Materialien und von der Verbundfläche, die hier genauer und dreidimensional untersucht wird. Um die Kontaktflächen zu maximieren und damit die Hohlräume zwischen den Filamenten und der Betonmatrix zu minimieren, muss das Penetrationsverhalten von Beton in das Garninnere, also zwischen den Glasfasern, bekannt sein. Garnauszugversuche haben gezeigt, dass die in Beton eingebetteten Filamente im Querschnitt zuerst am Rand des Rovings brechen und sukzessive zur Mitte hin versagen (BANHOLZER 2004).

Eine zu klärende Fragestellung ist, ob dieses Verhalten mit der Einbettung der Filamente im Beton korreliert. Zur Beantwortung dieser Fragestellung wird ein dreidimensionales Verbundmodell aufgrund von Rasterelektronenmikroskopaufnahmen (REM-Aufnahmen) von Filamentquerschnitten aufgestellt, da eine zweidimensionale Auswertung eines Querschnitts zur Beantwortung dieser Fragestellung nicht ausreicht.

1) Inga Focke, Geodätisches Institut der RWTH Aachen, Templergraben 55, 52062 Aachen; E-Mail:

inga.focke@gia.rwth-aachen.de

2) Raimund Schwermann, Geodätisches Institut der RWTH Aachen, Templergraben 55, 52062 Aachen;

E-Mail: schwermann@gia.rwth-aachen.de

3) Bong-Gu Kang, Institut für Bauforschung der RWTH Aachen, Schinkelstr. 3, 52062 Aachen; E-Mail:

kang@ibac.rwth-aachen.de

4) Wilhelm Benning, Geodätisches Institut der RWTH Aachen, Templergraben 55, 52062 Aachen; E-Mail:

benning@gia.rwth-aachen.de

Als dreidimensional nicht zerstörende Messmethode ist für solche Anwendungen die Röntgen-Computertomographie bekannt. Die Auflösung dieser Technik liegt bei ca. 1/1000 der Bauteilgröße und lässt sich im μm -Bereich durchführen (KASTNER). Eine vollständige dreidimensionale Auswertung in der Mikrometerauflösung jedoch ist den Autoren nicht bekannt.

2 Faserverlauf im Betonkörper

Die Modellierung des Probekörpers für die Verbunduntersuchung erfolgt in zwei Hauptschritten: Zunächst wird der Faserverlauf jedes Einzelfilaments durch den Betonkörper bestimmt und der Verbund von jedem Filament mit der Betonmatrix untersucht. Die Daten für beide Schritte werden aus zweidimensionalen REM-Aufnahmen der Probekörperquerschnitte gewonnen und durch die Verknüpfung der Querschnitte in die dritte Dimension erweitert.

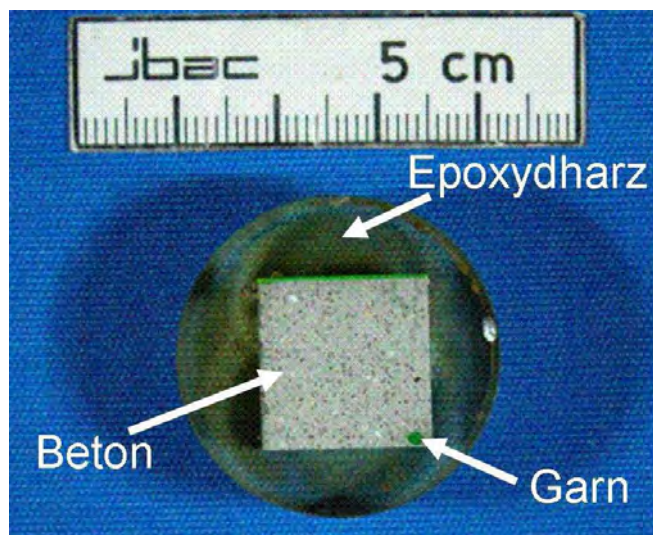


Abb. 1: In Epoxydharz eingelegerter Probekörper mit eingebettetem Roving

Für die Aufnahmen wird ein Probekörper, der einen in Beton eingebetteten Roving enthält, in Epoxydharz fixiert und glatt geschliffen und poliert (siehe Abb. 1). Die Höhe dieser Probe wird mit einem Messtaster bestimmt und es wird eine REM-Aufnahme gemacht. Danach werden sukzessive Schichten abgeschliffen, die Höhen bestimmt und mittels REM aufgenommen.

2.1 Faserdetektion in Rasterelektronenmikroskopaufnahmen

Die Einzelfasern sind in REM-Aufnahmen (Abb. 2) als weiße Kreise deutlich erkennbar. Ihre Flächen werden über ein Schwellwertverfahren lokalisiert und die Umkreise als Kreise ausgeglichen. Die Kreisradien und -mittelpunktskoordinaten werden bestimmt und für die weiteren Schritte als Lageparameter der Filamente verwendet.

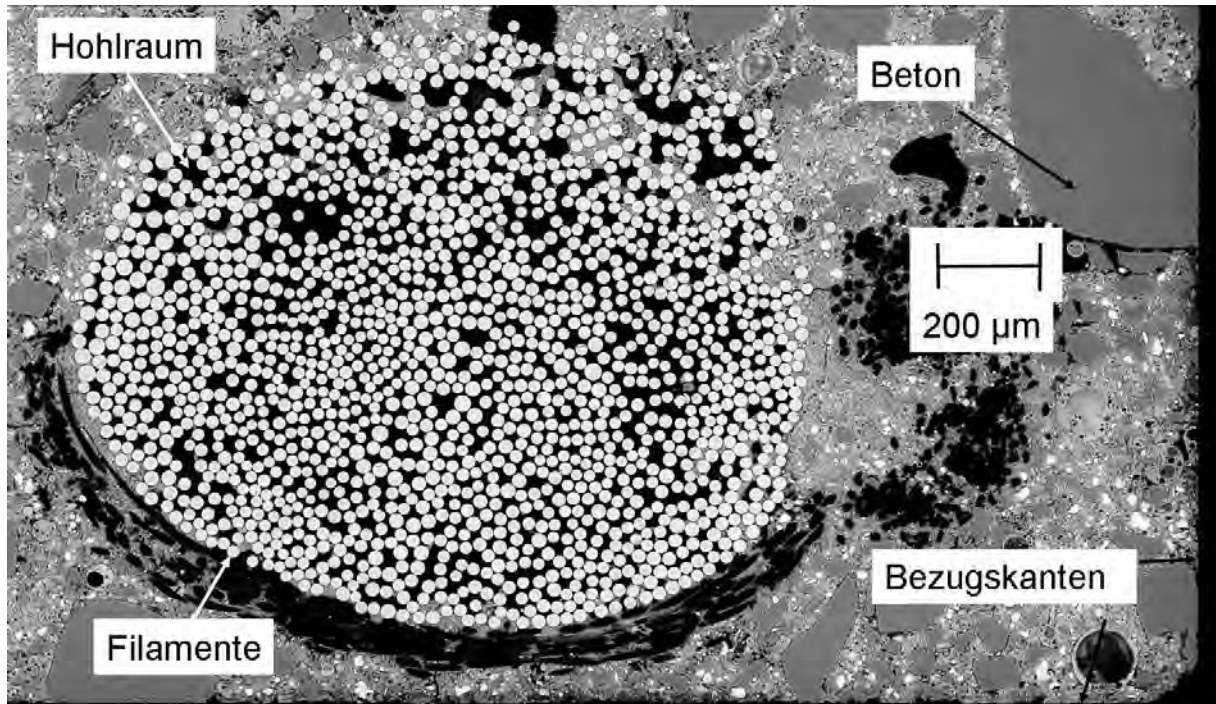


Abb. 2: Rasterelektronenmikroskopaufnahme eines Filamentquerschnitts

Der Abstand zum Rand, der für die spätere Auswertung zur Klassifizierung dient, wird über ein einhüllendes Polygon um den Roving, das den Rand symbolisiert, berechnet (LANGE 2009). Der kürzeste Abstand jeder Faser zum Rand wird bestimmt, und die Filamente werden für die spätere Modellierung in Klassen eingeteilt. Die Klassen werden nach ihren Abständen zum Rand gebildet, damit die Frage geklärt werden kann, ob Filamente, die nah am Rand liegen, mehr Verbundflächen haben als Filamente, die in der Rovingmitte liegen.

Neben den Fasern, Hohlräumen (Poren) und der Betonmatrix sind auf allen Aufnahmen zwei Bezugskanten (Abb. 2: rechts und unten) sichtbar, anhand derer die Aufnahmen relativ zueinander orientiert werden.

2.2 Relative Orientierung der einzelnen REM-Aufnahmen

Um den Faserverlauf der Glasfilamente durch den Betonkörper verfolgen, prognostizieren und später darstellen zu können ist eine relative Orientierung der einzelnen REM-Aufnahmen erforderlich.

Die REM-Aufnahmen werden unabhängig voneinander aufgenommen. Zwei sichtbare Schliffkanten (Bezugskanten) des Probekörpers, die für diesen Zweck nah am Roving platziert wurden (siehe Abb. 2) bevor die Probe in Epoxydharz fixiert wurde, ermöglichen die relative Orientierung von jeweils zwei Aufnahmen.

Die Bezugskanten werden mit Hilfe von Bildanalyseverfahren im Bild halbautomatisch erfasst. Dafür wird zunächst jede Kante grob definiert, indem in den Bildern je zwei Punkte an Anfang und Ende der Schliffkante manuell lokalisiert werden. Entlang dieser Näherungslinien werden

dann mit Hilfe des Gradientenverfahrens eine Vielzahl von Kantenpunkten bestimmt, die untereinander einen vorgebbaren Abstand besitzen. Pro Schliffkante werden auf diese Art ca. 60 Punkte ermittelt, für die damit x-y-Werte im jeweiligen Bildkoordinatensystem mit Subpixelgenauigkeit vorliegen (siehe Abb. 3).

Um bestmögliche Kongruenz zwischen der ersten Bezugs-REM-Aufnahme und allen folgenden REM-Aufnahmen herzustellen, findet eine Ähnlichkeitstransformation zwischen beiden Bildsystemen basierend auf einer Verschiebung (x_0, y_0) und einer Rotation (φ) statt. Das hier durchgeführte Verfahren benutzt dabei die bildverarbeitungstechnisch bestimmten Schliffkantenpunkte als Beobachtungsdaten. Betrachtet werden immer das Bezugsbild und das neue Folgebild. Das Folgebild ist jeweils anhand der Bezugskanten auf das Referenzbild zu transformieren. Hierzu wird durch die Schliffkantenpunkte im Referenzbild eine ausgleichende Gerade gelegt, wobei für die Parametrisierung der Geraden die Normalform $y = a \cdot x + b$ gewählt wird. Für jede im Referenzbild vorhandene Gerade liegt eine Gleichung der Art $y = a \cdot x + b$ vor. Die im Folgebild gemessenen Schliffkantenpunkte sind mit ihren (x', y') -Koordinaten gegeben und werden, anders als die Kantenpunkte im Referenzbild, unmittelbar benutzt. Betrachtet man zunächst ausschließlich Punkte, so gilt als Transformationsgleichung:

$$\begin{aligned} x &= x_0 + \cos\varphi \cdot x' - \sin\varphi \cdot y' \\ y &= y_0 + \sin\varphi \cdot x' + \cos\varphi \cdot y' \end{aligned} \quad (1)$$

Da aber identische Punkte in beiden Bildern nicht lokalisierbar sind, sondern nur identische Kanten, findet die Transformation zwischen Referenz- und Folgebild über eine Punkte-zu-Gerade-Zuordnung statt. Hierfür wird Gleichung (1) in die Geradengleichung $y = a \cdot x + b$ eingesetzt. Umgeformt erhält man:

$$0 = a \cdot x_0 - y_0 + (a \cdot x' - y') \cdot \cos\varphi - (a \cdot y' + x') \cdot \sin\varphi + b \quad (2)$$

Dieser Ausdruck dient schließlich als Beobachtungsgleichung für die Bestimmung der unbekanntenen Transformationsparameter x_0 , y_0 und φ im Rahmen einer Parameterschätzung. Beobachtungsgrößen sind die im Folgebild gemessenen Kantenpunkte $(x', y')_i$. Der Vorteil dieses Ansatzes besteht darin, dass alle gemessenen Schliffkantenpunkte für die Berechnung der Transformationsparameter herangezogen werden und damit bestmögliche Kongruenz zwischen Referenz- und Folgebild hergestellt wird. Die Bestimmung der Transformationsparameter nach Gleichung (2) gelingt nur, wenn mindestens zwei Kanten zur Verfügung stehen, die nicht parallel, sondern im Idealfall Orthogonal zueinander liegen. Dies ist im vorliegenden Anwendungsfall gegeben. Nach der Berechnung der Transformationsparameter werden in einem weiteren Schritt die zuvor detektierten Filamentpositionen im Folgebild der Transformation gemäß Gl. (1) unterzogen.

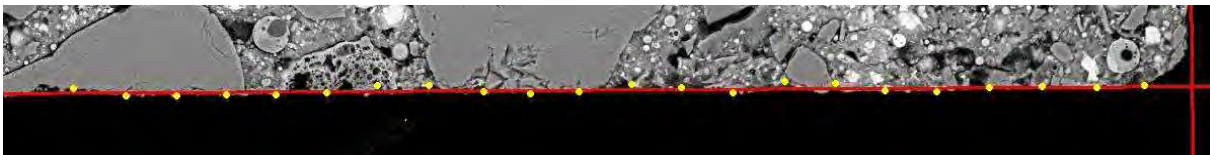


Abb. 3: Durch Gradientenverfahren gefundene Kantenpunkte mit Geradenschätzung

2.3 Faserzuordnung zwischen Querschnitten

Der Verlauf jeder Faser durch den Probekörper wird anhand der vorgefundenen Faserpositionen in den Querschnitten und den Querschnittsabständen bestimmt.

Für die Zuordnung der Filamente vom ersten zum zweiten Querschnitt wird eine sehr kleine Schicht von $< 0,1$ mm abgeschliffen, damit die Filamentstruktur keine großen Veränderungen zwischen diesen beiden Aufnahmen aufweist. Die Filamente zwischen diesen Aufnahmen werden über das ICP (iterative closest pointset) -Verfahren (BESL ET AL., 1992) zugeordnet, indem durch die manuelle Zuordnung einiger Fasern affine Näherungstransformationsparameter berechnet werden, die bei jeder Iteration verbessert werden.

Die folgenden Querschnitte werden mit größerem Abstand aufgenommen, weil eine Richtungsinformation des weiteren Faserverlaufs durch die erste Zuordnung vorliegt, und diese für eine Prognose der Faserposition im folgenden Bild verwendet werden kann.

Für die weiteren Zuordnungen wird ein lineares Kalmanfilter eingesetzt, das die prognostizierte Position mit der tatsächlich vorgefundenen vergleicht, und ein gewichtetes Mittel zwischen ihnen bildet, um die Position im darauf folgenden Bild zu prognostizieren.

Der Vorteil des Kalmanfilters ist, dass jede Faser unabhängig von den anderen Fasern verfolgt wird. Mittels ICP-Verfahren wird ein einzelner Faserverlauf durch eine Affintransformation über alle Fasern verschmiert.

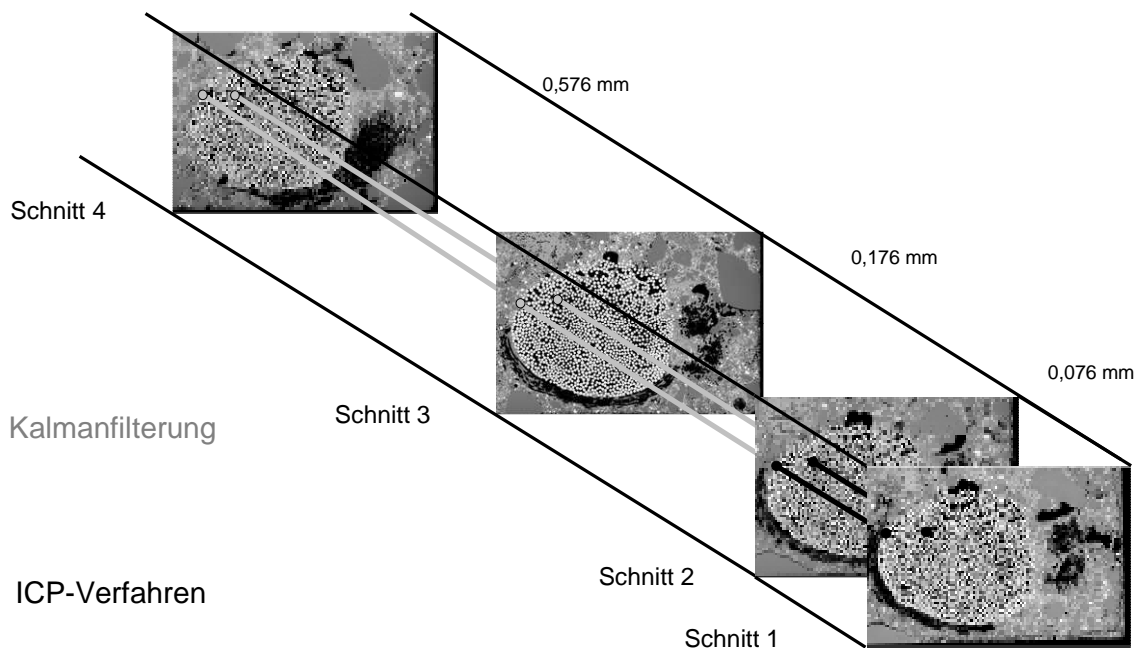


Abb. 4: Zuordnungsstrategie

Eine 3D-Darstellung der Zuordnungen ist in Abbildung 5 zu sehen.

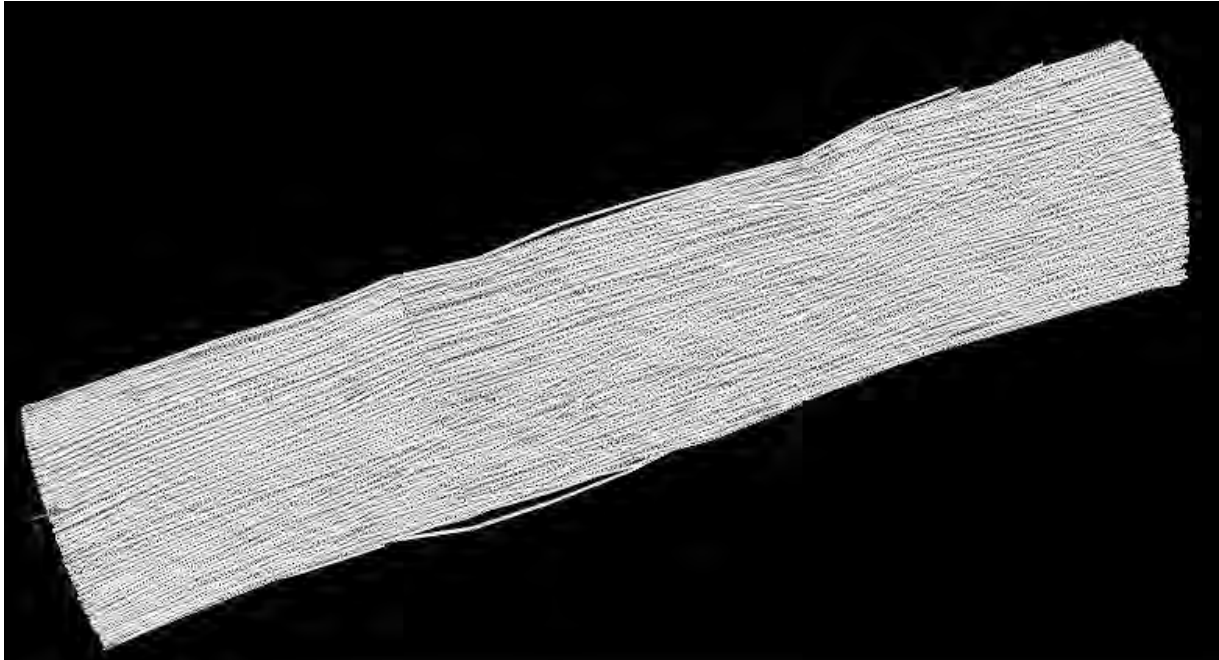


Abb. 5: 3D-Darstellung von 15 zugeordneten Querschnitten

3 Verbunduntersuchungen

Zur Untersuchung des Verbunds zwischen Glasfaserfilamenten und Betonmatrix werden zunächst die Oberflächen der Schnitte mittels Bildverarbeitung ausgewertet, um anschließend auf die dritte Dimension extrapolieren zu können.

3.1 Zweidimensionale Nachbarschaftsuntersuchungen

Die Umgebung jedes Filaments in den REM-Aufnahmen wird mit dem Ringoperator (Abb. 6) (LANGE 2009) untersucht.

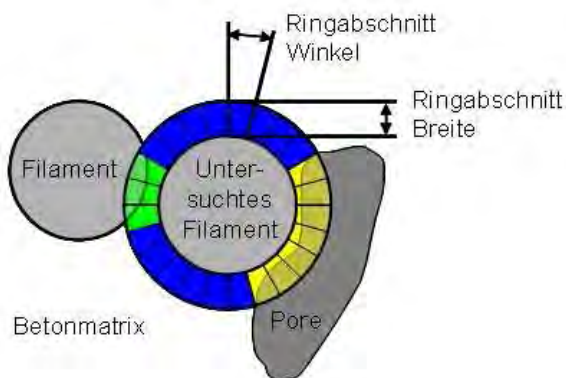


Abb.6: Ringoperator

Jede REM-Aufnahme wird als erstes über ein Schwellwertverfahren in die drei Typen Glasfaser, Betonmatrix und Hohlraum (Pore) klassifiziert (vgl. Abb. 2). Der Ringoperator wird danach um jede Faser gelegt. Der Ring wird in Abschnitte unterteilt, für die entschieden wird, ob die Faser an dieser Stelle an ein anders Filament, einen Hohlraum oder die Betonmatrix angrenzt. Mittels Bildverarbeitung wird der Typ bestimmt, der die größte Fläche von diesem Segment in Anspruch nimmt.

Mit dem Ringoperator wird eine flächenhafte Untersuchung um jede Faser durchgeführt, weil die Übergänge zwischen Filament und Betonmatrix oder Filament und Hohlraum nicht eindeutig sind. Die Bestimmung der Graubereiche als Betonmatrix wird dabei vermieden. Außerdem diskretisiert er die Verbundflächen, was für die weitere Verarbeitung hilfreich ist.

Da im Folgenden die Übertragung in die dritte Dimension aus der zweidimensionalen Auswertung an den Kontaktflächen abgeleitet wird, werden nur die Ringe um die Fasern, nicht jedoch der Bereich zwischen ihnen weiter untersucht. Abbildung 7 zeigt links eine mögliche Verbundröhre analog zum Beispiel aus Abbildung 6.

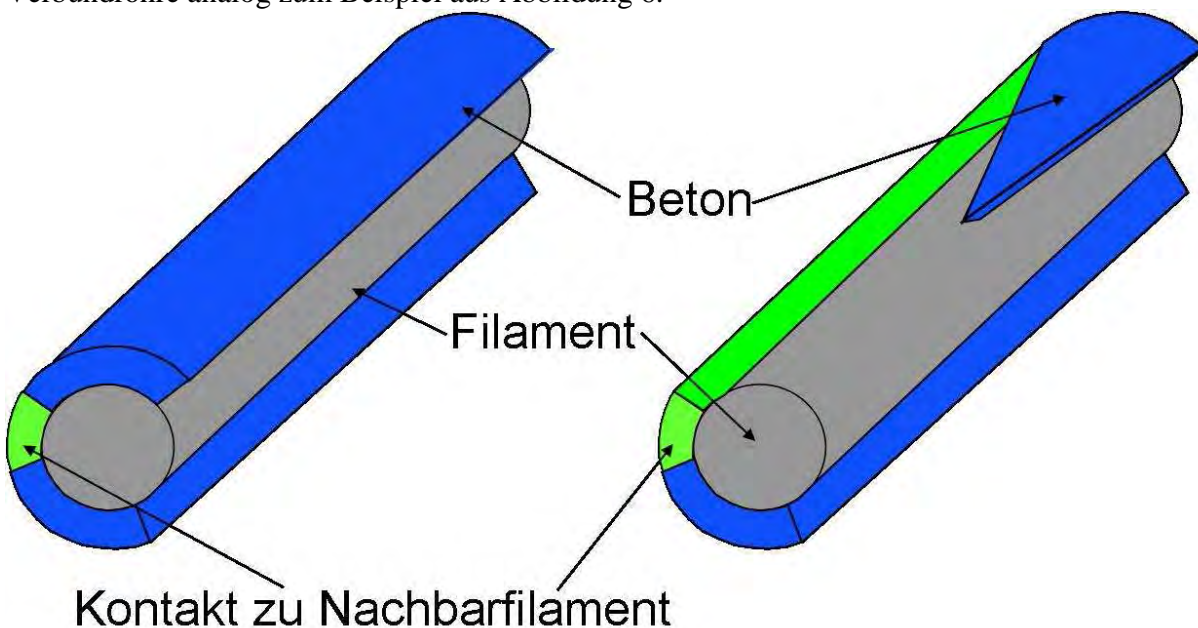


Abb.7: Schematische Darstellung der dreidimensionalen Verbunduntersuchung (Verbundröhren)

3.2 Dreidimensionale Nachbarschaftsmodellierung

Beton kann jede beliebige Form annehmen, wenn er im flüssigen Zustand zwischen die Filamente dringt. Der Verlauf des Betons zwischen den Querschnitten kann deswegen nur vermutet werden.

Für das beschriebene Modell werden entlang der im ersten Schritt gefundenen Faserverläufe die Verbundlinien, die durch den Ringoperator gefunden wurden, von jedem Querschnitt zum nächsten linear interpoliert. Damit werden Verbundflächen modelliert, die als Maß für den Faser-Beton-Verbund benutzt werden.

In diesem Modell kann der Fall eintreten, dass ein Verbund in einem Querschnitt erkannt wird, der jedoch im vorherigen nicht gefunden wurde, weil Beton zwischen den Querschnitten in diesem Bereich eingedrungen ist. Der genaue Anfang vom Verbund kann in diesem Fall nicht bestimmt werden. Das Modell setzt für diesen Fall in der Mitte zwischen den Querschnitten mit dem Verbund an und interpoliert ihn zum folgenden Querschnitt (vgl. Abb. 7).

4 Dank

Das vorgestellte Projekt wurde am Geodätischen Institut der RWTH Aachen im Rahmen des Sonderforschungsbereichs SFB 532 „Textilbewehrter Beton – Grundlagen für die Entwicklung einer neuartigen Technologie“ entwickelt. Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Förderung des Projekts.

5 Literaturverzeichnis

- DFG - SONDERFORSCHUNGSBEREICH SFB 532: „Textilbewehrter Beton – Grundlagen für die Entwicklung einer neuartigen Technologie“, Homepage: <http://sfb532.rwth-aachen.de>.
- BRAMESHUBER, W.: Textile reinforced concrete. State of the art report of RILEM technical committee 201-TRC, report 36, Bagnaux:RILEM (2006)
- KASTNER, J. et al: Quantitative Messung von Faserlängen und -verteilung in faserverstärkten Kunststoffteilen mittels μ -Röntgen-Computertomographie, DGZfP-Jahrestagung 2007
- LANGE, J. (2009): Mess- und Auswertungstechnik zur Riss- und Faserdetektion bei Betonbauteilen. Dissertation am Geodätischen Institut der RWTH Aachen, Nr. 64 im Druck
- BANHOLZER, B. (2004): Bond Behaviour of a Multi-Filament Yarn Embedded in a Cementitious Matrix. Schriftenreihe Aachener Beiträge zur Bauforschung, Institut für Bauforschung der RWTH Aachen(2004), No. 12, Dissertation
- KANG, B.-G.; FOCKE, I.; BRAMESHUBER, W.; BENNING, W. (2009): Quantitative räumliche Auswertung der Mikrostruktur eines in Beton eingebetteten Multifilamentgarns.S.247-260 4. Kolloquium zu textilbewehrten Tragwerken (CTRS4)
- BESL, P. J. UND MCKAY, N. D. (1992): A Method for Registration of 3-D Shapes. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 14(2): S. 239-256.

OBJEKT-ORIENTIERTE KARTIERUNG VON LANDBEDECKUNGSINFORMATIONEN MIT HOCHAUFLÖSENDEN FERNERKUNDUNGSDATEN

MICHAEL PREGESBAUER¹, CHRISTIAN WEISE² & GREGOR WILLHAUCK³

Zusammenfassung: Die Verfügbarkeit sowie die periodischen Aktualisierungen hochauflösender photogrammetrischer Datensätze aus Luftbild- und Airborne Laserscanning (LiDAR – Light Detection and Ranging) Befliegungen stellt die Kartierung von Landbedeckungs- und Landnutzungsdatensätzen vor neue Herausforderungen. Während die Qualität der Daten hinsichtlich ihrer geometrischen Genauigkeit und dem Detaillierungsgrad stetig zunimmt, steigt das damit verbundene Datenvolumen, wodurch das Datenmanagement sowie die Dateninterpretation immer aufwändiger wird. Der Einsatz der Software eCognition von Definiens zur Objekt-Orientierten Bildanalyse ermöglicht für diese Zwecke die simultane automatisierte Segmentierung und Klassifizierung von LiDAR Daten und digitalen Orthofotos.

In der vorliegenden Arbeit wurde die Klassendefinition zunächst auf Basis des Unterscheidungsmerkmals Höhe vorgenommen. Um Vegetation von Nicht-Vegetation zu trennen, wurde zusätzlich noch der nahe Infrarot Kanal der Bilddaten verwendet. Die bodennahen bzw. ebenerdigen Objekte konnten aufgrund der unterschiedlichen Grauwertverteilung der einzelnen Objektklassen wie z.B. Schatten, versiegelte Fläche etc. differenziert werden.

Der Regelsatz wurde auf mehreren für die Landesfläche von Niederösterreich repräsentativen Testsamples entwickelt. Um die Performance zu testen, wurde ein Produktionstest auf einer ausgewählten Testfläche von 400 km² durchgeführt.

1 Einleitung

Seit der Einführung photogrammetrischer Methoden für die Erfassung der Erdoberfläche hat die Messtechnik immer komplexere und genauere Methoden entwickelt. Moderne Sensortechnologien ermöglichen aufgrund der hohen Genauigkeit und Auflösung unterschiedliche Anwendungen im weiteren Umfeld der Landnutzung und Landbedeckungsanalyse. Die Nutzung verfügbarer hochgenauer Orthofoto und Höhendaten eignet sich an dieser Stelle besonders, um für die Klassifizierung von erhöhten Objekten stabile Klassen zu definieren. Um großflächige Datensätze zu analysieren, ist jedoch ein besondere Augenmerk auf die Analysemethoden zu legen, da aufgrund der enormen Datenmengen mit entsprechend großen Berechnungszeiten zu rechnen ist.

1) Michael Pregesbauer, Amt d. NÖ Landesregierung, Abteilung Hydrologie und Geoinformation, Landhausplatz 1, 3109 St. Pölten

2) Christan Weise, Definiens AG, Trappentreustrasse 1, 80339 München

3) Gregor Willhauck, Definiens AG, Trappentreustrasse 1, 80339 München

Der Einsatz Objekt-Orientierter Bildanalyse automatisiert den arbeitsintensiven Vorgang der Landnutzungskartierung und ermöglicht es, große Fläche kosten- und zeitsparend zu analysieren. Die im Nachfolgenden beschriebenen Regelsätze wurden mit eCognition Version 8.x der Firma Definiens entwickelt.

1.1 Datengrundlagen

Zwischen 2006 und 2009 wurden für die gesamte Niederösterreichische Landesfläche digitale Orthofotos sowie ein digitales Gelände- und Oberflächenmodell aus einer Airborne Laserscanning und aus einer digitalen Luftbildbefliegung erfasst. Die digitale Orthofotos standen mit einer Ground Sampling Distance von 12,5 cm mit den Kanälen Rot, Grün, Blau und nahem Infrarot zur Verfügung. Die Gelände- und Oberflächendaten wurden mit einer Gitterweite von 1m für die Berechnung heran gezogen. Der Datenerfassungszeitpunkt der digitalen Orthofotos liegt im Zeitraum zwischen Juni und September. Die Daten des digitalen Höhenmodells wurden zwischen Mitte November und Anfang Mai erfasst. Damit liegt zwischen den beiden Datensätzen eine Zeitspanne von mindestens einem halben Jahr in der Datenerfassung. Dieser Umstand ist bei der Evaluierung der Ergebnisse zu berücksichtigen.

Für die Datenprozessierung wurde als Bearbeitungskachel die Größe eines DKM Blattes mit dem Blattschnitt 1:2000 (1,25x1 km) verwendet.

Um nach der Fertigstellung die Performance des Regelsatzes zu testen, wurden vier Triangulierungsblätter (4 x 80 DKM 1:2000 Mappenblätter) automatisch klassifiziert.

1.2 Klassendefinitionen und Klasseneigenschaften

Um ein Orthofoto in vordefinierte Kategorien zu klassifizieren, ist es notwendig, einen Klassifizierungsalgorithmus derartig zu konfigurieren, dass die einzelnen Klassen voneinander unterscheidbar sind. Wenn sich die Klassen durch das Kriterium Höhe unterscheiden, so ist die Klassentrennung in „erhöhte“ und „nicht erhöhte“ Objekte relativ einfach. Diese Trennung erfolgt durch das normalisierte Höhenmodell als Differenz zwischen Oberflächen- und Geländemodell.

Die Trennung zwischen „Vegetation“ und „nicht-Vegetation“ kann aufgrund des NDVI (Normalized Differenced Vegetation Index) erfolgen, da vitale Vegetation grundsätzlich im nahen Infrarotbereich die Strahlung stärker reflektiert. Oberflächen wie Boden, Fels und tote Vegetation weisen jedoch keinen Anstieg des Reflexionsgrades in diesem Spektralbereich auf, sodass dieses Merkmal auch nur für einen bestimmten Vegetationstyp als Klassenmerkmal verwendbar ist. Um eine ausreichende Klassenstabilität zu erreichen, ist daher die Verwendung eines weiteren Klassenmerkmals, sei es thematisch oder geometrisch notwendig.

Vor der Klassendefinition ist es daher die Überlegung notwendig, welches Merkmal eine Klasse überhaupt ausmacht. Für die vorliegende Klassendefinition wurden nachfolgende Merkmale verwendet:

Objekthöhe aus der Differenz zwischen Oberflächen und Geländemodell (nDSM)

Normalized Differenced Vegetation Index (NDVI)

normalisierte RGB Vektor sowie (nRGB)

Flächennormale zwischen nRGB Vektor und dem mittleren normalisierten Grauvektor (FN[nRGB,1]);

Anhand der vorab festgelegten Merkmale wurde eine Trennbarkeitsanalyse anhand von repräsentativen Testgebieten (Training Data) durchgeführt. Bei einer derartigen Analyse wird auch der zu erwartende Fehler bei der Klassifikation unter Berücksichtigung der verwendeten Kombination der unterschiedlichen Merkmale abgeschätzt (LANDGREBE, 2003).

Aufgrund des zur Verfügung stehenden Datenmaterials und den sich daraus ableitbaren Merkmalen wurden die in Tab. 1 Klassen definiert.

Die Trennbarkeitsanalyse anhand der Klassenmerkmale kann zu einer guten Trennbarkeit zwischen den einzelnen Klassen führen, oder im ungünstigsten Fall zu einer Untrennbarkeit (SCHOWENGERDT, 2007). In Abbildung Abb. 1 ist beispielweise eine derartige Trennbarkeit zwischen den Klassen „Grünbewuchs“ und den „versiegelten Flächen“ gegeben. Innerhalb der Klasse der versiegelten Flächen, kann allerdings mit den verwendeten Merkmalen keine Unterscheidung zur Klasse „offener Boden“ getroffen werden. In diesem Fall wurde eine Kombination von anderen Klassenmerkmalen gewählt bzw. zusätzlich thematische oder geometrische Merkmale eingeführt.

Eine weitere Abhilfe kann dadurch geschaffen werden, dass nicht mit harten Schwellwerten gearbeitet wird, sondern die Klassenzugehörigkeit durch Fuzzy Functions beschrieben wird. Dies eignet sich bei jenen Klassenmerkmalen, die sich durch verlaufende Schwellwerte auszeichnen wie es z.B. in Abb. 1 bei den Klassen „Grünbewuchs“ und „Schatten“ der Fall ist.

Abschließend ist festzuhalten, dass nicht alle Klassen abschließend durch rein spektrale Merkmale beschrieben werden konnten. Vor allem die Klassen „offener Boden“ und „versiegelte Flächen“ mussten zusätzlich durch thematische Merkmale beschrieben werden.

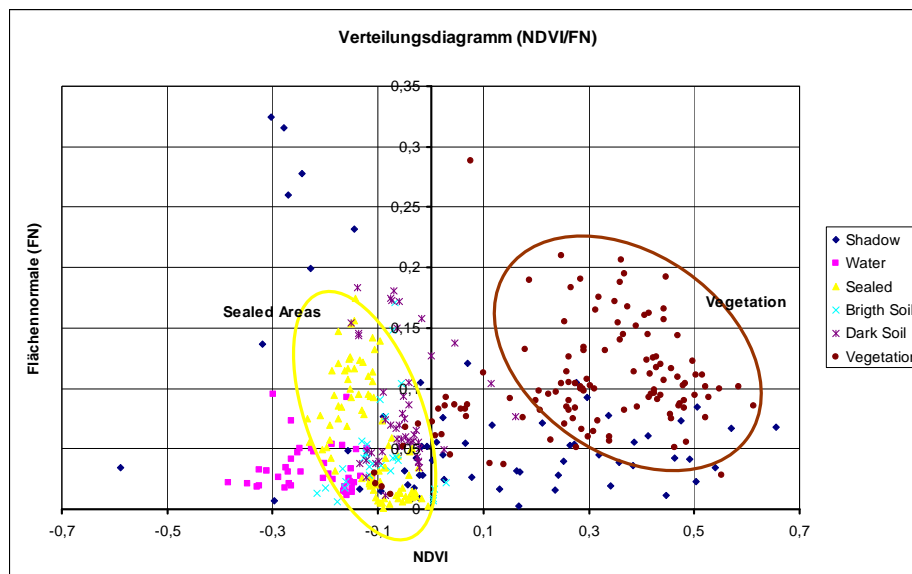


Abb. 1: Verteilungsdiagramm für die Klassen „Vegetation“ und „versiegelte Flächen“ auf Basis der Merkmale NDVI und Flächennormale zwischen mittlerem Grauvektor und nRGB Vektor

2 Objekt-Orientierte Klassifizierung

2.1 Segmentierung

Um ein Maximum an Performance zu erreichen, ist es notwendig die Bearbeitungskachel in Teile mit einer maximalen Größe von 2000x2000 Pixel zu unterteilen (Prinzip Tiling & Stitching). Die Vorgehensweise (PREGESBAUER et.al. 2009) trägt dazu bei, die Rechenzeiten erheblich zu verkürzen, da jede Kachel separat im Rechengrid analysiert wird. Die Gesamtszene wird daher zunächst in Teilmengen á 2000x2000 Pixel zerlegt (Tiling), wo im Anschluss werden inertielle Segmente erzeugt werden, die danach durch Zusammenfügen der Teilmengen (stitching) zu Objektprimitiven vereinigt werden.

Die Objekt Primitive werden unter Verwendung von Parent Process Objects (PPO) (DEFINIENS AG, 2009) erzeugt. Dazu wird ein Segment als Stammsegment definiert und alle anderen Segmente als Kandidaten behandelt. Die Kandidaten werden selbst zu einem Stammsegment, wenn sie die Klasseneigenschaften des Stammsegmentes erfüllen. Der Prozess der Image Object Fusion wird solange in einer Schleife wiederholt, bis kein Kandidat die Klasseneigenschaften der Stammsegmente erfüllt. So werden Objektprimitive erzeugt, die der Form nach weitestgehend den zu klassifizierenden Objekten entsprechen (PREGESBAUER et.al. 2009).

2.2 Klassifizierung

Die unter **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** erzeugten Segmente bilden die Grundlage für die nachfolgende Klassifizierung. Im Idealfall wird jedes zu klassifizierende Objekt durch ein oder mehrere Segmente abgebildet, wobei keine Mischsegmente, d.h. Segmente die zwei oder mehrere Klassen abbilden, auftreten sollten.

Für die Klassifizierung wurden die in **Tab. 1** angeführten Klassenmerkmale herangezogen:

Klasse	Merkmal
erhöhte Objekte	
Gebäude	nDSM > 0,5m , NDVI
bestockte Flächen	nDSM > 0,5m, NDVI
nicht erhöhte Objekte	
Grünbewuchs	NDVI, FN[nRGB,1]
offener Boden	ABS(nRGB), NDVI
versiegelte Flächen	NDVI
Schatten	ABS(nRGB), NDVI

Tab. 1: Klassenmerkmale

Abgesehen von dem Klassenmerkmal nDSM wurden sämtliche Schwellwerte als Fuzzy Functions beschrieben, um die zu klassifizierenden Segmente jenen Klassen zuzuweisen wo die stärkste Zugehörigkeit besteht.

Die Klasse offener Boden wurde, nachdem für die erhaltenen Klassenergebnisse interaktiv eine Trennbarkeitsanalyse zur Klasse „versiegelte Fläche“ durchgeführt wurde, zusätzlich durch thematische Merkmale verbessert.

Für die Klasse „Gebäude“ wurde, um eine kartographisch ansprechende Darstellung zu erhalten ein Generalisierungsschritt durchgeführt. Dieser wird durch das Maps-Konzept in eCognition V 8.x realisiert:

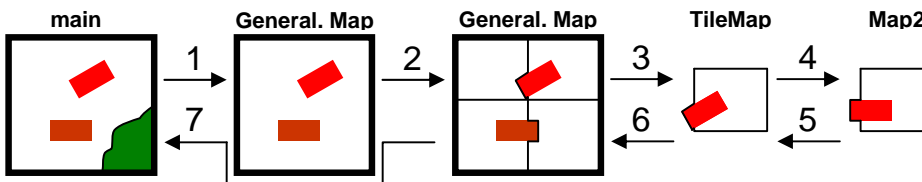


Abb. 2: Konzept der Gebäudegeneralisierung

Zunächst werden die Gebäude in eine GeneralizationMap kopiert und die Hauptrichtung jedes Gebäudes ermittelt. Die GeneralizationMap wird unter Berücksichtigung der Gebäudegrenzen gekachelt. Im Anschluss werden die Kacheln sequentiell in die TileMap kopiert wo dann die Gebäude weiter sequentiell in ein Map2 kopiert und in die Hauptrichtung gedreht werden. Dort erfolgt auch die Abstrahierung. Danach erfolgt die Synchronisierung mit der TileMap und im Anschluss mit der GeneralizationMap. Abschließend können die nunmehr generalisierten Gebäude mit der Main Map synchronisiert werden.

2.3 Diskussion der Ergebnisse

Die Qualität der Segmentierung ist für den Erfolg der anschließenden Klassifizierung von entscheidender Bedeutung. Jene Klassen die auf Basis von spektralen und geometrischen Merkmalen beschrieben werden konnten, weisen die höchste Klassifizierungszuverlässigkeit auf. Die liegt bei Gebäuden bei 94,3% und bei bestockten Flächen bei 96,1% korrekt klassifizierten Segmenten. Jene Klassen die auf Basis von rein spektralen Eigenschaften klassifiziert wurden, liegen bei ca. 85 bis 92% Klassifizierungszuverlässigkeit.

3 Ausblick

Bei der gegenständlichen Arbeit wurde darauf geachtet, für die gesamte Landesfläche unter Zugrundlegung homogener Datengrundlagen einen allgemeinen Regelsatz zu entwickeln. Durch die Einführung weiterer thematischer Klassenmerkmale könnte die Stabilität in Teilbereichen weiter erhöht werden. Allerdings handelt es sich dabei um regional unterschiedliche Merkmale – die Feldwirtschaft im Marchfeld zum Datenerfassungszeitpunkt unterscheidet sich z.T. erheblich von jener im Mostviertel. Dies könnte durch eine entsprechende Attributisierung in der Definiens Architektur Umgebung gelöst werden.

4 Literaturverzeichnis

DEFINIENS AG (2009), Definiens Developer 7 User Guide, München, 2009-08-17

LANDGREBE, D.A. (2003), Signal Theory Methods in Multispectral Remote Sensing. – Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc., 508p.

PREGESBAUER, M., WEISE, C. (2009), Objekt-orientierte Klassifizierung von LiDAR Daten und Orthofotos zur Vegetations- und Gebäudekartierung. – Vermessung & Geoinformation 4/2009, S. 403 -407

SCHOWENGERDT, R.A. (2007), Remote Sensing – Models und Methods for Image Processing 3rd Edition, Academic Press

Mythos True Orthophotos Vom Sinn und Unsinn eines Produkts

ALBERT WIEDEMANN¹, PATRICK WICKI²

Zusammenfassung: Der Begriff True Orthophoto ist missverständlich. Trotz Definition in der DIN werden die unterschiedlichsten Definitionen verwendet und obskure Abwandlungen in Umlauf gebracht. Es wird häufig vernachlässigt, dass als Grundlage für die Berechnung eines True Orthophoto eine komplette und detaillierte Modellierung der Objektoberfläche erforderlich ist. Dabei gelten für Vegetation und künstlich geschaffene Objekte (Gebäude, Brücken) unterschiedliche Voraussetzungen. Ziel des Papers ist es Klarheit in die Begriffe zu bringen und Kenngrößen vorzuschlagen.

1 Der Begriff *True Orthophoto*

Der Begriff *True Orthophoto* birgt eine Menge Missverständnisse in sich und führte bereits in der Vergangenheit zu Diskussionen (MAYR 2002, KRAUS 2002). In der photogrammetrischen Praxis stößt man immer wieder auf die Forderung nach einem *True Orthophoto* (=strenges oder richtiges Orthophoto). Nach KRAUS (2002) ist somit der Begriff *True Orthophoto* ein Pleonasmus oder Tautologie; wie ein „weißer Schimmel“. Einige Anbieter haben keine Hemmungen ein solches Produkt zu verkaufen, obwohl sie dies im strengen Sinn nicht erstellen können. Trotzdem klären sie die Kunden nicht darüber auf, was das bedeutet. Fragt man den Anbieter eines solchen Produkts, wird meist behauptet, dass im „*True Orthophoto*“ **alle** Objekte lagerichtig, d. h. ohne lateralen Versatz abgebildet sind. Diese Behauptung kann so nicht stehen bleiben, denn sie ist eine bewusste Irreführung von Kunden.

Zur Erzeugung eines *True Orthophotos*, in dem alle Objekte lagerichtig abgebildet sind, muss jeder im Bild sichtbare Objektteil im verwendeten Digitalen Oberflächenmodell repräsentiert sein. Während das bei Gebäuden in begrenztem Umfang machbar ist, scheitert dieser Anspruch in der Vegetation generell. Da selbst Objekte kleiner als die Bildauflösung im Bild sichtbar sein können (z.B. Leitungen), scheitert deren lagerichtige Abbildung auch dann, wenn man ein Digitales Oberflächenmodell mit der Auflösung des zu erstellenden Digitalen Orthophotos zu Grunde legt.

Nach DIN 18740-3 ist ein „*True Orthophoto* ... ein Orthophoto, in dem sichttote Räume ...weitgehend beseitigt sind.“ Am Nächsten kommt man dieser Forderung durch eine stark überlappende Befliegung und der Modellierung der Oberfläche aller Objekte deren Größe einen definierten Schwellwert überschreitet. Die Modellierung von Brücken und signifikanten Geländeformen ist bei heute üblichen Auflösungen selbstverständlich, die Modellierung von

¹ Albert Wiedemann, BSF Swissphoto, Mittelstr. 7, D-12529 Schönefeld, albert.wiedemann@bsf-swissphoto.com

² Patrick Wicki, BSF Swissphoto, Dorfstr. 53, CH-8105 Regensdorf-Watt, patrick.wicki@bsf-swissphoto.com

Gebäuden bedeutet einen beträchtlichen Zusatzaufwand, dessen Rechtfertigung in Diskussion mit dem Kunden erfolgen muss. Eine ausreichend detaillierte Modellierung der Vegetation hingegen ist nahezu unmöglich.



Abb.1: Orthophoto Genf (Befliegung 2009 mit UCXp, 2009, 10 cm GSD, 80% Längs- und 70% Querüberdeckung), Verwendung nur der zentralen Bereiche der Bilder, maximale Verkippung nicht modellierter Objekte bei 17% der Objekthöhe

Besonders problematische Begriffe sind die Ausdrücke „*Nearly True Orthophotos*“ oder „*Quasi True Orthophoto*“, also „fast wahre Orthophotos“, mit dem Orthophotos von Zeilenkameras manchmal verkauft werden. Die Tatsache, dass Zeilenkamerabilder nur eine Verkippung quer zur Flugrichtung haben, ändert nichts an dem Fakt, dass es Verkippungen gibt, die sich nur durch großen Befliegungsaufwand mit hoher Querüberlappung reduzieren lassen.

2 Oberflächenmodellierung

Zur Modellierung der Oberfläche stehen verschiedene Möglichkeiten zur Verfügung: Die Abbildung der Oberfläche mit Vektoren, die Erzeugung von Oberflächenmodellen aus LiDAR/SAR/INSAR-Daten oder mittels Punktzuordnungsverfahren. Der zusätzliche Aufwand für die Erzeugung der erforderlichen Oberflächenmodelle ist in der selben Größenordnung anzusiedeln, wie der Produktivitätsgewinn, den Orthophotos gegenüber großmaßstäbigen manuellen Kartierungen (Stereoauswertungen) haben. Da die Qualität eines *True Orthophotos* stark abhängig von der Qualität der Modellierung ist, kann dieser Aufwand aber nicht beliebig reduziert werden, wie die nachfolgende Abbildung zeigt.



Abb. 2: Luftbild Notredame Paris, 18 cm GSD



Abb. 3: Versuch eines True Orthophoto auf der Basis eines DSM mit 1 m Gitterweite – unzureichende Modellierung & Doppelabbildungen

2.1 Oberflächenmodell aus 3D-Vektordaten

Die vektorielle Modellierung erfordert die komplette dreidimensionale Erfassung der Oberfläche. Dies wird für Gebäude bereits seit einiger Zeit in unterschiedlichen Detailstufen praktiziert (AMHAR et al.1998, BRAUN 2003, HABIB et al. 2007). Der Aufwand ist vergleichbar mit der Datenerfassung für 3D Stadtmodelle, müssen doch die kompletten Dachflächen inkl. Aufbauten

und die Vegetation (Baumkronen etc.) erfasst werden. Linienartige Strukturen wie einzelne Äste, Masten, Leitungen, Kabel und Zäune können dabei aber nicht berücksichtigt werden. Diese verursachen Störungen in den Orthophotomosaiken, die häufig durch manuelles Editieren der Mosaikerelemente wegetouchiert werden.

2.2 Oberflächenmodell aus LIDAR-Punktwolken

Häufig werden Punktwolken aus Laserscannerdaten (ALTM) zur Erstellung eines DSM für die Generierung von „True Orthophotos“ verwendet (HABIB & KIM 2006). Die Grenzen der Methode liegen aber in der meist geringeren Auflösung der Laserdaten gegenüber dem Luftbild, lokalen Ungenauigkeiten und sichttoten Räumen, welche durch Abschattungen entstehen können. Wird z.B. versucht mit einem LIDAR-Oberflächenmodell, welches eine Punktdichte von 4 Punkten pro m^2 aufweist, ein *True Orthophoto* von 20 cm GSD zu erzeugen, werden krumme oder ausgefranste Gebäudekanten entstehen (Abb. 4). Dies lässt sich nur durch aufwändige, meist manuelle Nachbearbeitung der Oberflächenmodelle kompensieren.



Abb. 4: Versuch eines True Orthophoto auf der Basis von LiDAR-Daten

Eine Alternative wäre Scanning in der Auflösung des zu erzielenden *True Orthophotos*, in diesem Beispiel 25 Punkte pro m^2 . Dies ist jedoch aus Kostengründen kaum realisierbar. Eine machbare, aber mit begrenzter Auflösung einhergehende Strategie ist die Verwendung multi-spektraler Laserscanner und deren Intensitätswerte. Dabei werden aber nur die Intensitätswerte des Laserscanners verwendet, denn diese sind eindeutig und widerspruchsfrei einer Objektkoordinate zugeordnet.

2.3 Oberflächenmodell mittels Punktzuordnungsverfahren

Das DSM kann auch durch automatische Punktzuordnung (Korrelation, Matching) erstellt werden. Die traditionellen Punktzuordnungsverfahren mit flächenbasiertem Ansatz legen eine Mustermatrix von z.B. 15×15 Pixel zugrunde. Dies führt praktisch zu einer Glättung in der Größenordnung der Größe der Mustermatrix, und resultiert in gerundeten und unscharfen Kanten an den Unstetigkeitsstellen des DSM. Moderne Verfahren wie Semi-Global Matching (HIRSCHMÜLLER 2005) liefern zwar nominell Oberflächenmodelle in der geometrischen Auflösung der vorliegenden Bodenauflösung der Bilder, aber auch hier verschwinden kleine Strukturen. Zusätzlich verschwinden auch bewegliche Objekte, was zwar meist ein erfreulicher Nebeneffekt ist, andererseits aber dem Charakter einer objektiven Momentaufnahme widerspricht.

3 Mosaikbildung

Neben der Modellierung der Oberfläche ist die Mosaikbildung der zweite problematische Schritt bei der Erzeugung von *True Orthophotos*. Die in einem Bild auftretenden sichttoten Bereiche müssen aus anderen, benachbarten Bildern gewonnen werden. Grundvoraussetzung ist eine hohe Überdeckung (Querüberdeckung $> 50\%$) um jedes Objekt aus jeder Perspektive betrachten zu können (RAU et al., 2002). Dennoch können z.B. in engen Gassen sichttote Räume verbleiben. Andererseits bedeutet die Befliegung mit hoher Überdeckung aber eine Verschwendung von Bildmaterial. Im Schnitt werden bei 80% Längs- und 60% Querüberdeckung nur die zentralen 8% des Bildmaterials für die Erstellung der Orthophotos verwendet.

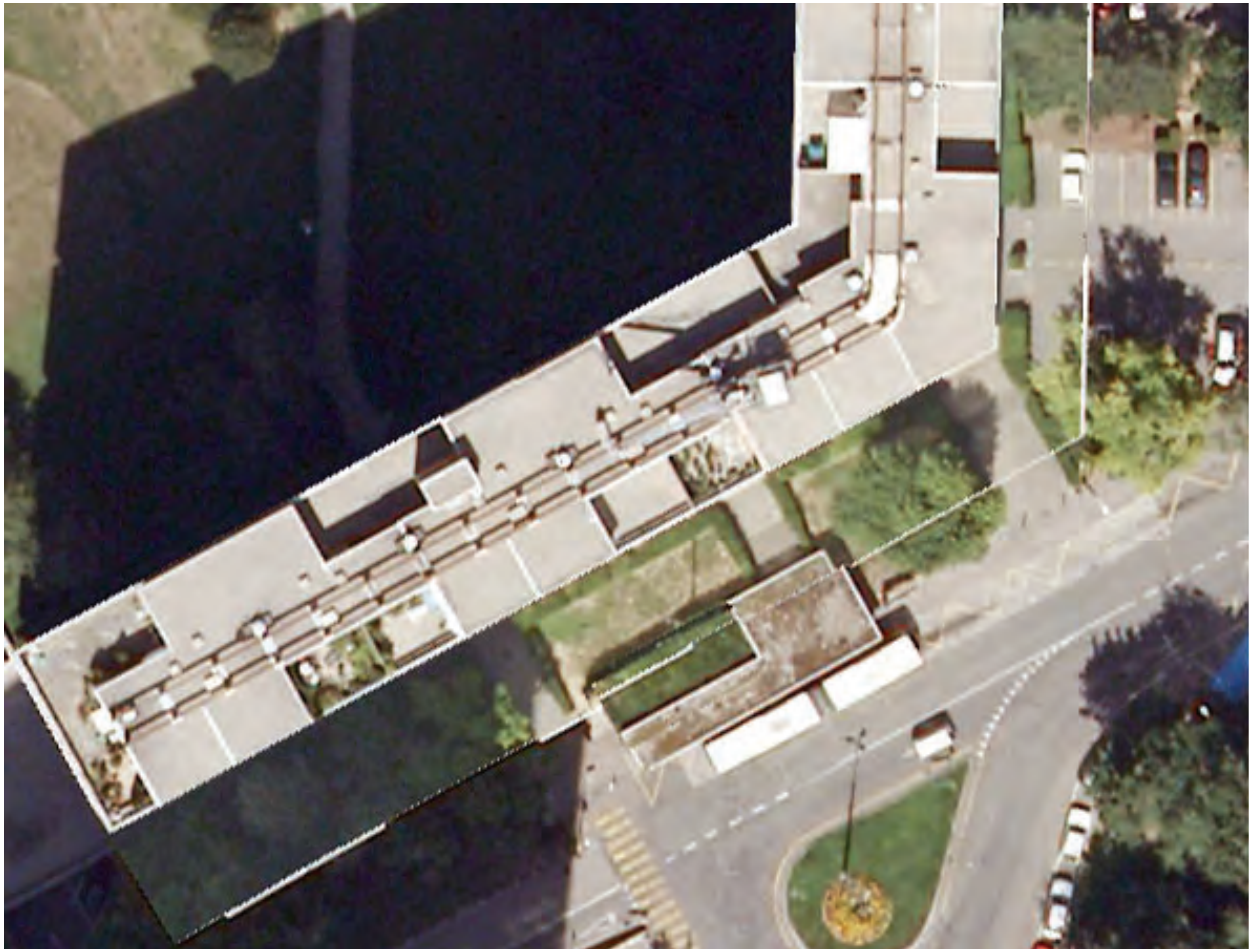


Abb.5: Diverse Restfehler bei der Mosaikbildung

Da heute bereits oft mit hoher Querüberdeckung und auch hoher Längsüberdeckung geflogen wird, ist die Verfügbarkeit alternativer Bilder meist kein Problem. Allerdings muss bedacht werden, dass die einzelnen Bildpixel in der Regel mit ihren Nachbapixeln korreliert sind, sei es durch Übersprechen der Sensorelemente, durch verwendete Bayer-Pattern oder Pan-Sharpening. Dies kann an der Grenze zwischen den zu verwendenden Bildbereichen zu Farbsäumen führen. Radiometrische und geometrische Restfehler beeinträchtigen die Ergebnisse weiter: Wie man

rechts des Gebäudes in Abb. 5 sehen kann verbleiben Helligkeitsunterschiede, Kanten und kleinere Geometriesprünge.

Eine alternative Berechnungsmethode ist die Verwendung aller verfügbaren Farbwerte für die Erstellung des *True Orthophotos*. Dies bedeutet aber generell eine Mittelwertbildung und führt damit unweigerlich zu einem beträchtlichen Verlust an Schärfe im Ergebnis. Während sich in einem traditionellen Orthophoto in einem Wald sehr wohl die Struktur der Äste erkennen lässt, ist dies bei genereller Mittelung nicht möglich. Die Baumkrone wird zu einem grünen Fleck.

Erforderlich ist also eine intelligente Mosaikbildung, die die vorhandenen Bilder und deren Blickrichtung für die Zusammenstellung des Mosaiks berücksichtigt, dabei aber weitgehend auf Mittelbildung verzichtet. Manuelle Arbeiten erlauben das zwar auch, stoßen da sehr schnell an ihre Grenzen.

4 Klare Begriffe

Was soll mit diesem Aufsatz erreicht werden? Nicht die in der Produktion verwendeten Methoden sollen in der Kritik stehen – gibt es doch Methoden, mit denen ansprechende Resultate erzeugt werden können – sondern die Verwendung des unspezifischen Begriffs *True Orthophoto*. Wir begrüßen die Entwicklung hin zu lagerichtigen Orthophotos auf der Basis modellierter Oberflächenmodelle und die Anstrengungen, die von der Forschung und von den Software-Herstellern in diese Richtung unternommen werden. Den Interessenten an Dienstleistungen der Photogrammetrie dürfen aber keine Versprechungen gemacht werden, die nicht gehalten werden können. Es kann nicht sein, dass man relevante Informationen (Stromleitungen, Details der Vegetation) verschwinden lässt, um dem Kunden die Grenzen der Modellierung zu verschleiern. Zu umfangreiche Eingriffe in das Ergebnis der Orthophotoerstellung durch manuelles Editieren mit Photoshop machen aus einem objektiven Produkt ein subjektives Produkt, der Ingenieur wird zum Künstler. Ziel muss es sein, so nah wie möglich an der physikalischen Realität zu bleiben.

Vielmehr appellieren wir dazu, einem potentiellen Kunden die Grenzen des Machbaren aufzuzeigen. Entscheidet sich der Kunde für ein Produkt mit den vorgängig diskutierten Einschränkungen, hat der Anbieter seine Pflicht erfüllt. Kann der Kunde diese Einschränkungen nicht tolerieren und wünscht ein Produkt, dass bezüglich sichttoten Räumen und Lagerichtigkeit höchste Anforderungen erfüllt, wird wohl ein *True Orthophoto* im Sinne der DIN angeboten werden. Dabei muss die Bezugsfläche, der Modellierungsumfang und die maximale tolerierbare Verkippung diskutiert werden. Dies kann an Hand einer geeigneten Graphik erfolgen, in der die Verkippung eines Objekts mit einer definierten Höhe in Abhängigkeit des Abstands vom Nadirpunkt dargestellt wird. Für jede Kamera, Bodenauflösung und Bildüberdeckung ist ein eigenes Diagramm erforderlich (Abb. 6).

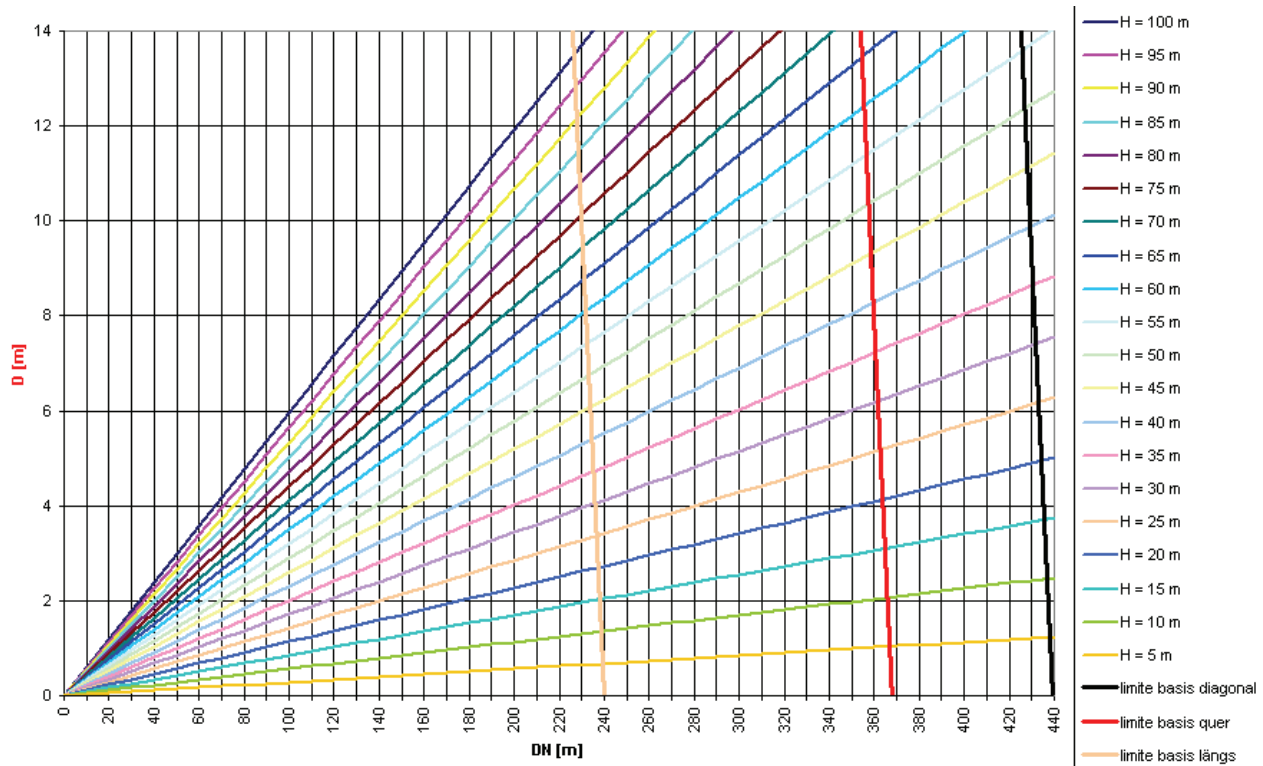


Abb. 6: Darstellung der Gebäudeverkipfung in Abhängigkeit vom Abstand zum Nadirpunkt und der Gebäudehöhe, Vexcel Ultracam D, GSD 20 cm, 60% Längs, 60% Querüberdeckung

5 Fazit

Bei der Erzeugung von hochwertigen Orthophotos werden auch in der Zukunft weitere Fortschritte gemacht werden. Seriöse Anbieter sollten ihre Kunden über die Stärken und Schwächen der verwendeten Methoden informieren und den Begriff *True Orthophoto* nicht unspezifiziert verwenden. Transparenz ist die einzige Möglichkeit den Wert von Dienstleistungen zu verdeutlichen und als qualifizierter Berater und Partner aufzutreten.

6 Literaturverzeichnis

- AMHAR, F., JANSA, J. & RIES, CHR., 1998: The Generation of True Orthophotos using a 3D Building Model in Conjunction with a conventional DTM. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 32, Part IV.
- BRAUN, J., 2003: Aspects of True-Orthophoto Produktion. Photogrammetric Week, Stuttgart, Wichmann 2003.
- HABIB, A.F & KIM, C.-J., 2006: LIDAR-Aided True Orthophoto and DBM Generation System. In: Alias A.-Rahman, S. Zlatanova and V. Coors: Lecture Notes in Geoinformation and Cartography, Springer, 2006
- HABIB, A.F.; KIM, E.-M. & KIM, C.-J., 2007: New Methodologies for True Orthophoto Generation. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol 73., No 1.

- HIRSCHMÜLLER, H., 2005: Accurate and Efficient Stereo Processing by Semi-Global Matching and Mutual Information. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), San Diego, CA, USA, June 20-26, 2005.
- KRAUS, K. 2002: Zur Orthophoto-Terminologie. Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation, 6 (2002), 451 - 452.
- MAYR, W. 2002: Bemerkungen zum Thema "True Orthoimage", PFG 4/2002, pp. 237-244.
- RAU, J. Y., CHEN, N. Y. & CHEN, L. C. (2002). True Orthophoto Generation of Built-Up Areas Using Multi-View Images, Photogrammetric engineering and Remote Sensing, 68(6): 581-588

Use of Landsat TM Images for Geological and Lineament Mapping, East and North East, Syria

M. AL IBRAHIM¹ , W. DOMINIK²

Abstract: Remote sensing data have become more and more popular for geological investigations because their steadily increasing level of detail and accessibility opens up new potentials. This study implies the digital image processing and GIS techniques for developing geological map (scale 1: 250.000) and for lineament mapping in east and north-eastern Syria. Landsat TM image are digitally processed which involved geometric correction, contrast stretching, histogram equalization, band ratio and principal component analysis (PCA) to enhance the quality of the image and interpret the geological features, which used in developing the geological map. The analysed Landsat TM image was compared with the old geological map to delineate the non mapped formations. Directional edge enhancement techniques using convolution kernels were applied to the image. The NIR bands produced higher lineaments number compared with VIS, SWIR and TIR bands.

1 Introduction

Syria is located in the northern of arabian platform, bordered to the west by the dead sea transcurrent fault zone, to the north by the Turkish / anatolian plate with wich it collided during the late cretaceous and to the north – east by the folded foreland of the Zagros. It has area of about 185.000 km² and located between latitude 32° - 37 ° north and longitude 35 ° - 42 ° east. The study area is about 50% of the area of Syria and its located between latitudes 33 ° - 37 ° north and longitudes 38 ° - 42 ° east (Fig.1). The most of study area is located within euphrates graben, which is consist of a step of transect obliquely traverses a series of minor anticlines and horst and graben features that characterize the structure of the euphrates depression. The study area can be divided into five structural zones of intraplate deformation. From south to north these are the the palmyride fold, the euphrates fault system, the bishri block, the abd al aziz structural zone and the qamichly uplift (Fig. 2).

Remote sensing is one of the disciplines in environmental science that refered to the use of electromagnetic sensor to record the surrounding image that will be used to acquire the desired information.

Remote sensing has been used effectively for geological applications. For example, mapping of lineaments or structural features of any region may provide useful information for mineral or oil exploration studies (LANG et al. 1984, MERIN & MOORE 1986, ROWAN et al. 1991, ROWAN & BOWERS 1995). The purposes of this study are to show the use of remote sensing in the study of geological mapping and map lineaments from Landsat TM image.

2 Geology of the study area

Generally, the study area located in the north and north east of Syria and can be divided into five lithological unit based on their age; cretaceous which consist of chalky and organogenous - detrital -

- 1) M. AL Ibrahim, Institute for Applied Geoscience, Technical University of Berlin, Acker Street 76, 13355 Berlin; E-Mail: dip_gis73@yahoo.com
- 2) W. Dominik, Institute for Applied Geoscience, Technical University of Berlin, Acker Street 76, 13355 Berlin; E-Mail: Wilhelm.dominik@tu-berlin.de

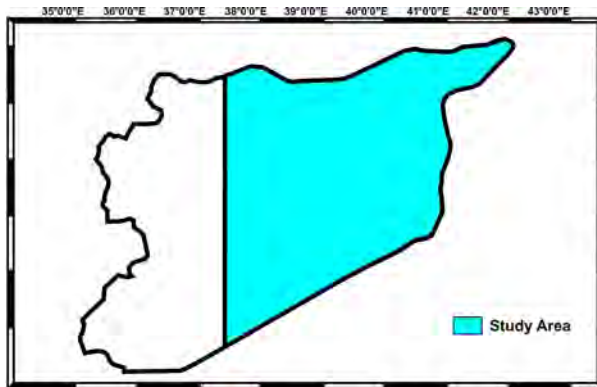


Fig. 1: Location map of study area



Fig. 2: Structure zone map

detrital limestones interbedded with flints, paleogene which consist of chalky and nummulitic limestones with flints, marls and sandstones, neogene which covers more than 60% of the study area and consist of organogenous-detrital limestones, marl, conglomerates, sandstones, clays, gypsum and rock salt, quaternary which consist of terrace alluvial conglomerates and pebble beds, alluvial-proluvial and proluvial conglomerates, marine calcareous sandstones and basalt.

3 Result and discussion

Eight Landsat TM images (171/34, 171/35, 171/36, 172/34, 172/35, 172/36, 173/35 and 173/36) was used in this study was acquired on may and august 2000. The eight images were registered to the Universal Transverse Mercator (UTM) grid using first order polynomial, cubic convolution resampling technique and 30m pixel size. Eight Landsat TM images are mosaicked in one image and the study area was subsisted. The next step was the image enhancement into modify of image and improve the detectability of objects or pattern in the digital image for visual interpretation. A principal component (PC) transformation is useful for displaying the maximum spectral contrast and guide image endmember selection since it puts almost 90% of the variances on the first two components and minimizes the influence of band to band correlation (SMALL 2003, WU & MURRAY 2003). PC has proven useful for lithologic discrimination; furthermore it provided images with higher signal to noise ratio that allowed more band combinations thereby enabling improved mapping of the rock units in the area. The principal component (PC) analysis process allowed the extraction of new information. It shows the directions of grey levels distribution in feature space. In general, PC analysis is a statistical technique widely used in RS to choose the suitable bands and to show spectral differences which helps to display clearly the correlation of the spectral values between the different channels (SAMIH et al. 2009). The Landsat TM result (Fig. 3) is relatively accurate with the geological map.

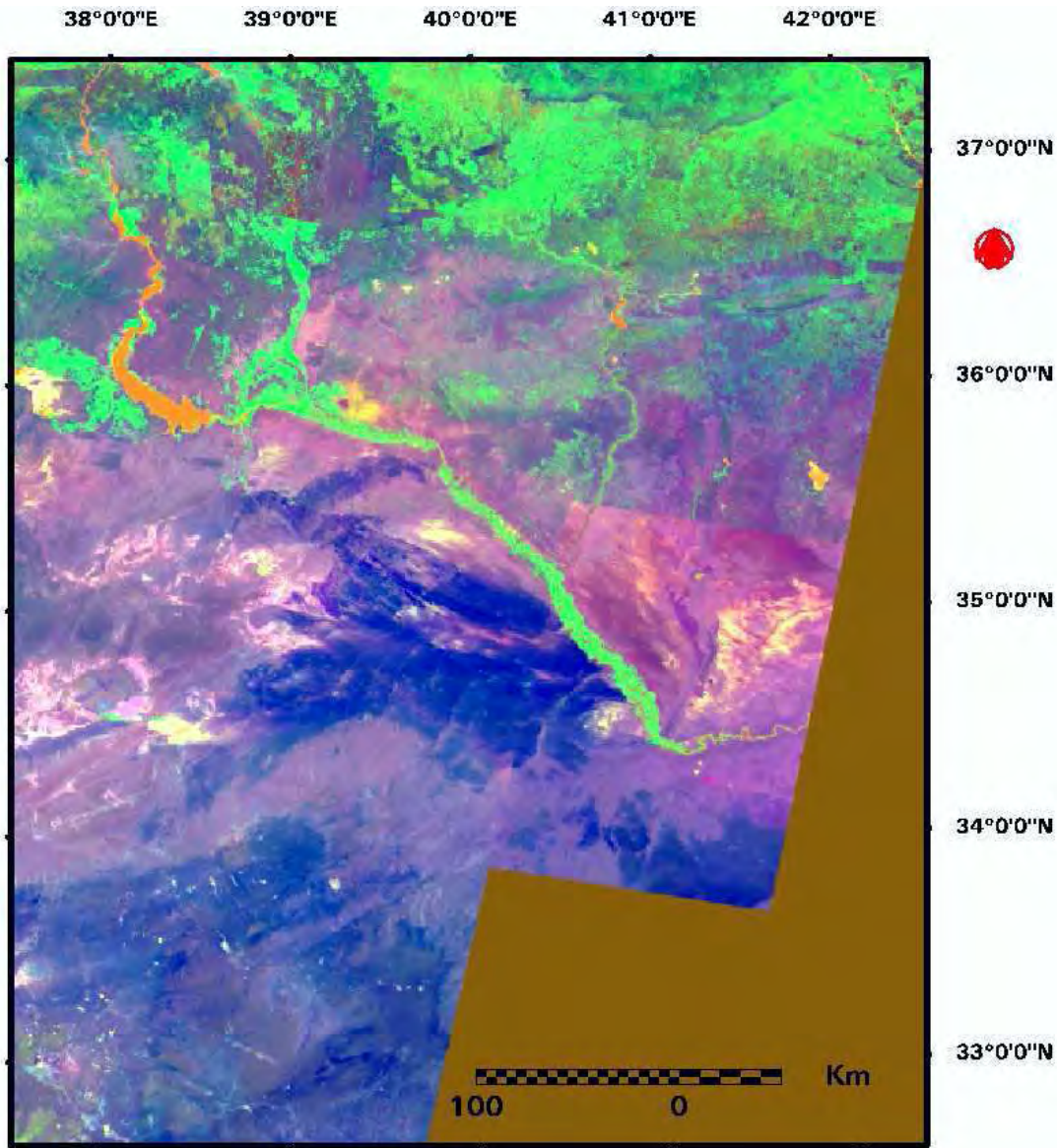


Fig. 3: PCA color composite for Landsat TM (PC1 = Red, PC2 = Green, PC3 = Blue)

Fig. 3 shows good spectral differences between the features in the image, water (orange), sand (dark blue), vegetation (green) are clearly separated here.

Ratioing enhancement has been used to enhance geological features and extract structural lineaments in the area. Ratio images generally enhance different lithologies and features in a region (K.S. Kavak & H. Cetin 2007). They were prepared by dividing the digital number (DN) in one band by the corresponding DN in another band for each pixel, stretching the result value and plotting the new values as an image. This method is used by (WEISSBEOD et al. 1985, CAPPICIONI et al. 2003, EDGARDO 1992) to extract spectral information from multi-spectral imagery. Various kind of land cover types such as rocks, vegetation and water are represented in different colors in ratio color composite images. Fig. 4 show a ratio color composite image using Landsat TM 5/7 (red), 5/4 (green) and 4/1 (blue) ratios (RGB) express more geological information and provide higher contrast between units than the conventional color images. Quaternary rocks and vegetation are represented in pink color. Water is represented by black color. Neogene outcrops represented in hill blue and dark green. Paleogene represented in brown and cretaceous rocks in hill green color.

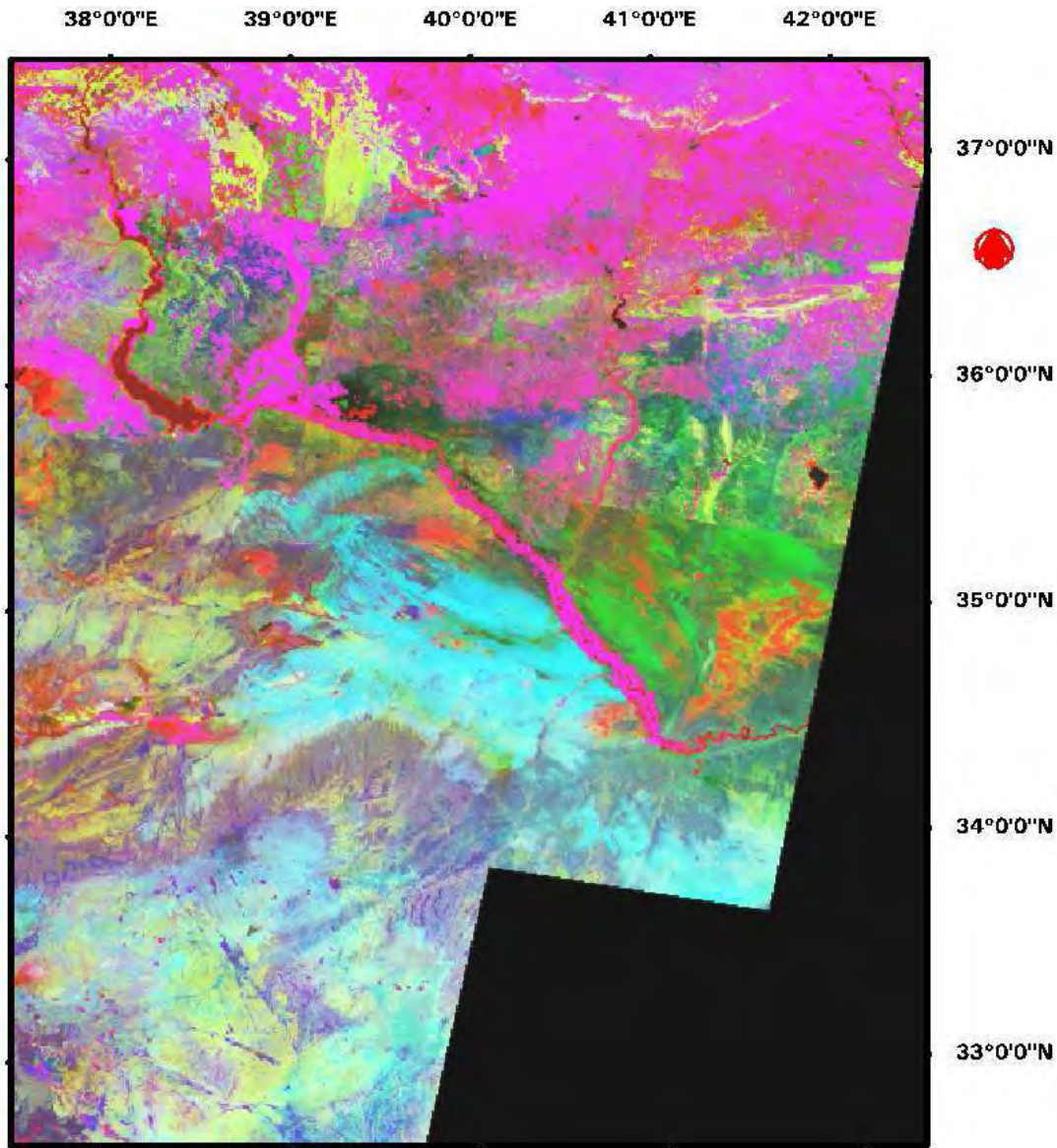


Fig. 4: Ratio color composite image, band 5/7 (red), band 5/4 (green) and band 4/1 (blue)

Comparing the results with the geological map helped us update the geological map and to delineate the non mapped formations. New geological map (Fig. 5) with scale 1:250,000 was produced in digital format. ArcGIS software was used in producing and editing the map. The geological map shows all lithologies and their periods that cover the study area.

A lineament is any extensive linear surface on a planet, as a fault line or fracture line. The term “lineament” is one of the most commonly used terms in geology (ANWAR et al. 2009). HOBBS (1904) first used the term lineament to define a “significant line of landscape which reveals the hidden architecture of rock basement”. O’LEARY et al. (1976) defined lineament as a simple or composite linear feature of a surface whose parts are aligned in a rectilinear or slightly curvilinear relationship and which differ from the pattern of adjacent features and presumably reflects some subsurface phenomenon. Image processing techniques have previously been used to extract lineaments from aerial photographs and satellite images as a means for identifying linear surface traces of planar geologic structures such as faults and fractures (HENDERSON et al. 1996).

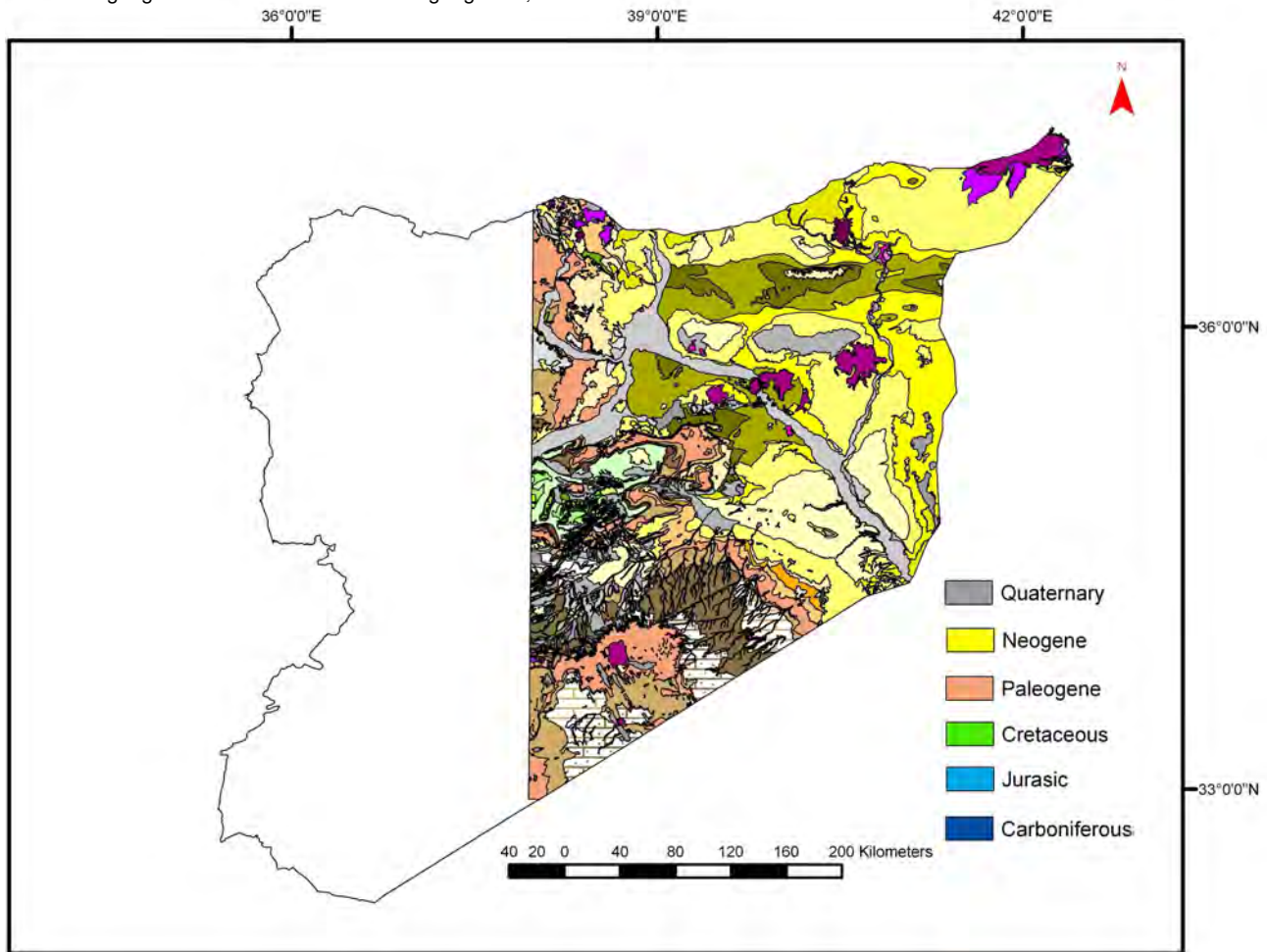


Fig. 5: Digital geological map of study area

In order to identify linear geologic and topographic features from all bands of the Landsat, the Laplacian filtering technique applied to enhance structures in the images. The following number of filtering has applied to the input images.

All Directions		
-1	-1	-1
-1	8	-1
-1	-1	-1

Some authors also prefer to use directional or directional gradient enhancement instead of compass gradient enhancement (SABINS 1996, VINCENT 1997) terms. RICHARDS (1986) defined filter types to detect and highlight diagonal, horizontal and vertical edges in digital images. These filters are also named as Prewitt filters (PREWITT 1970). In this study, Landsat bands 1 (0,45 – 0,52 μm), 2 (0,52 – 0,60 μm), 3 (0,63 – 0,69 μm), 4 (0,76 – 0,90 μm), 5 (1,55 – 1,74 μm) and 7 (2,08 – 2,35 μm) were selected for a lineament analysis. Laplacian filtering 3*3 kernel size was applied to all bands. To provide a better visual interpretation for every filtering type, contrast enhancement procedure was also applied. Later filtered bands were displayed in Fig. 6., which shows that the bands 4 and 5 are the most obvious to identify the lineamnt features. Lineaments were traced and overlapped to produce final lineaments map (Fig. 7). Highest lineaments density located along cretaceous rock, paleogene rock and the lowest density can be seen in the neogene rock. From the analysis, 304 lineaments were obtained from Landsat TM. Classification of the lineaments for direction was

made based on the interval of 10° of the lineaments direction. Based on the lineaments frequency diagram for Landsat TM (Fig. 7) the dominant lineament was in direction NE -SW. The second dominant direction NW - SE. Major fault can be seen in the map, the fault extend from palmyride fold to the irak land. The presence of this fault leads us to the possibility that the Abd Al Aziz mountain (in Syria) and Sinjar mountain (in Iraq) were conjoined or they may close and the fault has separated them.

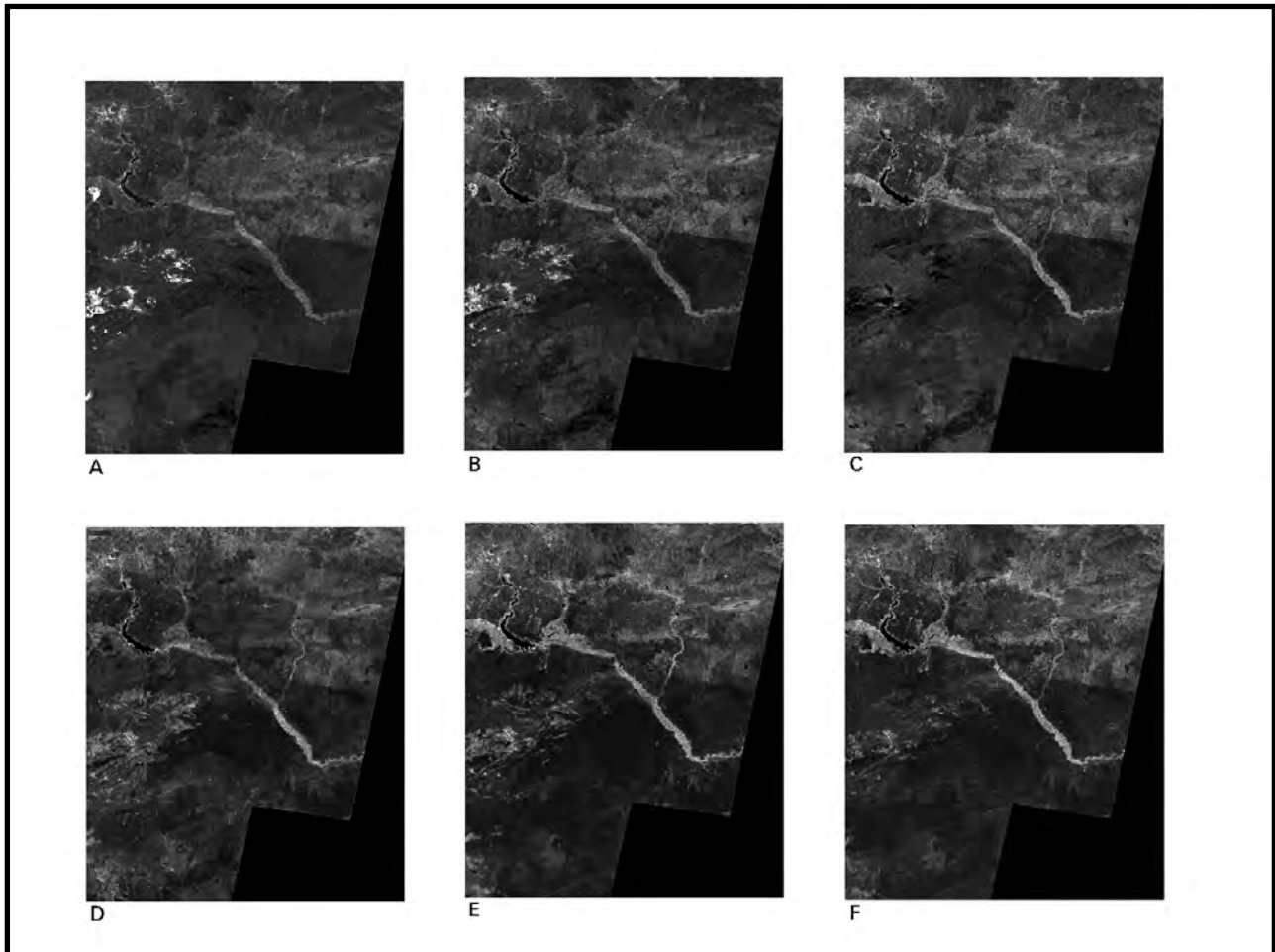


Fig. 6: Edge detection filtering map, laplacian filter (3*3). A (bands 1), B (band 2), C (band 3), D (band 4). E (band 5) and F (band 7)

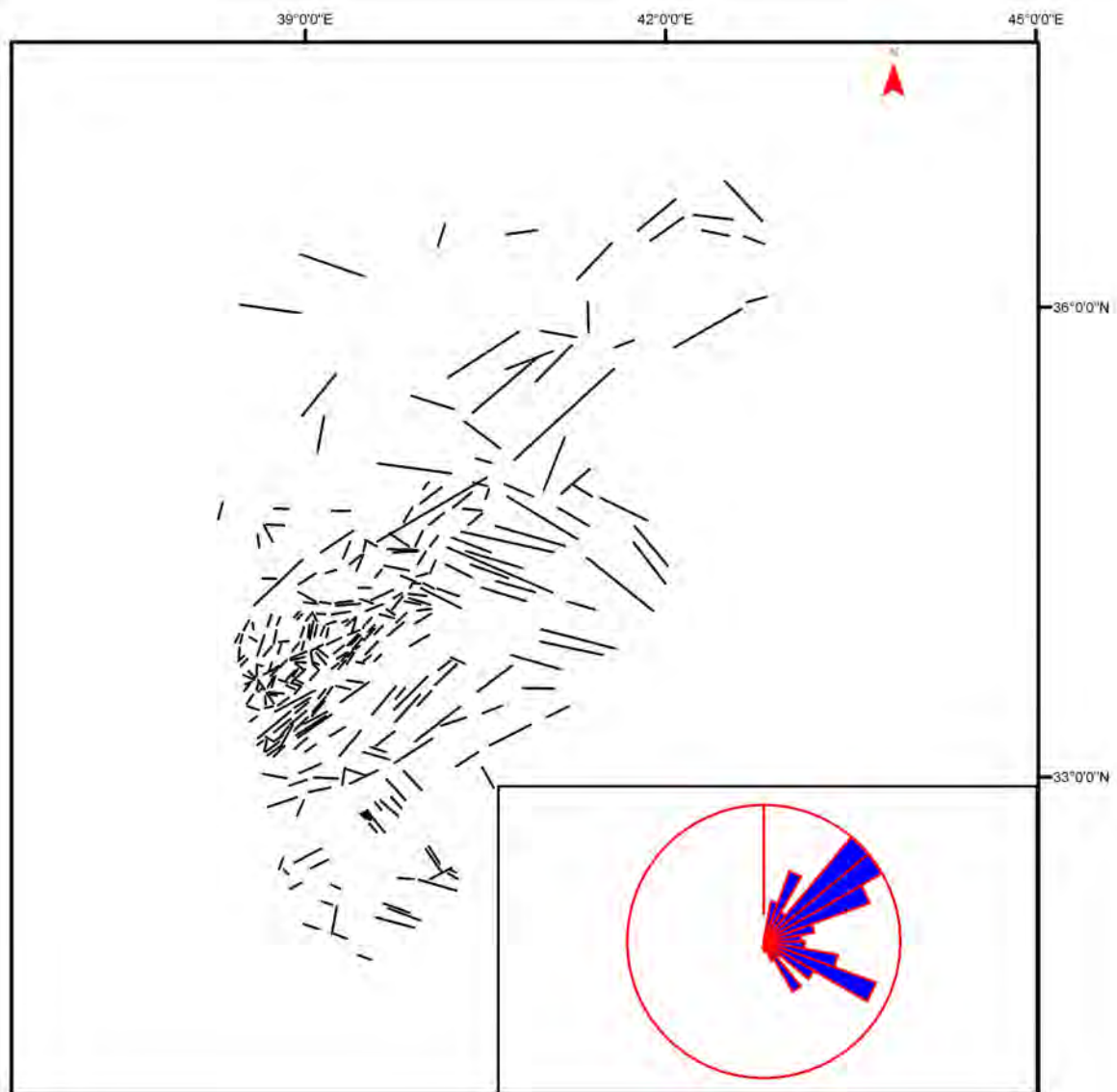


Fig. 7: Lineament map and rose diagram of study area

4 Conclusion

This study showed that Remote Sensing techniques are an efficient tool for geological mapping. Landsat TM imagery has a 30m resolution have been used. Different processing techniques were applied to the Landsat TM image to discriminate and delineate the lithological units and regional lineaments. Visual interpretation and digital image processing methods had very high correlation in lithological and lineaments analysis. The Principal Component analysis, band ratioing and the directional filters applied to data obtained by Landsat TM image were very useful for lithological and lineament extraction. The best bands used for lineaments extraction were band 4 and band 5. The dominant lineament was in direction NE-SW, the second dominant direction NW-SE.

5 References

- ANWAR, A., JUHARI, M. A. & IBRAHIM, A., 2009: A comparison of Landsat TM and Spot Data for Lineament Mapping in Hulu Lepar Area, Pahang, Malaysia. – *European Journal of Scientific Research*, 34 (3), S. 406-415.
Bulletin, 15, S. 483-506.
- CAPPACCIONI, B., VASELLI, O., MORETTI, E., TASSI, F. & FRANCHI, R., 2003: The Origin of thermal water from the Eastern Flank of the Dead Rift Valley, *Terra Nova*, 15 (3), S. 145.
- EDGARDO, G., JAMES, J. & HURTAK, 1992: Laser Remote Sensing of Forest and Crops in Genetic-Rich Tropical. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, XXIX.
- HENDERSON, D. B., FERRILL, D. A. & CLARKE, K. C., 1996: Mapping Geological Faults Using Image Processing Techniques Applied to Hill-Shaded Digital Elevation Models. – *IEEE Transactions*, 8, S. 240-245.
- HOBBS, W. H., 1904: Lineaments of the Atlantic Border Region. - *Geological Society American in Geological Investigation and Mineral Detection in El Azraq-Jordan*. - *European Journal of Geography*
- K. S. KAVAK & H. CETIN, 2007: A detail Geologic Lineament Analysis Using Landsat TM Data of Gölarmara/Manisa Region, Turkey. – *Online Journal of Earth Sciences*, 1 (3), S. 145-153.
- LANG, H. R., W. H. ALDERMAN, F.F. & SABINS, 1984: Test case report, The Joint NASA/Geosat Test Case Project-Final Report. – *American Association of Petroleum Geologists Publishing*, 2 (2).
- MERIN, I. S. & W.R. MOORE, 1986: Application of Landsat Imagery to Oil Exploration in Niobrara Formation. - *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 70, 351-359.
- O'LEARY, D. W., FRIEDMAN, J. D. & POHN, H. A., 1976: Lineament, linear, lineation some proposed new standards for old terms. - *Geological Society America Bulletin*, 87, S. 1463- 1469.
- PREWITT, J. M. S., 1970: Object Enhancement and Extraction, Picture Processing and Psychopictories. – Academic Press.
- RICHARDS, J. A., 1986: Remote Sensing digital Image Analysis. – Springer-Verlag, S. 281.
- ROWAN, L. C. & T. L. VE BOWERS, 1995: Analysis of Linear Features Mapped in Landsat Thematic Mapper and Side-Looking Airborne Radar Images of the Reno 1° by 2 ° Quadrangle, Nevada and California. – *Implications for Mineral resource Studies, Photogrammetric Engineering and remote sensing*, 61, S. 749-759.
- ROWAN, L. C., C. A. TRAUTWEIN & T. L. PURDY, 1991: Maps Showing Association of Linear Features and Metallic Mines and Prospects in the Butte 1° by 2 ° Quadrangle, Montana, U.S.: - *Geological Survey Miscellaneous Investigations Serie Map I-1803-A, Scale 1:250.000*.
- SABINS, F. F., 1996: Remote sensing, Principles and Interpretation, (3rd Edn.), W. H. Freeman and Co.
- SAMIH, R., BASSAM, S. & MUFEED, H., 2009: The use of Remote Sensing Technology
- SHARUL, E., JUHARY, M. A. & NORBERT, S., 2001: Lineament Mapping Using Landsat TM Image and Spot 4 in the Middle of Cameron Highland-Gua Musang Road.
- SMALL, C., 2003: High Spatial Resolution Spectral Mixture Analysis of Urban Reflectance. – *Remote Sensing of Environment*, 88, S. 170-186.
- VINCENT, R. K., 1997: Fundamentals of Geological and Environmental Remote Sensing. S. 366.
- WEISSBEOD, T., KARCZ, I. & ABED, A., 1988: Discussion on the Supposed Precambrian Palaeosuture Along the Dead Sea Rift. - *Journal of the Geological Society*, 142 (3), S. 527-531.
- WU, C. & MURRAY, A.T., 2003: Estimating Impervious Surface Distribution by Spectral Mixture Analysis. - *Remote Sensing of Environment*, 84, S. 493-505.

Karstifizierung, Tektonik und Landnutzung in der Region Lusaka, Sambia

KAI HAHNE¹

Zusammenfassung: Für die Problemstellung eines aktuellen Grundwasser-Projektes zwischen BGR und sambischem DWA werden detaillierte Informationen zu Geologie, Karstdimensionen, Wasserwegsamkeiten sowie zur Landnutzung benötigt. Mit verschiedenen fernerkundlichen Datensätzen und intensiver Geländearbeit konnten dazu Lösungen gefunden werden. Tektonik: Im Arbeitsgebiet treten drei Hauptstörungsrichtungen auf: zwei NW – SO-Streichrichtungen (120° und 140°) parallel zum strukturellen Trend und eine wahrscheinlich konjugierte NO – SW-Streichrichtung (035° – 045°). Westlich und nordwestlich Lusakas unter dem Einfluss der sinistralen Mwembeshi Scherzone (MSZ) begrenzen die Störungen aller beobachteten Richtungen fraktale Scherlinsen. Im Südosten des Arbeitsgebietes macht sich der Einfluss des Sambesi Rifts durch NO-streichende Abschiebungen und ein Ausbleiben von Scherlinsen bemerkbar. Es existieren drei Hauptklüftrichtungen: NO-streichende, steil nach NW und SO fallende Querklüftung, die sich senkrecht zur Streichrichtung der Hauptfaltenachsen entwickelt hat. Längsklüftung parallel zum Streichen der Hauptfaltenachsen. Diagonalklüftung, die zwischen 150° – 180° streicht und untergeordnet eine konjugierte Klüftschar mit Streichrichtungen zwischen 060° und 080°. Karststrukturen: Verkarstung tritt in allen karbonatischen Einheiten des Arbeitsgebietes auf. Wo der Boden entfernt wurde, ist eine direkte Detektion des Karstes mit hochauflösenden Quickbird Aufnahmen möglich. In bedeckten Bereichen des Arbeitsgebietes konnte Verkarstung nur durch Geländearbeit nachgewiesen werden. Alle Aufschlüsse innerhalb der karbonatischen Einheiten waren verkarstet, was für die bedeckten Bereiche ebenfalls postuliert werden darf. Die Dimensionen der Karstlöcher reichen von Durchmessern zwischen 0,2 m und 5 Metern. Landnutzung: Zur Definition verschiedener Landnutzungsformen wurde eine überwachte Klassifizierung durchgeführt. Es wurden Klassen aus den Bereichen Wasser, Boden, Vegetation Landwirtschaft und Besiedlung definiert. Die auffälligsten Veränderungen von 2002 bis zur Gegenwart sind ein Rückgang an Wald und Buschland zugunsten der kommerziellen- und der Kleinlandwirtschaft sowie durch Abholzung zur Gewinnung von Holzkohle, einem wichtigen Energieträger der ländlichen und einfachen städtischen Haushalte. Auch Neubaugebiete insbesondere südlich der Stadtgrenzen wachsen schnell.

1 Einleitung

Im Rahmen der technischen Zusammenarbeit der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) mit dem sambischen Department of Water Affairs (DWA) in Lusaka liegt ein Schwerpunkt innerhalb des aktuellen Grundwasser-Projektes auf der Grundwasserqualität und Grundwasser-Vulnerabilität durch Kontaminationsquellen.

Für die Fragestellung ist ein detailliertes Wissen über mögliche Wegsamkeiten in Aquiferen, wie sie beispielsweise durch Störungen, Klüftung und Karsthohlräume geschaffen werden sowie zu verschiedenen Formen der Landnutzung, essentiell.

1) Kai Hahne, BGR, Stilleweg 2, 30655 Hannover; E-mail: kai.hahne@bgr.de

Wegen weiträumiger Bedeckung des Arbeitsgebietes mit Boden und Vegetation, kam einer intensiven einmonatigen Geländearbeit eine hohe Bedeutung zu.

Existierende Karten des Arbeitsgebietes genügen den Anforderungen der Fragestellung nicht. Daher bestand die Aufgabe innerhalb des Teilprojektes „Karstifizierung, Tektonik und Landnutzung in der Region Lusaka“ hauptsächlich in den folgenden Punkten:

- Abgrenzung von Karsterscheinungen und Störungszonen durch den Einsatz verschiedener fernerkundlicher Methoden und Datensätze (Landsat, SPOT, SRTM, Quickbird) sowie der Verifikation der Ergebnisse im Gelände,
- Verifikation und Beschreibung von Karstdimensionen im Gelände,
- Verifikation und Ergänzung existierender geologischer Karten durch Geländearbeit,
- Verifikation von Landnutzungsinformationen, die zuvor durch fernerkundliche Methoden gewonnen wurden, im Gelände.

2 Geologie

Die geologischen Einheiten des Arbeitsgebietes bestehen aus präkambrischen Metasedimenten und Karbonaten, die vor der panafrikanischen Orogenese sedimentiert und während dieser mehrphasig deformiert und im *Zambezi Belt* überschoben wurden. Sie überlagern diskordant kristallines Grundgebirge aus dem frühen bis späten Präkambrium (NKHUWA, 1996). Partiiell werden sie von Graniten und basischen Gesteinen intrudiert (SIMPSON, 1962, SIMPSON ET AL. 1963). Gemäß SIMPSON ET AL. (1963) werden die Metasedimente, die zum Katanga System gehören, in drei Einheiten unterteilt:

1. Chunga Formation (Schiefer und Quarzite),
2. Cheta Formation (Schiefer und Karbonate) und
3. Lusaka Dolomit Formation (Karbonate).

3 Tektonik

Der strukturelle Trend im Arbeitsgebiet streicht NW – SE. Die Einheiten des Katanga Systems wurden mindestens dreiphasig deformiert (NKHUWA, 1996):

1. Frühe, großräumige F₁-Faltung mit liegenden Falten mit NW – SO-streichenden Achsen. Die Falten wurden nach SW überschoben. Diese Phase koinzidiert wahrscheinlich mit der NO-gerichteten D₁-Überschiebung und betrifft alle Gesteine des Gebietes.
2. Offene F₂-Falten, ebenfalls mit NW – SO-streichenden Achsen, die die Liegefalten überprägt haben.
3. Offene F₃-Falten mit NO – SW-streichenden Achsen.

Gemäß PORADA UND BERHORST (2000) wurde die NO-gerichtete Überschiebung gefolgt von Rückfaltung und Rücküberschiebung, was zu einer südwärts gerichteten Rückversetzung des Lusaka Dolomits führte. Flache Überschiebungen in der Region um Lusaka führten zur tektonischen Schichtverdickung der Karbonate (NKHUWA, 1996).

3.1 Klüftung

Es existieren drei Hauptklüftungsrichtungen:

1. Steil fallende Querklüftung ($80^\circ - 90^\circ$ nach NW und SO), die sich senkrecht zur Streichrichtung der Hauptfaltenachsen entwickelt hat und nach NO, zwischen 030° bis 060° streicht.
2. Längsklüftung parallel zur Streichrichtung der Hauptfaltenachsen (Streichen: $110^\circ - 140^\circ$, Fallen: $30^\circ - 45^\circ$ nach SW und $75^\circ - 80^\circ$ nach NO).
3. Diagonalklüftung, die zwischen $150^\circ - 180^\circ$ streicht und untergeordnet eine konjugierte Klüftschar mit Streichrichtungen zwischen 060° und 080° , mit Fallwinkeln von 65° bis 90° nach Osten und Süden.

3.2 Störungen

Im Arbeitsgebiet treten drei Hauptstörungsrichtungen auf:

1. Eine NW – SO-Streichrichtung (120°), parallel zum strukturellen Trend,
 2. eine weitere NW – SO-Streichrichtung (140°) und
 3. eine wahrscheinlich konjugierte NO – SW-Streichrichtung ($035^\circ - 045^\circ$).
- Untergeordnet tritt auch eine NO – SW-Streichrichtung (080°) auf, die parallel zur Mwembeshi-Scherzone verläuft.

Die Mwembeshi-Scherzone (MSZ) wird als präexistente reaktivierte lithosphärische Schwächezone betrachtet, die den Sambesi-Faltengürtel vom nördlich verlaufenden Lufilian-Faltengürtel trennt (PORADA UND BERHORST, 2000, Abb. 1). Die MSZ bildet eine bis 8 km breite bruchhaft/duktile vorwiegend sinistrale Transformstörung. Im Arbeitsgebiet bildet der nordwestliche Teil des Mwembeshi-Flusstales einen Nebenast der MSZ. Entlang dieses Astes treten zuvor beschriebene Störungsrichtungen des Typs 1) und 2) auf. Sie bilden lokale und regionale Bachtäler, in denen sinistrale und dextrale Versätze beobachtet werden. Auf Satellitenbildern sind im Einflussbereich der MSZ westlich und nordwestlich von Lusaka an allen drei Störungstypen fraktale Muster aus Scherlinsen zu beobachten. Die Dimensionen der Scherlinsen reichen von einigen Metern bis zu 17 km Länge (Abb. 2, unten). Im Südosten des Arbeitsgebietes fehlen Scherlinsen. Hier treten unter zunehmendem Einfluss des Sambesi-Grabens NO-streichende Abschiebungen auf.

Ein Beispiel einer tief reichenden steil stehenden Störung wird anhand einer Linie aus Talksteinbrüchen im Lusaka-Dolomit südöstlich der Stadt dokumentiert. Talklagerstätten bilden sich unter anderem aus karbonatischem Ausgangsgestein, dem durch hydrothermale Reaktionen weitere Komponenten (MgO , SiO_2 , CO_2), die das Mineral aufbauen, zugeführt werden. Im beobachteten Fall dürften die silikatischen Komponenten aus dem unterlagernden Kristallin stammen. Eine genaue Tiefenangabe bis zum Erreichen des Grundgebirges ist aus Ermangelung an dokumentierten Bohrungen nicht möglich.

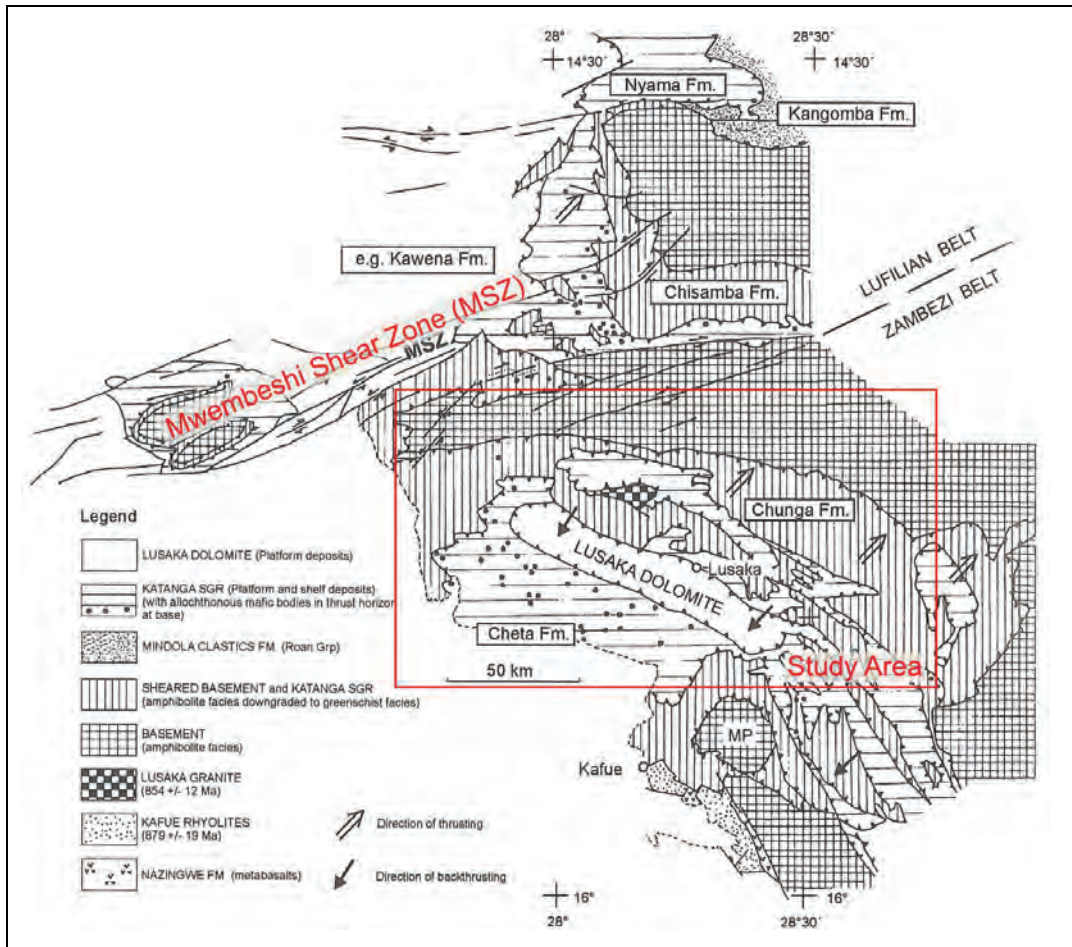


Abb. 1: Tektonostratigraphische Interpretation des Lufilian- und Sambesi-Faltengürtels. Verändert nach PORADA UND BERHORST (2000).

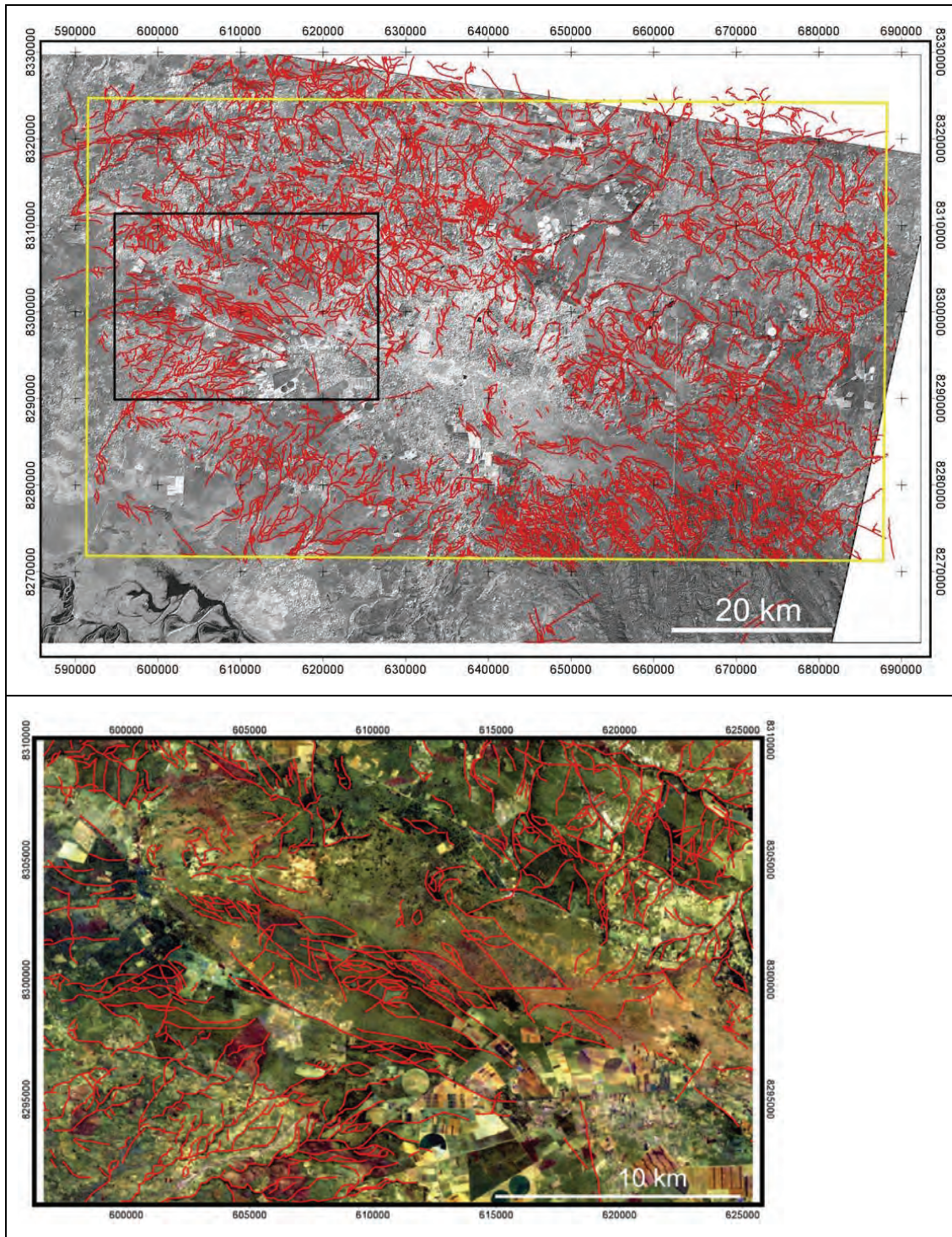


Abb. 2: oben: Beispiele für aus Satellitenbildern abgeleitete Störungen. Landsat ETM Kanal 5. Das gelbe Rechteck begrenzt das Arbeitsgebiet, das schwarze markiert den Ausschnitt des unteren Bildes. Unten: Aus Satellitendaten abgeleitetes fraktales Muster aus Scherlinsen im Einflussbereich der Mwembeshi Scherzone. Die Dimensionen reichen von einigen Metern bis zu 17 km Länge. Störungen, die Scherlinsen begrenzen, sind meist nur durch einen Farbkontrast zur Umgebung erkennbar. Im Gegensatz dazu stehen Störungen, die Bachsysteme nachzeichnen. ETM Kanäle 7,5,2 (RGB).

4 Karstifizierung

Eine fortgeschrittene Karstifizierung kann in allen karbonatischen Einheiten des Arbeitsgebietes beobachtet werden. Die oberflächennahen Karsthohlräume sind normalerweise mit Boden gefüllt. In bewohnten Gebieten wird der Boden oft entfernt, um in zahlreichen kleinen Steinbrüchen Kalkstein für Bauzwecke zu gewinnen. Karstgebiete mit solchen inoffiziellen Steinbrüchen sind auf hochauflösenden Quickbird Satellitenbildern leicht zu detektieren.

Die Dimensionen der Verkarstung reichen von Mikrokarst auf karbonatischen Oberflächen bis zu Karsthohlräumen mit mehreren Metern Durchmesser und –Tiefe (Megastrukturen wie Dolinen wurden in dieser Arbeit nicht berücksichtigt). Da sich die meisten Karststrukturen entlang des geologischen Streichens entwickelt haben, ist die Länge der Hohlräume meist größer als ihre Breite, kann aber aufgrund der Bodenbedeckung und dichten Vegetation in den meisten Gebieten nicht bis zum Ende verfolgt werden (Abb. 5). Aus diesem Grund wurden hauptsächlich die maximalen Breiten beschrieben, die größeren aber nur unvollständig verifizierbaren Längen dagegen vernachlässigt (Abbildungen 3 und 4). Die Dimensionen der Karstlöcher reichen von 0,2 m bis 5 Metern.

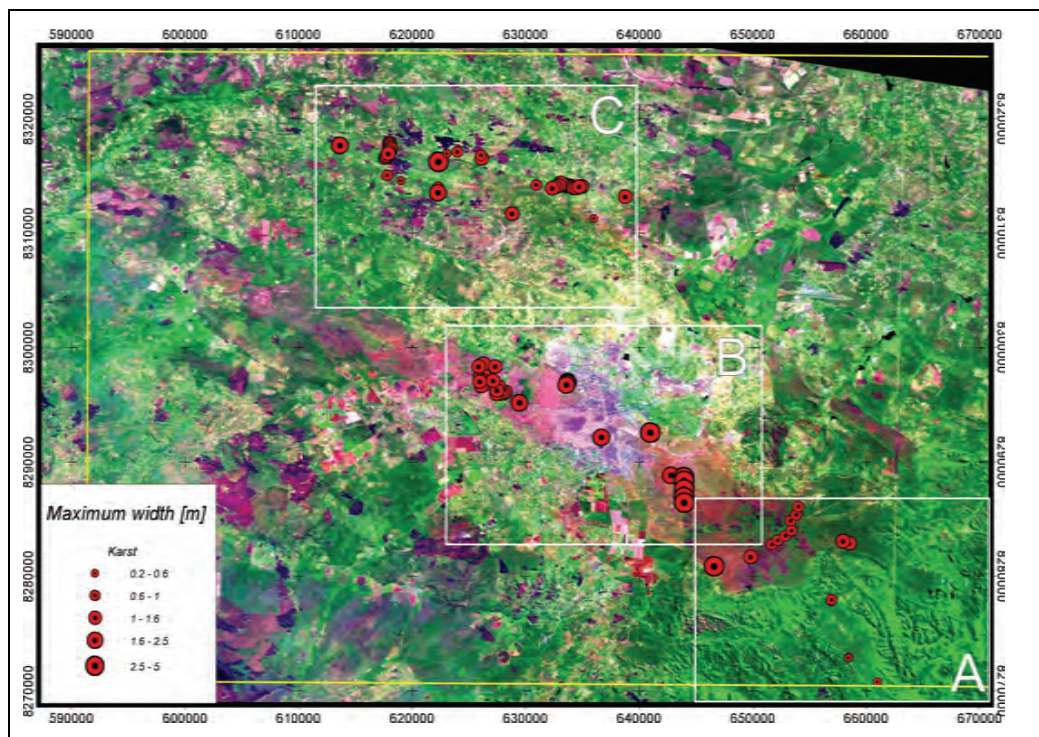


Abb. 3: Maximale Breiten der Karsthohlräume. Das Arbeitsgebiet wurde zur besseren Übersicht in drei Teilgebiete A, B und C eingeteilt. ETM Kanäle 7,4,1 (RGB).

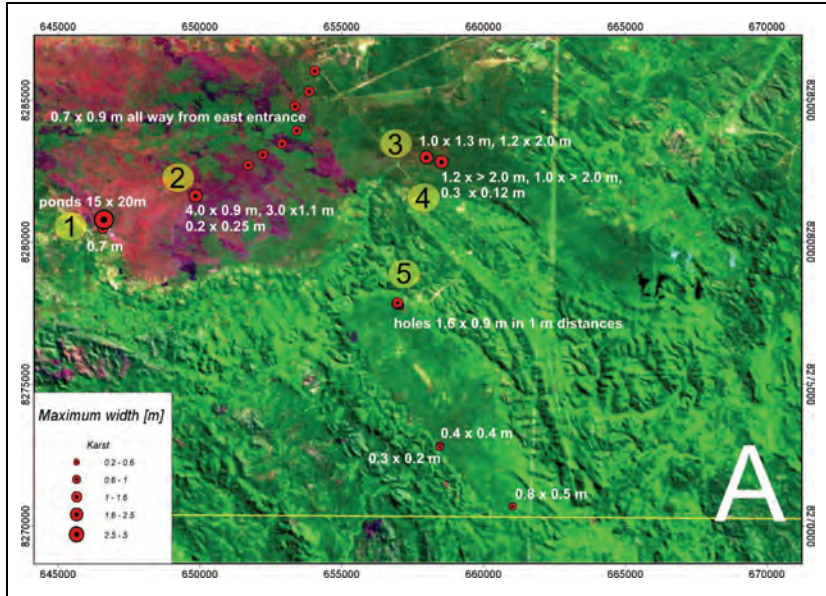


Abb. 4: Überblick über die Karstdimensionen in Teilgebiet A. Die Zahlen markieren teilweise Lokalitäten der in Abb. 5 dargestellten Aufschlüsse. ETM Kanäle 7,4,1 (RGB).



Abb. 5: Verschiedene Karsterscheinungen im Teilgebiet A. 1) Säulenförmiger Karst mit Mikrokarst auf den Oberflächen inmitten zutage tretenden Grundwassers. 2) Pinnacle Karst bis 5 Meter Höhe. 3) Die häufigste Ausprägung der Karstifizierung sind mit Boden gefüllte Hohlräume, die nach wenigen Metern entlang der Streichrichtung von Vegetation bedeckt werden.

4.1 Mögliche Kontaminationsquellen

Karstaquifere sind besonders anfällig für Verschmutzung. Große Hohlräume ermöglichen eine schnelle Durchflussrate des Grundwassers und wirken Filtereffekten entgegen. Im Arbeitsgebiet treten zahlreiche Quellen für mögliche Kontaminationen auf. Neben den verbreiteten Quellen einer dicht besiedelten Großstadt wie Straßenverkehr und Lecks aus Werkstätten und Tankstellen gibt es Quellen wie inoffizielle Mülldeponien (Abb. 7) und Außentoiletten ohne geregelte Entsorgung, die sich stattdessen direkt der vorhandenen Karsthohlräume bedienen.



Abb. 6: Die lokale Wasserversorgung kann durch Kontamination aufgrund inoffizieller Mülldeponien und Außentoiletten in unmittelbarer Nachbarschaft gefährdet sein.



Abb. 7: Inoffizielle Mülldeponien in verkarstem Lusaka Dolomit können zur Kontamination des Grundwassers beitragen.

5 Landnutzung

Zur Definition verschiedener Oberflächenbedeckungen wurde eine überwachte Klassifizierung nach der Methode „Maximum Likelihood“ von 80 % durchgeführt. Als Datengrundlage diente eine Landsat ETM Szene vom 13. Mai 2002.

Die folgenden sieben Klassen wurden definiert: 1) Wasser, 2) Besiedlung, 3) Unbedeckter Plinthosol, 4) Unbedeckter Plinthosol 1, 5) Unbedeckter Boden, 6) Landwirtschaft und 7) Wald.

Aus Gründen der Aktualität wurden die Klassen Wasser, Besiedlung, Landwirtschaft und Wald in einem GIS manuell angeglichen. Als Basis dienten vier SPOT Szenen mit Aufnahme daten vom 11.07. 2008 (westlicher Teil), 13.08. 2007 (Nordosten) und 14.07. 2007 (Südosten).

Einige Klassen konnten mit den vorhandenen Daten nicht zufriedenstellend automatisch erzeugt werden. Die Gründe dafür lagen in: 1) unzureichender spektraler Information, 2) sich gegenseitig überlappenden Eigenschaften, z. B. von Vegetation aus Gärten und Kleinlandwirtschaft mit Buschland oder 3) mehrdeutigen spektralen Eigenschaften der selben Klasse, beispielsweise Brache und gegenwärtig bewachsener Landwirtschaftsflächen, 4) Brache (= Landwirtschaft) interferiert zudem mit den Klassen verschiedener unbedeckter Bodentypen.

Aus diesem Grund wurden drei weitere Klassen definiert: 1) Kleinlandwirtschaft, 2) lockere Besiedlung mit Gärten und 3) Buschland. Diese Klassen wurden als Rasterdaten mit entsprechenden Legenden dargestellt (Abb. 8).

Die Klassen „Unbedeckter Plinthosol“ und „Unbedeckter Plinthosol 1“ waren spektral differenzierbar, was mit hoher Wahrscheinlichkeit auf einen unterschiedlichen Eisenoxid- und organischen Gehalt zurückzuführen ist.

Die auffälligsten Veränderungen von 2002 bis zur Gegenwart sind ein Rückgang an Wald und Buschland zugunsten der kommerziellen- und der Kleinlandwirtschaft sowie durch Abholzung zur Gewinnung von Holzkohle, einem wichtigen Energieträger der ländlichen und einfachen städtischen Haushalte. Auch die Neubaugebiete insbesondere südlich der Stadtgrenzen wachsen schnell.

6 Beitrag der Fernerkundung

Der Nutzen der Fernerkundung zur Aufgabenstellung lag vorzugsweise in den folgenden Punkten: 1) Detektion von Karststrukturen in Gebieten ohne Bodenbedeckung und weitere Planung von „Ground Checks“ 2) Detektion und Abgrenzung von Lineamenten verschiedener Größenordnungen; 3) Synopsis des strukturellen Trends im gesamten Gebiet ; 4) Abgrenzung verschiedener Oberflächenbedeckungen durch überwachte Klassifizierung multispektraler Daten.

Störungen, die Scherlinsen begrenzen, unterscheiden sich lediglich durch geringe Farbunterschiede von der Umgebung und sind fast ausschließlich fernerkundlich zu erfassen. Die Verwendung multispektraler Landsat ETM- und SPOT Daten hat maßgeblich zu einem genaueren Bild des Arbeitsgebietes beigetragen.

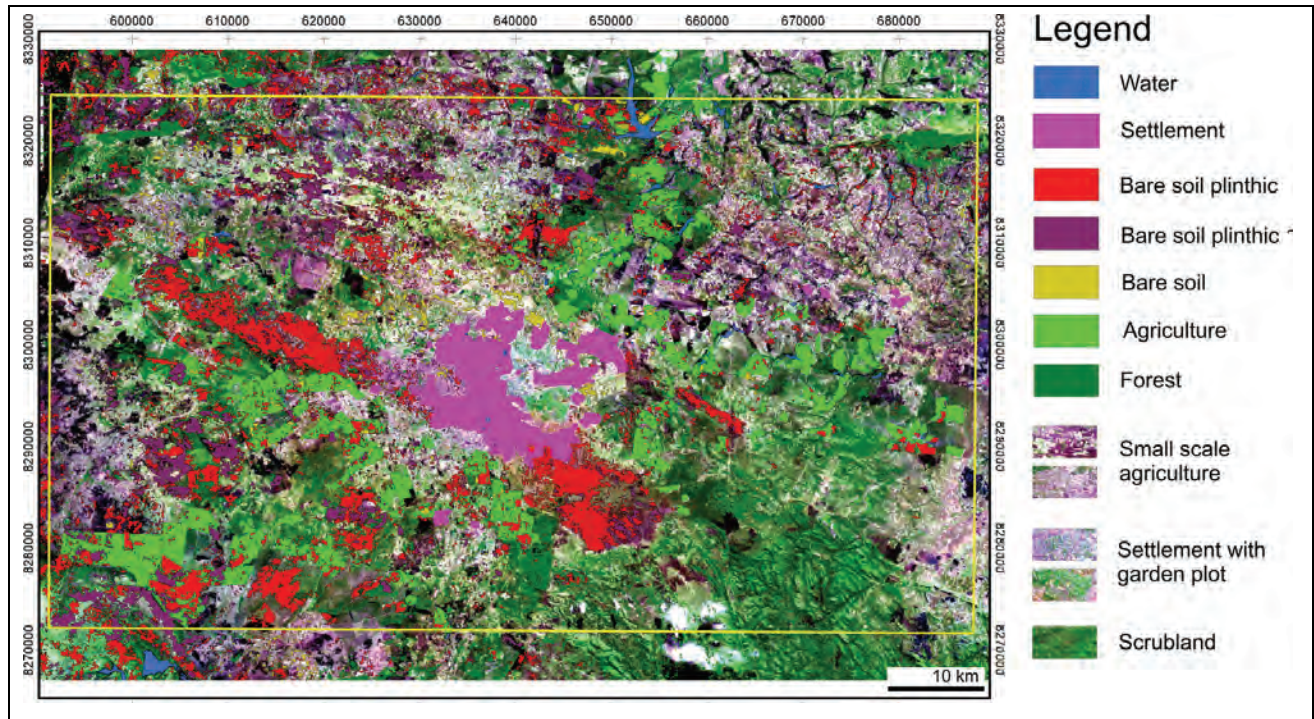


Abb. 8: Durch überwachte Klassifizierung auf der Basis einer ETM Szene vom 13.05. 2002 erzeugte Klassen. Manuell angeglichen unter Verwendung aktueller SPOT Szenen aus den Jahren 2007 und 2008. Die zusätzlichen Klassen "small scale agriculture", "settlement with garden plot" und "scrubland" können mit Hilfe der Raster-Legende ermittelt werden. Im Zentrum der Szene befindet sich Lusaka. SPOT, Kanäle 1,3,2 (RGB).

7 Literaturverzeichnis

- NKHUWA D. C. W., 1996: Hydrogeological and engineering geological problems of urban development over karstified marble in Lusaka, Zambia. – *Mitteilungen zur Ingenieur- und Hydrogeologie* **63**, 251 pages; Aachen.
- PORADA, H. AND BERHORST, V., 2000: Towards a new understanding of the Neoproterozoic-Early Palaeozoic Lufilian and northern Zambezi Belts in Zambia and the Democratic Republic of Congo. – *J. of African Earth Sciences* **30/3**: S. 727-771, Elsevier Science Ltd.
- SIMPSON J. G., 1962: The geology of the Mwembeshi River area.- Report of the Geological Survey No. **11**, Explanation of degree sheet 1527, NE quarter, Northern Rhodesia Ministry of Labour and Mines; 29 pages; Government Printer, Lusaka.
- SIMPSON J. G., DRYSDALL A. R. & H. H. J. LAMBERT, 1963: The geology and groundwater resources of the Lusaka area.- Report of the Geological Survey No. **16**, Explanation of degree sheet 1528, NW. quarter; Northern Rhodesia Ministry of Labour and Mines; 59 pages; Government Printer, Lusaka.

Extraktion geologisch relevanter Strukturen auf Rügen in Laserscanner-Daten

JOACHIM NIEMEYER¹, FRANZ ROTTENSTEINER¹, FRIEDRICH KÜHN² & UWE SÖRGEL¹

Zusammenfassung: Am Kreidekliff der Insel Rügen treten Hangabbrüche und -rutschungen auf, welche Personen und Einrichtungen der örtlichen Infrastruktur gefährden können. Zur Erkennung potenzieller Geogefahrengebiete erfolgen aufwändige Feldbegehungen. In diesem Beitrag wird untersucht, inwieweit ergänzend dazu mittels luftgestütztem Laserscanning eine flächenhafte Überwachung möglich ist, die auch schwer zugängliche Bereiche einschließt. Dazu erfolgt zunächst eine Filterung des Oberflächenmodells, um Gebäude und Vegetation aus den Daten zu entfernen. Aus dem so abgeleiteten Geländemodell werden geologisch relevante Strukturen extrahiert. Die Ergebnisse sollen Hinweise auf potentielle Gefahrenstellen liefern und damit die Ingenieurgeologen bei der Auswertung unterstützen.

1 Einleitung

Auf der Halbinsel Jasmund im Nordosten der Ostsee-Insel Rügen befindet sich der Nationalpark Jasmund, der insbesondere durch die berühmten Kreidefelsen überregional bekannt ist. Getriggert durch Schneeschmelze und anhaltende Regenfälle sowie durch abrasive Prozesse im Übergangsbereich Kliff/Meer kommt es in Abhängigkeit vom Durchtrennungsgrad zu einer Auflockerung der Kreide-Sedimente, in deren Folge lokal begrenzte Abbrüche der Steilküste auftreten können. Solche potentiell gefährdeten Bereiche werden üblicherweise durch Begehungen identifiziert, was allerdings sehr aufwändig und gerade in schwierigem Gelände nicht immer flächendeckend möglich ist. Ergänzend zu ingenieurgeologischen Untersuchungen des Landesamtes für Umwelt und Geologie (LUNG) des Landes Mecklenburg-Vorpommern und der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) wurde im Frühjahr 2007 eine Befliegung des entsprechenden Küstenbereiches sowie eines Teils des daran angebundnen Hinterlandes mit einem luftgestützten Laserscanner durchgeführt.

Dieser Beitrag behandelt methodische Fragen der Verarbeitung und Auswertung der Laserdaten für bewaldete Gebiete sowie Kliffbereiche. Weiterhin werden die Ergebnisse einer ersten vorläufigen Auswertung dieser Daten vorgestellt. Das Ziel ist es festzustellen, welche Möglichkeiten luftgestütztes Laserscanning zur Erkennung und Beurteilung geologisch relevanter Geländemerkmale sowie potentiell instabiler Kliffbereiche bietet. Solche Merkmale können beispielsweise Geländestufen und -kanten sein, die besonders in der Nähe des Kliffs Hinweise auf die Orte möglicher weiterer künftiger Abbrüche der Kreidefelsen sind.

1) Joachim Niemeyer, Franz Rottensteiner, Uwe Sörgel, Institut für Photogrammetrie und GeoInformation, Leibniz Universität Hannover, Nienburger Straße 1, 30167 Hannover; E-Mail: {niemeyer, rottensteiner, soergel}@ipi.uni-hannover.de

2) Friedrich Kühn, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Geozentrum Hannover, Stilleweg 2, 30655 Hannover; E-Mail: friedrich.kuehn@bgr.de

1.1 Grundlagen der Geologie im Untersuchungsgebiet

Die Entwicklung Rügens begann vor 70 bis 80 Millionen Jahren, als das Weltmeer der Oberkreide auch das Gebiet des heutigen Rügen bedeckte. Es lagerten sich große Mengen von Foraminiferen-Kalkschalen ab, welche über Jahrmillionen hinweg Mächtigkeiten von bis zu 400 m erreichten.

Das heutige Rügen ist erst durch die Gletscher der jüngsten Eiszeit entstanden. Die Gletscher formten bei ihrem Vorstoß über das damalige Festland End- und Grundmoränen, Gletscherzungen- und Toteisbecken, Sölle, Oser und Schmelzwasserrinnen. Obwohl die Ostsee zu dieser Zeit noch nicht existierte, wurde damit die Basis für das heutige Rügen geschaffen. Der schräge Verlauf der im Kreidekliff vorhandenen Feuersteinbänder belegt die Verkippung und Aufpressung der Kreideschollen durch die Gletscher der letzten Eiszeit.

Dort, wo durch das Eis besonders große Mengen des Geschiebemergels abgelagert wurden, war der Druck auf den Untergrund so groß, dass die Kreideschollen an nicht belasteten Gebieten nach oben gewölbt und verworfen wurden. Die letzte Eiszeit stauchte aus diesen Materialien die Inselkerne Rügens. Besonders stark aufgewölbt und mit viel Kreide durchsetzt wurde dabei der Inselkern Jasmund mit seinem nach Osten hin steil abfallenden Kreidekliffs. Die durch die Brandung entstandenen Steilufer unterliegen ständigen Küstenabtragungen, Uferausbrüchen und damit verbundenen Landversetzungen. Diese Küstenabbrüche werden durch anhaltende und extreme Niederschläge begünstigt. Eine weitere Ursache für Abbrüche sind sogenannte Frostsprengungen, welche vor allem im Frühjahr erfolgen. Durch die Abfolge von Auftau- und Gefrierprozessen wird das Gestein zusätzlich gelockert und verstärkt die Gefahren von Uferausbrüchen. Diese Prozesse bzw. ihre Früherkennung ist Gegenstand des hier vorgestellten methodischen Tests mit hochauflösenden Fernerkundungsdaten. Diese sehr skizzenhafte Darstellung der geologischen Entwicklung im Untersuchungsgebiet „Jasmund“ beruht auf Beschreibungen von [SCHERENEWSKI ET AL.] und [DUPHORN ET AL., 1995].

1.2 Beschreibung der Daten

Vor dem Einsetzen der Vegetationsperiode wurde am 16. April 2007 ein Teil des Nationalparks Jasmund mit dem luftgestützten Laserscanner Optech ALTM3100 dreidimensional erfasst. Das beflogene Gebiet hat eine Ausdehnung von etwa 9 km x 4,5 km und deckt eine Fläche von ca. 30 km² ab. Große Teile des Nationalparks sind mit einem dichten Buchenwald bedeckt, nur im Norden in der Nähe der Ortschaft Lohme überwiegt eine landwirtschaftliche Nutzung (vgl. Abb. 1). Am östlichen Rand der gleichnamigen Halbinsel befindet sich die 11 km lange Kreide-Steilküste, welche bei einer geringen räumlichen Ausdehnung Höhenunterschiede von bis zu 120 m aufweist. Während der Befliegung wurden das erste und das letzte Echo des ausgesandten Impulses sowie die Intensität des zurückkommenden Signals mit einer mittleren Auflösung von ca. 0,5 m erfasst. Die resultierende Punktwolke des Gebiets,

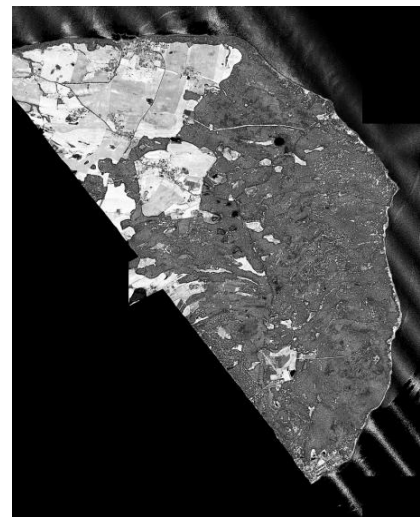


Abb. 1: Intensitätsbild des erfassten Gebietes

deren Intensitätswerte in Abb. 1 dargestellt sind, umfasst insgesamt 12.1 Millionen Punkte. Zusätzlich zur dreidimensionalen Erfassung mit dem Laserscanner wurden 300 Luftbilder mit einer Vexcel Imagine UltraCamD aufgenommen. Die vierkanaligen Bilder (RGB+NIR) haben jeweils eine Auflösung von 11500 x 7500 Pixeln. Bei einer durchschnittlichen Flughöhe von 1000 m über dem Gelände ergibt sich eine Bodenauflösung von etwa 8.9 cm pro Pixel (Ground Sample Distance).

2 Verfahren zur Detektion geomorphologischer Strukturen

In den folgenden Abschnitten wird die Methodik zur Detektion der geomorphologischen Strukturen vorgestellt. Das Verfahren basiert ausschließlich auf einer Analyse der Laserdaten, so dass die optischen Luftbilder nur für die unterstützende visuelle Interpretation der Ergebnisse (Abschnitt 3) verwendet werden. Mit der Filterung des digitalen Oberflächenmodells (DOM) und der anschließenden Merkmalsextraktion lässt sich die Vorgehensweise in zwei wesentliche Schritte einteilen.

2.1 Filterung des Oberflächenmodells

Die Punkte der gegebenen Laserdaten liegen zum Teil auf dem Gelände und zum Teil auf über dem Gelände befindlichen Objekten. Für die Analyse geomorphologischer Strukturen wird jedoch ausschließlich die Form des Geländes benötigt, so dass die Objektpunkte mittels einer geeigneten Filterung eliminiert werden müssen. Das Ziel des zum Einsatz kommenden Filteralgorithmus besteht in einer Klassifikation aller Laserpunkte in Gelände- und Nichtgeländepunkte, um aus den extrahierten Geländepunkten ein digitales Geländemodell (DGM) durch Interpolation eines Rasters $z(x,y)$ ableiten zu können. Das punktbasierte Verfahren betrachtet dabei nur die dreidimensionale Koordinate jedes Punktes, während der Intensitätswert und die Informationen über das erste oder letzte Echo unberücksichtigt bleiben.

Grundlegend für den Algorithmus ist die Annahme, dass das Gelände durch zusammenhängende Gebiete mit geringer lokaler Rauigkeit der Oberfläche repräsentiert wird. Außerdem wird davon ausgegangen, dass das Gelände lokal tiefer liegt als die Objekte und dass es zwischen Gelände und Objekten zu einem Höhengsprung kommt. Für jeden Laserpunkt wird ein Rauigkeitsmerkmal bestimmt, das aus einer Ebenenschätzung durch die k nächsten Nachbarn dieses Punktes hervorgeht. Liegen diese k Nachbarn in einer glatten Fläche, so wird der mittlere Gewichtseinheitsfehler s_0 dieser Ebenenschätzung sehr klein sein; er ist daher direkt als Rauigkeitsmerkmal des betrachteten Punktes interpretierbar. Nach Berechnung dieses Merkmals erfolgt eine Einteilung in „raue“ und „glatte“ Punkte durch Schwellwertbildung sowie unter Berücksichtigung eines maximal zulässigen Neigungswinkels der ausgleichenden Ebene. Anschließend werden durch Bereichswachstumsverfahren zusammenhängende Gebiete von „glatten“ Punkten gesucht. Die Zuordnung der "glatten" Punkte zu einem Segment erfolgt nur dann, wenn der Höhenunterschied zu den nächsten Punkten des Segments klein ist.

Neben dem eigentlichen Gelände werden auch Gebäudedächer und -wände als Segmente von "glatten" Punkten detektiert. Um in diesem Fall eine korrekte Trennung in Gelände- und Nichtgeländesegmente vornehmen zu können, werden die Segmente auf Basis des mittleren Abstands der Punkte des Segments von einem genäherten DGM klassifiziert: liegt dieser

unterhalb eines Schwellwerts, so wird das Segment als Geländesegment angesehen. Die Klassifikation erfolgt iterativ. Die erste Näherung für das DGM wird zu Beginn in einem Vorverarbeitungsschritt aus einem interpolierten DOM durch morphologisches Öffnen erstellt, wobei das Strukturelement groß genug sein muss, damit das größte Gebäude in der Szene eliminiert werden kann [ROTTENSTEINER, 2008]. Nach einem ersten Durchlauf des oben beschriebenen Klassifikationsalgorithmus kann aus den Punkten der als „Gelände“ klassifizierten Segmente ein verbessertes DGM interpoliert werden, das sich als Grundlage für einen weiteren Klassifizierungsschritt verwenden lässt. Durch diese iterative Vorgangsweise kann dem Problem begegnet werden, dass die erste Näherung für das DGM ggf. sehr grob ist. Die Iteration wird beendet, wenn kein neues Segment mehr als Geländesegment klassifiziert wird.

Da bei der Segmentierung und somit bei der Erstellung des genäherten DGM nur „glatte“ Punkte berücksichtigt werden, muss noch eine abschließende Klassifikation der Punkte in Gelände- und Nichtgelände-Punkte erfolgen, denn es können auch Bodenpunkte als „raue“ Punkte klassifiziert werden, wenn ihre Nachbarn sich nicht auf dem Boden befinden. Es wird daher auf Basis des genäherten DGM ein Toleranzband bestimmt und anschließend iterativ unter Verwendung aller Punkte innerhalb dieses Toleranzbandes das endgültige DGM durch robuste Interpolation [ROTTENSTEINER & BRIESE, 2002] bestimmt, wobei jedoch als Modell für die Interpolation nicht die lineare Prädiktion, sondern eine Interpolation mit gleitender Horizontalebene [KRAUS, 2000] verwendet wird.

Das für Jasmund abgeleitete Geländemodell hat eine Rasterauflösung von 0.5m. Eine manuelle Nachbearbeitung ist nicht erforderlich. Nachfolgend ist für das Gebiet um den Königsstuhl in Abb. 2 das Klassifikationsergebnis in Geländepunkte (grün) und Nichtgeländepunkte (rot) dargestellt. Es zeigt sich, dass sowohl die Bäume als auch das Gebäude korrekt als Nichtgeländepunkte detektiert werden. Das resultierende Geländemodell ist in Abb. 3 zu sehen.

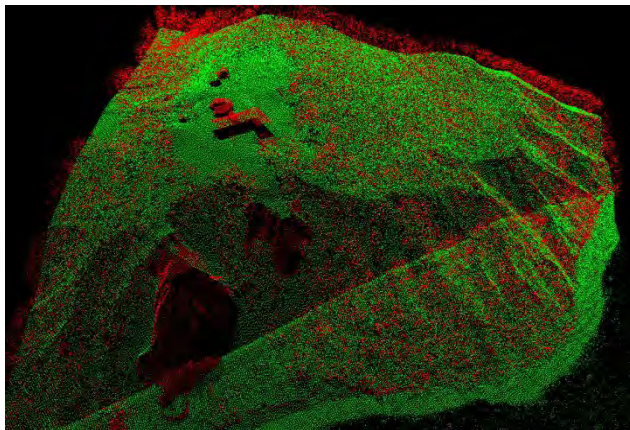


Abb. 2: Klassifizierte Punkte in Gelände- (grün) und Nichtgeländepunkte (rot) beim Königsstuhl

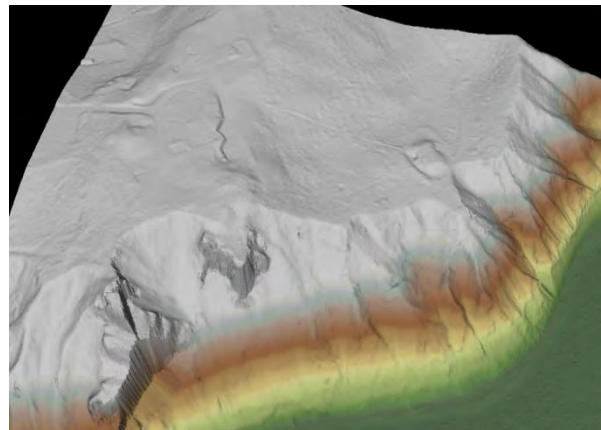


Abb. 3: finales Geländemodell des Königsstuhls

2.2 Geländekantenextraktion

Geomorphologische Strukturen sind charakteristische, im Gelände auftretende Formen wie etwa (Bruch-) Kanten oder abrupte Höhenänderungen [KRAUS, 2000]. Sie lassen sich über eine Analyse der Krümmungen des Geländemodells detektieren, welches somit die Datengrundlage für deren Extraktion darstellt. Dabei liegt das DGM in einem Raster der Form $z(x,y)$ vor.

Das in diesem Abschnitt beschriebene Verfahren basiert weitestgehend auf der in [FÖRSTNER, 1991] vorgestellten polymorphen Merkmalsextraktion, die wie in [ROTTENSTEINER, 2008] gezeigt auf die ersten Ableitungen eines DOM bzw. in diesem Fall des DGM angewandt wird. Zunächst werden anhand der ersten Ableitungen der Geländeoberflächengradienten (und somit anhand der zweiten Ableitungen des DGM) alle Rasterpunkte in homogene und nichthomogene Punkte klassifiziert. Dazu wird die in Gleichung (1) dargestellte Matrix \mathbf{N} für die lokale Nachbarschaft jedes Rasterpunktes aufgestellt. Zur Unterdrückung von Rauscheffekten werden die Ableitungen mit einem Tiefpassfilter \mathbf{L} geglättet.

$$\mathbf{N} = \mathbf{L} * \begin{pmatrix} \left(\frac{\partial^2 z}{\partial x^2}\right)^2 \cdot \left(\frac{\partial^2 z}{\partial y \partial x}\right)^2 & \left(\frac{\partial^2 z}{\partial x^2}\right) \cdot \left(\frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y}\right) + \left(\frac{\partial^2 z}{\partial y^2}\right) \cdot \left(\frac{\partial^2 z}{\partial y \partial x}\right) \\ \left(\frac{\partial^2 z}{\partial x^2}\right) \cdot \left(\frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y}\right) + \left(\frac{\partial^2 z}{\partial y^2}\right) \cdot \left(\frac{\partial^2 z}{\partial y \partial x}\right) & \left(\frac{\partial^2 z}{\partial y^2}\right)^2 \cdot \left(\frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y}\right)^2 \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$R = \text{spur}(\mathbf{N}) \quad (2) \quad D = 1 - \left(\frac{\lambda_1 - \lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2}\right)^2 = \frac{4 \cdot \det(\mathbf{N})}{\text{spur}^2(\mathbf{N})} \quad (3)$$

Mit den Gleichungen (2) und (3) lassen sich aus der Matrix \mathbf{N} Texturparameter für jeden Punkt des Höhenmodells ableiten. Dabei sind λ_1 und λ_2 die Eigenwerte von \mathbf{N}^{-1} . Die Größe R entspricht der geglätteten Quadratsumme der zweiten Ableitung des DGM an der Position (x,y) , sie wird hier als Maß für die Krümmung des Geländes genutzt. Mit Hilfe eines Schwellwertes R_{thr} können Pixel als „homogen“ oder „nicht homogen“ klassifiziert werden. An Geländekanten ändern sich die Geländeneigungen, weshalb die Quadratsumme der zweiten Ableitungen und somit R groß wird; als Kandidaten für Kantenpunkte kommen nur noch die nicht homogenen Pixel in Frage. Von großer Bedeutung ist die Wahl der Schwellwertes R_{thr} , da R in Abhängigkeit der Krümmungsverhältnisse des vorliegenden Geländes sowie der Stärke der Glättung deutlich differierende Werte annehmen kann. Wie in [FÖRSTNER, 1991] beschrieben, kann dieser Schwellwert aus der Gesamtverteilung aller R abgeleitet werden, indem der Median mit einem konstanten, vom Benutzer vorgegebenen Faktor j multipliziert wird. Im konkreten Beispiel wird zur Festlegung des Schwellwertes R_{thr} der Faktor $j=1$ gesetzt, um auch weniger starke Kanten extrahieren zu können, d.h. $R_{\text{thr}} = \text{Median}(R)$.

Der mittels Gleichung (3) berechnete Parameter D ist ein Maß für die "Rundheit" der lokalen Textur mit dem Wertebereich $[0;1]$ und beschreibt das Verhältnis der beiden Eigenwerte der Matrix \mathbf{N}^{-1} . Sind diese gleich groß, so liegt keine dominante Richtung für die Änderung der Gradienten des DGM vor und die Rundheit D beträgt eins. Punkte länglicher Strukturen wie Kanten hingegen haben eine geringe Rundheit mit Werten kleiner als 0.5, da sich die beiden Eigenwerte deutlich voneinander unterscheiden. Es werden daher im Binärbild der "nicht

homogenen" Pixel alle Pixel mit $D > 0.5$ eliminiert. In dem so erhaltenen Binärbild der Kantenkandidaten erfolgt nun eine subpixelgenaue Nicht-Maxima-Unterdrückung, um lediglich die Punkte mit maximalem R senkrecht zur Kantenorientierung, welche sich aus der Richtung des zum größeren Eigenwert von N^{-1} gehörenden Eigenvektors ergibt, zu detektieren. Im abschließenden Schritt werden diese durch einen Kantenverfolgungsalgorithmus zu Polygonen zusammengefasst, wobei eine Generalisierung mit dem Douglas-Peucker-Algorithmus [DOUGLAS & PEUCKER, 1973] möglich ist.

3 Ergebnisse

Bei der Merkmalsextraktion wurden die Schwellwerte sehr niedrig eingestellt, so dass auch schwache Kanten detektiert werden. Dies hat allerdings den Nachteil, dass dadurch die False-Positive-Rate deutlich steigt. Dennoch werden bei der 2D-Betrachtung aller Kanten in einem Übersichtsmaßstab viele geologisch-relevante Strukturen sichtbar.

Im Rahmen dieses Beitrags werden drei kleinere Testgebiete entlang der Steilküste hinsichtlich des Nutzens der extrahierten Geländekanten untersucht. Dazu erfolgt eine visuelle Interpretation des dreidimensionalen Geländemodells mit überlagerten Orthofotos der jeweiligen Szene. Weiterhin werden die als Vektordaten gespeicherten extrahierten Kantenstrukturen rot dargestellt. Auffällige Kanten von im Text erläuterten Strukturen sind zur besseren Veranschaulichung gelb markiert.

3.1.1 Nördliches Saßnitz

Im Norden von Saßnitz zwischen den geographischen Punkten "Komplex I-1" und "Streifen 1" befindet sich eine kleine, aus sechs Häusern bestehende Siedlung in unmittelbarer Nähe zu einem potentiell rutschungsgefährdeten Gebiet.

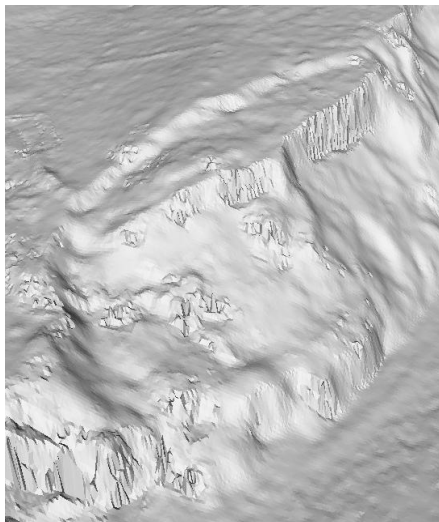


Abb. 4: Geländestufe im Geländemodell



Abb. 5: extrahierte Kanten (rot, Geländestufe gelb) im Norden von Saßnitz.

Es handelt sich um eine 70 m lange und bis zu 20 m breite Stufe, welche sich bereits um etwa 2 m von der ursprünglichen Höhe gesenkt hat. In Abb. 4 ist deutlich zu sehen, dass die obere Bruchkante halbkreisförmig die Geländestufe abtrennt. Die diese Bruchkante beschreibenden extrahierten Kanten sind in Abb. 5 gelb dargestellt, alle anderen rot. In der linken unteren Ecke sind die Gebäude zu erkennen. Der auffällige Verlauf der geomorphologischen Struktur deutet auf eine Zerklüftung der Kreidesedimente an dieser Stelle hin und kann als Hinweis auf weitere bevorstehende Rutschungen ausgelegt werden. Ein Vergleich mit dem Geogefahrenkataster des LUNG bestätigt, dass es sich hier um ein potenzielles Rutschungsgebiet handelt.

3.1.2 Kieler Bach

Etwa 50 bis 150 m südlich der Mündung des Kieler Baches in die Ostsee ereignete sich an der Steilküste am 28.06.2007 ein Kreideabbruch "mittlerer Größe". Da dieser Zeitpunkt nach der Befliegung im April 2007 stattfand, lässt sich anhand der vorliegenden Laserdaten und Bilder eine Beurteilung der vor dem Abbruch extrahierten Geländekanten durchführen.



Abb. 6: Kieler Bach - einzelner, horizontal über das Kliff ragender Baum vor dem Hangabbruch



Abb. 7: Aufnahme nach der Rutschung [Foto: Tiepolt]

In Abb. 6 ist eine Aufsicht auf die Steilküste dargestellt. Es lässt sich erkennen, dass ein Baum in der Bildmitte (grün markiert) nahezu horizontal über das Kliff ragt. Dieser Baum ist mit ca. 5000 m³ Kreideabbruch mehr als 50 m in die Tiefe gestürzt. Das rechte Bild zeigt die Situation im Oktober 2007 nach der Hangrutschung. Deutlich ist hier der heruntergefallene Baum (grüner Pfeil) rechts neben dem Schuttfächer aus abgerutschtem Kreidematerial (blauer Pfeil) zu sehen. Eine Untersuchung der in Abb. 8 dargestellten Kantenstrukturen vor dem Abbruch zeigt, dass sich der Baum (grüner Kreis) am Ende einer senkrecht zur Küste verlaufenden Struktur befand, welche durch parallele Kanten zu erkennen ist (blauer Pfeil). Dabei handelt es sich um einen kleinen Einschnitt ins Gelände, der als Hinweis auf die Existenz einer linearen Schwächezone dienen könnte. In Abb. 9 ist dieser Einschnitt in einer Profilsansicht dargestellt. Da sich das Gelände zum Tal des Kieler Baches hin senkt, fehlt aus dieser Richtung der Halt und es könnte zu einer Auflockerung und Bewegung des Blockes gekommen sein, an dessen oberen Rand sich

der Baum befand. Seine horizontale Lage über das Kliff deutet zusätzlich auf vorherige Erosionsprozesse hin. Eine in-situ Verifikation einer solchen Interpretation ist noch erforderlich. Eine weitere küstenparallele Struktur umschließt einen kleinen Küstenabschnitt halbkreisförmig (blaue Pfeile, Abb. 10) und trifft in der Nähe der Baumposition vor dem Abbruch auf den senkrecht zur Küste verlaufenden, zuvor beschriebenen Einschnitt. Dies kann ebenfalls auf ein potentiell abbruchgefährdetes Areal hinweisen.

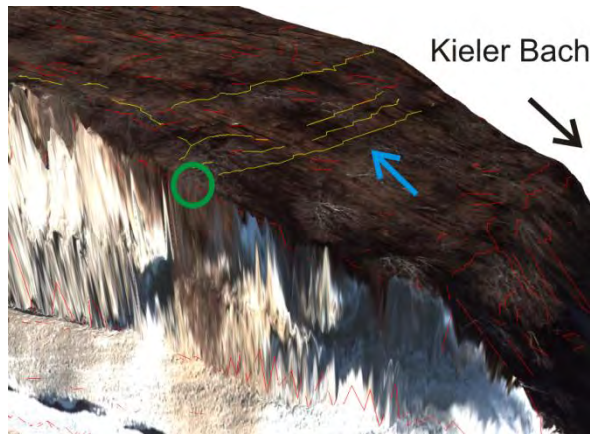


Abb. 8: 3D-Ansicht mit extrahierten Kanten (vor Abbruch)

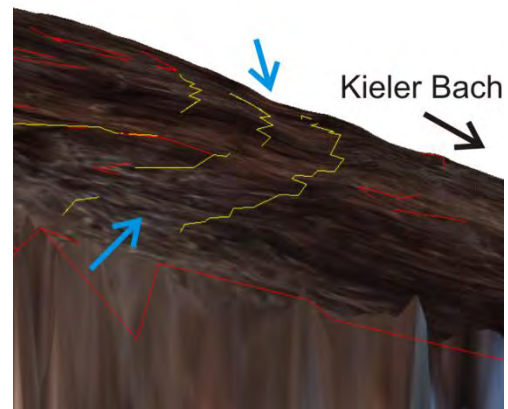


Abb. 9: Profilansicht des senkrecht zur Küste verlaufenden Einschnitts (vor Abbruch)

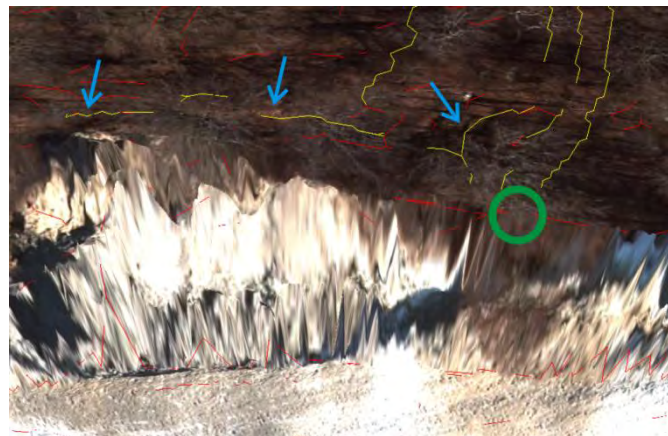


Abb. 10: Küstenparallele Kanten (vor Abbruch)

3.1.3 Burgwall "Sattel auf dem Hengst"

Südlich der Mündung des Lenzer Baches zwischen den geografischen Punkten "Streifen 2" und "Hengst" befindet sich eine wallförmige Struktur mit einem Durchmesser von ca. 15 m, die in Nord-Süd-Richtung halbkreisförmig eine 100 m lange und bis zu 50 m breite Geländestufe vom Hinterland abtrennt (Abb. 11). Das Höhenniveau des umgrenzten Gebietes ist um 5 m höher als das des Hinterlandes, so dass die Höhe des Walls seeseitig 1 m und landeinwärts 6 m beträgt.

Diese Struktur repräsentiert einen Teil einer ehemaligen Burgwallanlage aus vorslawischer Zeit, welche als "Sattel auf dem Hengst" bezeichnet wird. Die seeseitigen Teile der ehemaligen Burginnenfläche sind bereits durch die Erosionsprozesse an der Kreideküste abgebrochen. Die extrahierten Kanten (Abb. 12, gelb markierte Kanten) beschreiben in diesem Fall eine frühgeschichtliche, von Menschen geschaffene Struktur. Die insbesondere in Abb. 12 sichtbaren linienartigen Spuren sind vermutlich ehemalige Wege. Inwieweit hier abbruchgefährdete Bereiche existieren, muss durch weiterführende Auswertungen geklärt werden.

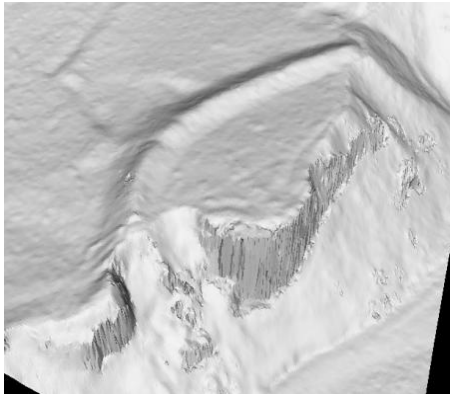


Abb. 11: Burgwall "Sattel auf dem Hengst" im Geländemodell

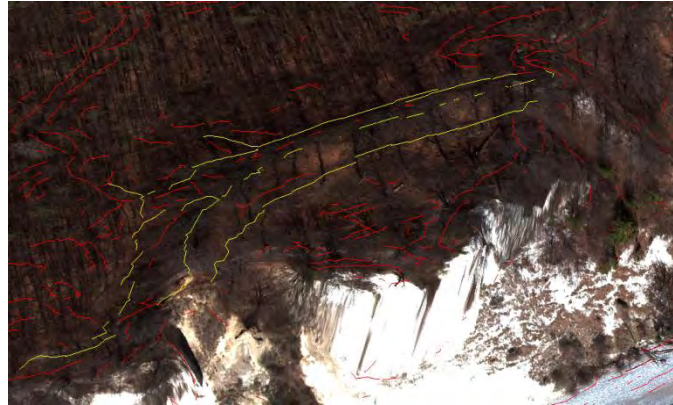


Abb. 12: Burgwall " Sattel auf dem Hengst" mit Kantenstrukturen und überlagertem Orthofoto

4 Zusammenfassung und Ausblick

Die Zielsetzung dieses Beitrags besteht darin, geomorphologische Strukturen wie Bruchkanten oder abrupte Neigungsänderungen aus Laserscandaten der Insel Rügen zu extrahieren, welche Indizien für potentielle Hangrutschungsareale an der Steilküste sein können. Bei der Filterung des Oberflächenmodells wird unter Zuhilfenahme der Punktrauigkeit ein digitales Modell des Geländes erstellt, welches die Datengrundlage für die Extraktion der geomorphologischen Strukturen in Form von Geländekanten darstellt. Die Auswertung zeigt, dass die gefundenen Merkmale die konventionelle Kartierung der Ingenieurgeologen deutlich unterstützen können, da sie wichtige Strukturen sichtbar machen. Vor allem küstenparallele, halbkreisförmige oder senkrecht zum Kliff extrahierte Kanten, welche Einschnitte, Stufen oder Wälle im Gelände repräsentieren, sind dabei von besonderer Bedeutung, da sie Hinweise auf lineare Schwächezonen oder Zerklüftungen liefern können. Auf diese Weise lassen sich potentielle Gefahrenggebiete schneller lokalisieren. Für deren weitere Interpretation erwies sich eine dreidimensionale Visualisierung des Geländes bei Überlagerung mit den Orthofotos und den extrahierten Geländekanten als besonders effizient. Die hier präsentierten Ergebnisse haben vorläufigen Charakter, da eine abschließende Verifizierung im Gelände noch aussteht.

5 Danksagung

Herrn Dr. Lars Tiepolt vom Staatlichen Amt für Umwelt und Natur (StAUN) Mecklenburg-Vorpommern möchten wir herzlich für die Luftbilder danken. Weiterhin gilt unser Dank Herrn Dr. Karsten Schütze vom Geologischen Dienst des Landesamtes für Umwelt, Naturschutz und Geologie (LUNG) Mecklenburg-Vorpommern für die Bereitstellung des Geogefahrenkatasters, sowie Herrn Dipl.-Ing. Martin Wiedeking für die tatkräftige Unterstützung bei der Verarbeitung der Daten.

6 Literaturverzeichnis

DUPHORN, K.; KLIEWE, H.; NIEDERMEYER, R.-O.; JANKE, W.; WERNER, F., 1995: Die deutsche Ostseeküste, Sammlung geologischer Führer, Stuttgart, Gebr. Bornträger.

DOUGLAS, D. & PEUCKER, D., 1973: Algorithms for the reduction of the number of points required to represent a digitized line or its caricature, *The Canadian Cartographer* 10, S.112-122.

FÖRSTNER, W., 1991: Statistische Verfahren für die automatische Bildanalyse und ihre Bewertung bei der Objekterkennung und –Vermessung. Habilitationsschrift, Deutsche Geodätische Kommission DGK C-370, München.

KRAUS, K., 2000: Photogrammetrie Band 3. Topographische Informationssysteme. Dümmler Verlag, Köln, 1. Auflage.

ROTTENSTEINER, F., 2008: Automatic Extraction of buildings from airborne laserscanner data and aerial images, Habilitationsschrift, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, Technische Universität Wien, In: *Geowissenschaftliche Mitteilungen* 83, 128 S.

ROTTENSTEINER, F. & BRIESE, C., 2002: A new method for building extraction in urban areas from high-resolution LIDAR data, *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXIV-3A, S. 295-301.

SCHERNEWSKI, G.; BOCK, S.; STERR, H: Küste, Meer und Integriertes Küstenzonenmanagement (IKZM), <http://www.ikzm-d.de> (Informations-, Lern-, und Lehrmodule), Christian-Albrechts-Universität zu Kiel (Stand 4.6.2010).

A Framework for the Data-Driven Analysis, Interpretation, and Transformation of Geospatial Information Models

ANDREAS KRÜGER¹ & THOMAS H. KOLBE²

Zusammenfassung: In Geographischen Informationssystemen spielen Analyse-, Interpretations- und Transformationsprozesse eine zentrale Rolle. In den letzten Jahren wurden räumliche Informationsmodelle wie virtuelle 3D-Stadtmodelle und Katastermodelle, z.B. CityGML, GeoSciML, ALKIS, UK OS MasterMap, etc., verstärkt auf Basis des General Feature Model der ISO191xx Standard-Reihe spezifiziert. Innerhalb dieses Rahmens können Transformationsprozesse auf standardisierten Strukturen mit wohldefinierter Semantik ausgeführt werden. Objektorientierte Modellierungskonzepte erlauben die Spezifikation komplexer Strukturen mit Aggregations- und Generalisierungs-/Spezialisierungshierarchien. Analyse-, Interpretations- und Transformationsoperationen auf räumlichen Datensätzen müssen daher mit der Komplexität dieser Strukturen umgehen können.

In diesem Beitrag wird ein Rahmenwerk entwickelt, welches ein datengetriebenes Transformationssystem auf komplexen Objektstrukturen – repräsentiert als attributierte getypte Graphen – zur Verfügung stellt. Die Verarbeitung dieser Graphstrukturen wird mithilfe von Graphersetzungen realisiert. Es wird eine Transformationssprache vorgeschlagen, die auf der Notation von Geoobjekten und deren räumlichen Bestandteilen arbeitet. Dieses Konzept erlaubt die Erkennung komplexer Konfigurationen räumlicher Geoobjekte durch die Anwendung von Subgraph-Isomorphismen. Des Weiteren wird die Abbildung von Transformationsprogrammen für ein spezifisches Graphersetzungssystem, AGG, sowie eine prototypische Umsetzung beschrieben. Das vorgestellte Konzept ist insbesondere nützlich für Erkennungs-, Interpretations- und Generalisierungsprozesse. Letzteres wird anhand eines Beispiels der Generalisierung von Flurstücken veranschaulicht.

Abstract: In geographic information systems, analysis, interpretation, and transformation of spatial datasets play a central role. In recent years geospatial information models like virtual 3D city models or cadastre models like CityGML, GeoSciML, German cadastre ALKIS, UK OS MasterMap, etc., are increasingly specified on the base of the General Feature Model of the ISO 191xx standard series. Within that framework, transformations on standardized structures with well-defined semantics for geobjects can be executed. Object-oriented modeling concepts allow for the specification of complex structures with aggregation and generalization / specialization hierarchies. Thus, the analysis, interpretation, and transformation of spatial datasets have to cope with this complexity.

Within this paper, we propose a framework which realizes a data-driven transformation system on complex object structures represented by attributed typed graphs, which can be processed using graph transformation. A transformation language is proposed referring to the notion of geobjects and their spatial entities. It allows recognizing complex configurations of spatial objects by using subgraph isomorphism. Furthermore the mapping of transformation programs to graph transformation rules for a specific graph transformation system, AGG, and a prototypical implementation is explained. The proposed concept is especially useful for recognition, interpretation, and generalization tasks. The latter is demonstrated for an example on land parcel generalization.

- 1) Andreas Krüger, Technische Universität Berlin, Institute for Geodesy and Geoinformation Science, Strasse des 17. Juni 135, 10623 Berlin, Germany, E-Mail: krueger@igg.tu-berlin.de
- 2) Thomas H. Kolbe, Technische Universität Berlin, Institute for Geodesy and Geoinformation Science, Strasse des 17. Juni 135, 10623 Berlin, Germany, E-Mail: kolbe@igg.tu-berlin.de

1 Introduction

In geographic information systems, the analysis, interpretation, and transformation of spatial datasets play a central role. Since geospatial information models, like virtual 3D city models and cadastre models are defined more and more in a feature-based way according to the General Feature Model of the ISO 191xx standard series, transformation processes on standardized structures with well-defined semantics for geobjects can be defined.

Transformations which affect several related geobjects with topological and geometric relations require a processing of complex object structures including their relationships. Often transformations should only be applied for specific configurations of geobjects. For example, in a generalization task land parcels should only be aggregated, if they have less than a predefined maximum area, have the same landuse type, and their geometries are adjacent. This requires specifying transformation conditions which have to take different geobjects and geometry objects together with their relations into account. Also the recognition and interpretation of geobjects requires matching of (sometimes complex) template structures with a given dataset.

The objects together with their interrelationships can be described by an attributed graph. Nodes and edges are typed according to the corresponding classes of the geobjects or relations. Graph transformation is a practical concept for processing modifications on graphs, but is generally not tailored to express transformations on geospatial datasets. In order to allow for an intuitive specification of transformations, a proper language should take into account the notion of geobjects and their spatial characteristics and relationships. In this paper, we will propose such a transformation approach, where we use graph transformation concepts and suggest a transformation language that is tailored to geobjects.

The rest of the paper is organized as follows: Section 2 discusses geospatial data modeling according to the ISO 191xx standards family. We then show how geodata that is exchanged using the Geography Markup Language (GML) can be mapped to an attributed, typed graph structure and explain general requirements on the transformation of feature-based datasets. Section 3 provides some background on graph transformation and reviews the concepts and capabilities of AGG, the graph transformation tool that is employed subsequently. In section 4 we present a rule-based language for the specification of transformations of geographic features and its translation into the AGG framework, while section 5 briefly describes our prototypical implementation. The example given in section 6 shall demonstrate the principle and potential of our concept. In section 7 we draw the conclusions and give an outlook.

2 Feature-Based Modeling and Transformation

GML and data models conforming to the ISO 191xx standard family can be handled as typed attributed graph structures in the transformation processes. The following subsections give a short introduction to the structure of these data models and the mapping to a graph structure.

2.1 Modeling Standards

More and more geospatial information models are designed according to the *General Feature Model*, *Spatial Schema*, and *Temporal Schema* of the ISO 191xx standards. The *General Feature*

Model describes how real world objects and phenomena can be abstracted and represented by *geographic features* which may have an arbitrary number of spatial and non-spatial properties (ISO 19109:2005). Features are objects belonging to a class, which can have spatial, temporal, thematic, locational, metadata, or quality attributes. Object-oriented modeling concepts allow for the specification of complex structures with aggregation and generalization/specialization hierarchies. Furthermore, arbitrary associations between feature classes are allowed. Thereby, complex geospatial information models or ontologies can be created and formally specified.

For example, *CityGML* is an OGC standard for the representation of virtual 3D city models; *GeoSciML* is a standard for geoscientific information; *ALKIS/ATKIS/AFIS* are the German national standards for cadastre and topography; and *OS MasterMap* is Great Britain's national cadastre model standard. All these standards differ from each other in such respect that they specify their own (complex) feature types and interrelationships with well-defined feature semantics. But they have in common the way how the geobjects are defined, namely as being defined as subclasses from the predefined classes given in ISO 19109, 19107, 19108, and others.

With the *Geography Markup Language* (GML, ISO 19136; see OGC 07-036, LAKE ET AL. 2004) all these standards share the same exchange format. GML is an approved standard issued by the Open Geospatial Consortium (OGC). Due to its conformance to ISO191xx and the General Feature Model we can assume a well-defined structure and semantics of GML-based datasets.

2.2 GML and Graph Structure

The structure constituted by the General Feature Model suggests handling GML datasets as typed attributed graphs (see EHRIG ET AL. 2006 and ERMEL ET AL. 2006). An approach for representing CityGML – a GML application schema – as typed graphs (TGraphs) can be found in (FALKOWSKI & EBERT 2009). However, they do not address the topic of a transformation language. If we interpret GML features as nodes and GML properties and relations as edges, we would get a tree structure between parent and child features connected by properties. Since properties can be realized “by value” or “by reference” (*XLink*), a child can be related to several parent features – it is a graph instead. As an example we can describe a situation, where two features, e.g. a *LandUse* and a *Road* object, refer to the same geometry object. In that case two paths, starting from a shared parent node, will lead to the same geometry node. We may have a cyclic graph, since a feature can be transitively related to itself by reference to features which reference back. Also, the graph is directed. Undirected associations are usually mapped in GML to two directed associations. Complex properties can be realized as additional nodes connected by an object property relation. Atomic properties and attributes can be stored as node or edge attributes. Node types for features and complex properties and edge types for object property relations can be derived from the object-oriented type structure in the XML schema of a GML format. As result, we get a typed attributed graph structure.

In transformation, analysis, and interpretation processes, often more than one GML dataset must be handled. These datasets can be modeled according to different application schemas. We can integrate such models into one graph by insertion of additional topological, geographical, or semantical relations between features. Thus, complex graph structures can occur. In our prototypical implementation (see section 5) we choose the following graph structure:

- Generally, objects (data items which have an object identifier, like features) and complex properties will be stored in nodes with appropriate node types. The following base types are distinguished in GML: *Feature*, *Geometry*, *CoordinateReferenceSystem*, *Envelope*, *TimeObject*, and *Topology*. The types can be determined from XML schema type inheritance. Objects which cannot be assigned to the given types get the node type *AnyObject*.
- Edge types will be given by the kind of relationship, e.g. *ObjectProperty*, *TopologicalRelation*, etc.
- Atomic properties and scalar-valued attributes will be stored as node and edge attributes – the attribution of the graph.

We store a GML geometry structure and its child objects in one single node with type *Geometry*. Within this node we hold geometry as Java objects as defined in the *GeoTools* project API (see *GeoTools-Home*). The *GeoTools* geometry is based on the *GeoAPI* – an official OGC project capturing several OGC standards as Java interfaces (see *GeoAPI*). Thus, we have Java geometry objects, on which geometrical and topological operations built into *GeoTools* can be processed.

2.3 Transformation of Feature-based Datasets

While processing feature-based datasets, we can identify a set of integration, fusion, and transformation cases. A system which provides transformations on feature-based datasets must be able, to handle these cases:

- Analysis of datasets needs enrichment by new properties, attributes, and objects which express analysis results.
- Integration needs join-operations of different feature-based datasets, which provides integration of non-existing objects into another dataset, adjustment calculation on spatially inconsistent objects, and merging of identical objects with adjustment of attributes and properties. A transformation system has to consider topological and geometrical relations.
- Transformation processes have to change objects or complex object structures to other objects or object structures.
- In the conversion of datasets objects can be merged, subdivided or transformed to complex object structures, e.g. if we convert a dataset to another with higher a level of detail.
- Several algorithms need an iterative application of transformations until a given condition is fulfilled, e.g. some generalization approaches.

These examples reveal that processing of feature-based datasets needs to handle simple as well as very complex object structures. By using attributed graph transformation, we can realize a data-driven transformation system on complex object structures presented by graphs.

3 Attributed Graph Transformation

Actually there exist a range of development environments for graph transformation systems, for example, *GReAT* (BALASUBRAMANIAN ET AL. 2006), *PROGRES* (RANGER & WEINELL, 2008 and SCHÜRR ET AL. 1999), and *AGG* (see THE <AGG> HOMEPAGE). These environments differ in notation, underlying paradigms, the implementation language and graph representation. A decision for the used environment depends on the requirements. The *AGG* engine is the best fitting system to our requirements, because we need in our project a platform-independent system for

execution within a Grid Computing environment (see section 5). With AGG we can realize the graph structure explained in section 2.2. AGG is a still supported Open Source development, and it provides a rich set of concepts for typed, attributed graph transformation.

3.1 Attributed Graph Transformation in General

A Graph Transformation is the rule-based modification of graphs. A transformation has the following effects (EHRIG ET AL. 2006):

- The transformation is complete, i.e. all specified changes will be carried out.
- The transformation is minimal, i.e. only the specified changes will be realized.
- The transformation is local, i.e. the changes are affected only to the subgraph of a match.

A rule $p: L \rightarrow R$ consists of a left-hand side (LHS) and a right-hand side (RHS) graph. The LHS graph is a pattern which can match the given host graph. If there is a match with fulfilled application conditions a rule is applicable. Then, in the host graph the LHS will be replaced by the RHS using subgraph isomorphism (MELAMED 1998).

Within graph transformation approaches, nodes and edges can have labels. These labels can or cannot be modifiable. Non-modifiable labels are node and edge types. Modifiable labels used for storing values in nodes and edges are called attributes. In attributed graphs nodes and edges are labeled by a set of attributes. The rule can modify the attributes of nodes and edges of the affected subgraph (EHRIG ET AL. 2006 and MELAMED 1998).

3.2 Attributed Graph Grammar System (AGG)

“AGG is a development environment for attributed graph transformation systems supporting an algebraic approach to graph transformation” (THE <AGG> HOMEPAGE). AGG was developed at the Technische Universität Berlin, Department of Software Engineering and Theoretical Computer Science. The next sections will give an overview about AGG.

3.2.1 The AGG Graph Structure

An AGG graph is a typed attributed graph. The main graph objects in such a graph are nodes and directed edges between two nodes. AGG allows multiple edges between the same pair of nodes. Nodes and edges have an identity of their own. All graph objects are associated with exactly one label, also called type, of a given label (type) set. Attributes of graph objects will be declared by a name and a type. Any value of this type can be assigned to that attribute. Types in AGG can be any valid Java type, i.e. a simple type or a Java class (EHRIG ET AL. 2006 & ERMEL ET AL. 2006).

3.2.2 AGG Graph Transformation Concepts

AGG offers a range of features for the development and application of graph transformations. AGG is platform independent written in Java. It provides a graph transformation engine which can be embedded in Java applications. Transformation rules can be defined and validated, including creation of typed attributed graphs, type graphs with node type inheritance, attribution of graphs by Java objects, types and classes, conditions like Negative / Positive Application Conditions (NAC / PAC), and boolean Java expressions as attribute conditions, attribution of rules by Java expressions, definition of constraints as global graph consistency conditions, and scheduling of rule application by defining layers of rules (AGG-TEAM).

AGG provides the single-pushout approach. There, a rule will be defined by construction of an attributed LHS graph and an attributed RHS graph. Between both sides partial graph morphism: $LHS \rightarrow RHS$ exists. The LHS may contain attributes and constant values. A RHS can additionally contain Java expressions for calculating attribute values. During the rule application, each match of the LHS in a given host graph will be replaced by the RHS. Nodes and edges in LHS with no mapping in RHS will be removed from the host graph. New nodes and edges in RHS will be created. Dangling edges will be removed after a transformation. Attribute expressions on the RHS will be evaluated and calculated. If there is no match, a rule is not applicable. If the host graph contains multiple matches, one will be chosen indeterministically (EHRIG ET AL. 2006 & ERMEL ET AL. 2006). A rule application terminates if no match can be found anymore.

AGG supports the definition of rule layers, which specify an ascending order on a set of rules. Within a layer rules will be applied in an arbitrary order as long as a match can be found. The layer terminates if no containing rule is applicable anymore. A loop over layers can be enabled. In that case the layer sequence will be repeatedly applied, until no layer is applicable anymore. A rule designer has to pay attention to the termination of layers and loop over layers.

A rule is only applicable if the LHS can produce a match. For additional limitation of rule applicability, AGG provides the following instruments to specify conditions (EHRIG ET AL. 2006):

- A set of Negative Application Conditions (NAC) and Positive Application Conditions (PAC) can be added to the rule. If a NAC is satisfied, the rule is not applicable. For given PACs a rule is only applicable if all PACs are fulfilled.
- Attribute conditions are Java expressions with boolean result. By evaluating them, the condition is decided to be satisfied or not.

A developed graph transformation system with AGG can be analyzed by critical pair analysis, consistency checking and termination criteria. The detailed concepts for analyzing a transformation system in AGG can be found in (EHRIG ET AL. 2006) and (AGG-TEAM).

4 Transformation Language

Integration, analysis and transformation problems can be manifold. Thus, it is impractical to hardcode transformation rules. We need a flexible system instead for implementing rules on the basis of a transformation language.

Since we develop a transformation system for GML based, ISO 191xx family conforming models we should assume, that a user of this system is familiar with GIS modelling, but not with graph transformation. So, the transformation language must be a compromise between the power of graph transformation concepts and GIS requirements on transformations in integration, analysis, and transformation cases. The language has to provide the underlying graph transformation concepts but to abstract from them by using structures and addressing of the ISO 191xx family. We need to work with GML object/property structures; not with node/edge structures of graphs. Nevertheless the language must reflect the concepts of graph transformation within AGG. The matching between the transformation language and AGG should be done by an interpreter.

The language concepts of AGG are completely declarative. However, we believe that the formulation of sequential transformation steps provides a more intuitive way to specify transformation actions. Thus, we decided to develop a combined declarative and imperative language

concept. Rules in the transformation language follow the *Event-Condition-Action* (ECA) paradigm – a concept from event-driven architectures and active database systems (GARCIA-MOLINA ET AL. 2002). In our case, *events* are occurrences of a rule's object structure in a given dataset, *conditions* are preconditions of the rule and constraints, and *actions* are the transformation steps expressed as rule actions. We formulate object structures and conditions in a declarative way; transformation steps called actions will be expressed imperatively. The declarative part specifies object configurations on which the corresponding rules should be applied. The transformation language must be able to handle single objects and complex object structures with object property relations, topological and geometrical relations. Therefore, the transformation language works with object structure declarations instead of single geobjects. A successful identification of the declared object structure (subgraph) within the graph in its current state and the conjoint satisfaction of the condition imply the application of all transformation steps of the rule.

In the following subsections we will describe the structure of a transformation language for the processing, analysis, and integration of ISO191xx family conforming datasets. The given concepts can be mapped onto a concrete language syntax, e.g. in XML format. Since the graph structure is equivalent to the general feature model structure, we can assume that rules expressed on GML objects or object structures are applicable as graph transformation rules on a graph derived from GML datasets and their application schemas.

4.1 Language Structure

The transformation language describes a transformation of GML conforming data models whose instances are represented by a graph. Since we address concrete GML objects or properties with their attributes we have to reference these elements by fully qualified GML names. Thus, firstly we need a declaration of XML/GML namespaces. A transformation program consists of:

- The first part comprises a set of constraints with respect to the GML conforming data model(s). These are general conditions independent of concrete transformation rules which must be fulfilled before and after a rule application.
- The second part will declare at least one transformation rule with its source structure, conditions and processing actions concerning the source structure.
- The last part defines processing instructions for rule application with respect to layers of rules and sequential rule application.

This structure follows the schema of AGG graph transformation programs (c.f. EHRIG ET AL. 2006 and ERMEL ET AL. 2006):

```
transformation [<constraints>] <rules> <rule application>
```

The three parts will be described in the following subsections.

4.1.1 Constraints

The transformation language handles complex object/property structures. Thus, also general constraints for a data model must be able to address such structures. Constraints should provide the same logical operators like rule conditions, with ability to define FORALL and EXISTS conditions on object structures, introduced below. For constraints we propose the following notation:

```
constraint <condition>
```

The following example expresses the general requirement that all Building features in the dataset must have a measured height of greater than 0 meters:

```
constraint forall (∃ Feature citygml:Building b1,
                  ∃ Variable v1 value $b1/measuredHeight) condition v1>0
```

4.1.2 Rule Definitions

A rule definition has the following structure consisting of four parts:

```
rule <name> <object structure> [<conditions>] <actions>
```

First, a rule needs a name for referencing. Then, two declarative parts of the rule will be given, an object structure, which occurrences should be transformed by the rule and a declarative part defines conditions, if needed. As last part several imperatively expressed actions will be given, which will be applied sequentially on the object structure and create the destination structure.

➤ *Object Structure Declaration*

In order to define an object structure in rules or *EXISTS* and *FORALL* conditions we need a declaration part for objects and relations, as follows:

```
∃ <object type> <namespace>:<classname> <name>
e.g.  ∃ Feature citygml:Building b1,
      ∃ Geometry gml:Curve c1
```

The declaration requires the object type to identify the object kind, the fully qualified class name, and an object name that acts as variable name for accessing the object. The permitted object types were derived from the GML top-level classes *Feature*, *Geometry*, *CoordinateReferenceSystem*, *Envelope*, *TimeObject*, *Topology*, and *AnyObject* for each other type of an object. Relations are declared analogously:

```
∃ <relation type> [<namespace>:]<classname> <name> from <ref1> to <ref2>
e.g.  ∃ ObjectProperty lod0Network op1 from b1 to c1,
      ∃ TopologicRelation adjacent tr1 from g1 to g2
```

As in the object declaration we need a relation type, the relation classname and a name that acts as variable. A start and end object of the relation must be given. The type *ObjectProperty* defines a GML property relation. Other relations like topologic and geometric relations should be taken from a predefined set of relation types. Additional to objects and relations, we need variable and Java class instance declarations for later use in statements and method calls of conditions and actions. Similar to other declarations, variable and class instances can be declared as follows:

```
∃ Variable <name> value <XPath expression>
∃ Instance <name> class <Java Class>
e.g.  ∃ Variable v1 value $b1/measuredHeight
      ∃ Instance i1 class java.lang.String
```

Variables and instances need a name for access. The value of the variable can be objects or attribute values, specified by an *XPath* expression which refers to the data model of the dataset, i.e. its GML application schema. So the developer of a transformation program is not required to know the graph representation but only the structure of the GML application schema. The variable type will be automatically determined from the type of the referred object/value. The instantiated Java class will be specified by a fully qualified Java conforming notation. All given names

can be used as variables within all parts of the configuration language, also in Java and *XPath* expressions. Similarly, declared Java variables are visible in non Java parts. In *XPath* notation we have to precede variable names by a '\$' due to *XPath* conventions.

➤ *Conditions*

When the declaration of objects and relations is done we have the object structure which will be translated to the left hand side graph of the rule. Each occurrence of this structure in the host graph would produce a match. Preconditions define additional restrictions for a rule application:

```
precondition <condition>
```

In order to express conditions we need a set of logical operators, like *AND*, *OR*, *FORALL*, *EXISTS*, *NOT*, *<*, *>*, *=*, etc. Some of these operators and conditions can be expressed by boolean Java method calls as like in AGG. *FORALL* and *EXISTS* are used for specifying conditions on graph object structures. So they need an object structure declaration. Additionally, the operators *AND*, *OR*, and *NOT* should be provided in the language for formulation of complex conditions:

```
not <condition>
<condition> and | or <condition>
forall <object structure> <condition>
∃ <object structure> [<condition>]
```

Composed conditions can be enclosed by parentheses in order to modify the interpretation sequence. With logical operators we can formulate simple and complex conditional expressions, e.g. a variable must have a value between 1 and 25 or two different geometries must be adjacent:

```
precondition not (v1<1 and v1>25)
precondition forall (
  ∃ Geometry gml:Curve c1,
  ∃ Geometry gml:Curve c2,
  ∃ TopologicRelation adjacent from c1 to c2) condition not (c1=c2)
```

➤ *Actions*

Actions are imperative commands, i.e. sequentially ordered instructions to incur changes on the declared object structures. With that, each modification step can be expressed separately in a specific order. Three kinds of instructions are provided to formulate actions: a *CREATE* operator for object and property creation, a *DELETE* operator for objects and properties, and a *SET* operator for setting attribute values. The operators should have a structure as follows:

```
create <object type> <namespace>:<classname> <name>
create <relation type> [<namespace>:]<classname> <name> from <ref1> to <ref1>
delete <ref>
set <XPath expression> value <Java expression>
e.g.  create Feature citygml:Building b1
      set $b1/measuredHeight value 10
      delete b1
```

The structure of the *CREATE* operator corresponds to the object structure declaration. The *SET* operator references attributes at a given *XPath* location in the GML dataset. The variable type must match the attribute type.

4.1.3 Rule Application

A rule application declaration is a processing instruction that configures the scheduling of the declared rules. If no rule application is defined, we assume an indeterministic application of the

given rules in a single layer. This formulation provides the AGG concept of using layers in the conceptual transformation language:

```
ruleapplication loop <true|false> <layers>
```

There, a set of layers containing several rules will be defined. The loop setting defines whether a loop over layers is enabled. In that case the layer sequence starts again after application of all layers, until no layer is applicable anymore. Similarly to AGG, a layer terminates if no rule can be applied anymore. Layer and rule references have to be given as follows:

```
layer <number> [terminationcondition <condition>] <rule references>
rule <ref>
```

A layer should have an arbitrary layer number, which is used to define the layer order. A set of termination conditions can be given for additional restriction of layer application. Termination conditions will be defined by using the same notation like rule conditions. Finally, a layer references a set of defined rules. An example rule application declaration can look as follows:

```
ruleapplication loop true
  layer 0
    terminationconditions
      forall ( $\exists$  Geometry citygml:Building b1,
         $\exists$  Variable v1 binding $b1/measuredHeight) condition v1>0
      rule r1 rule r2 rule r3
```

In the next section we will explain how the specified transformation language concepts are translated to proper graph transformation rules for AGG.

4.2 Translation of Language Concepts to an AGG Graph Transformation

Since the transformation language contains declarative and imperative parts, but rules in AGG are defined completely declarative, we must translate a program given in the transformation language to AGG rules by interpreting the language parts.

The translation of constraints depends on its domain. If constraints restrict the object structure we map them to AGG graph constraints. Constraints which restrict attributes will be transferred to conditions of the LHS and RHS. Java expressions can be adopted, since AGG can handle such expressions. Other logical operators must be interpreted and mapped to adequate operators.

Each rule given in the transformation language is translated into a rule in AGG. The object structure declaration will be translated to the LHS graph of the rule. There, the object type decides about the node type of an object. Relation types will decide the edge type of a relation. Variables and Java class instances are mapped to variables of the AGG rule. Preconditions which affect the object structure will be mapped to a modified LHS graph acting as additional NAC or PAC. Preconditions which affect attributes will be translated to conditions of the rules LHS. Actions are imperative instructions which must be sequentially executed on the LHS graph. All instructions will be interpreted and processed, which results to a target – the RHS graph within the AGG rule. Appropriate attribute matchings will be created. All *XPath* expressions will be resolved.

The rule application declaration and layers with rules will be mapped from the transformation language to layers of the AGG transformation. Subsequent layers will get an ascending ordered layer number which defines the processing order. Rule assignments to a layer will be retained. An enabled loop over layer configuration will be adopted within AGG. Termination conditions of a layer will be translated to conditions of each rule in this layer.

5 Prototypical Implementation

We have implemented a prototype by using AGG, the graph structure introduced in section 2.2, and the transformation language. The following program flow is realized, illustrated in Fig. 1:

- For the generic handling of GML models we use a reader that can read type information from GML application schemas given as XML schema files. This information contains the structure of declared data types. Based on this information the reader can read GML files of different types and convert them into the internal representations of GML objects and properties.
- For further realization we use AGG. Type information will be mapped to node and edge types. These are the basis for creation of nodes and edges. GML objects and properties will be read in by checking the conformance to its type information and using *GeoTools* (see *GeoTools-Home*) for creating geometry nodes. The nodes and edges form the whole source graph in AGG.
- By translation of a given transformation file conforming to the formalized transformation language we derive a set of graph transformation rules and a schedule for rule application. By using the AGG engine the transformation rules will be applied on the source graph. After termination we get the target graph.
- Finally, the target graph will be resolved to target GML objects and properties and the appropriate type information. The writer can now create the resulting GML file.

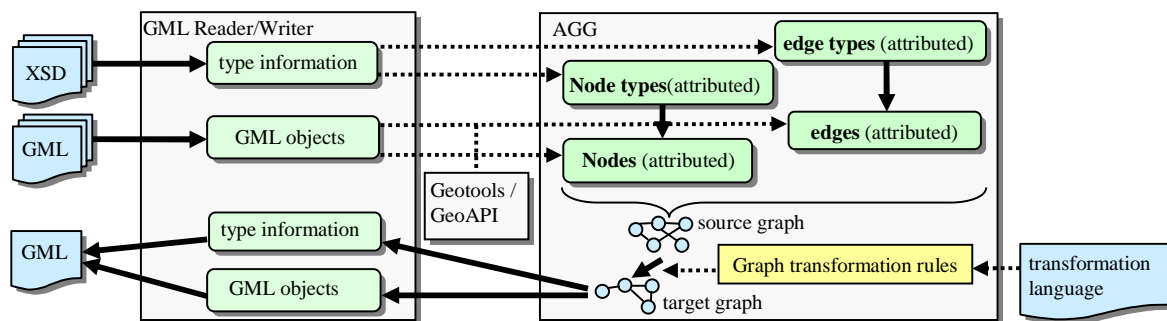


Fig. 1. Prototypical Implementation - overview

With this program structure we can generate files with more than one target GML application schema. Thus, the program can produce several output models. *GeoTools* includes the *Java Topology Suite (JTS)* and is based on the *GeoAPI*. By using *GeoTools* we can use geometrical and topological operators of *JTS* and *GeoTools*. Additionally we have an OGC conforming geometry object structure. For optimized processing of geospatial information models we need a set of Java methods which provide geospatial functionality within Java helper classes.

Everything is implemented in Java and can thus be also executed on Grid Computing nodes. In fact, we are using the implementation within a research project called GDI-Grid (Spatial Data Infrastructure Grid). This project focuses on efficient integration and processing of geodata based on Geo Information Systems (GIS) and Spatial Data Infrastructures (SDI) by grid-enabling OGC compliant web services for grid environments. For that, scenarios of noise dispersion simulation and disaster management will be realized. The here proposed approach of realisation of transformations by using graph transformation will be used within a 3D generation service as

basis of noise dispersion calculation. This service will generate 3D CityGML models from GML based 2D cadastre models and 2.5D Digital Terrain Models. More about this research field and the GDI-Grid project can be found in (KRÜGER & KOLBE 2008 and WERDER & KRÜGER 2009).

6 Application Example

In order to illustrate the graph representation and formulation of transformations on such graphs, we will demonstrate the development of a transformation program in a short example. The example realises a method of map generalization: the aggregation of areal objects from one scale to a smaller scale formulated as an optimization problem using combinatorial optimization techniques, developed in (HAUNERT 2008). This method should generate results of maximal data quality and is weighted, e.g., by a minimal area size. Criteria for data quality are:

- Aggregated objects should be members of semantically similar classes (like greenland, settlement area, etc.), formalized by a semantic distance between classes.
- A composition of objects should have a geometrically simple and compact shape.

The algorithm given in (HAUNERT 2008) is based on an adjacency graph of a planar subdivision, where a node represents a region and is weighted; edges between two nodes represent a common boundary between two regions. After application of the area aggregation to a smaller scale, a given weight threshold must be exceeded. The algorithm has to find a partition of the given graph nodes and a set of classes, such that:

1. The adjacency graph of all areas within the partition is still connected.
2. A node of the areas within the partition has an unchanged class – called the *center*.
3. Each area within the partition has a total weight of at least the weight threshold.
4. A cost function dependent on total cost for class change and total cost for non-compact shapes of all subareas is minimized. The cost for non-compact shapes will be given by an appropriate cost function, which is a product of weight and semantic distance.

Fig. 2 shows the file structure of a planar subdivision of five CityGML areas of class *Cropland*.

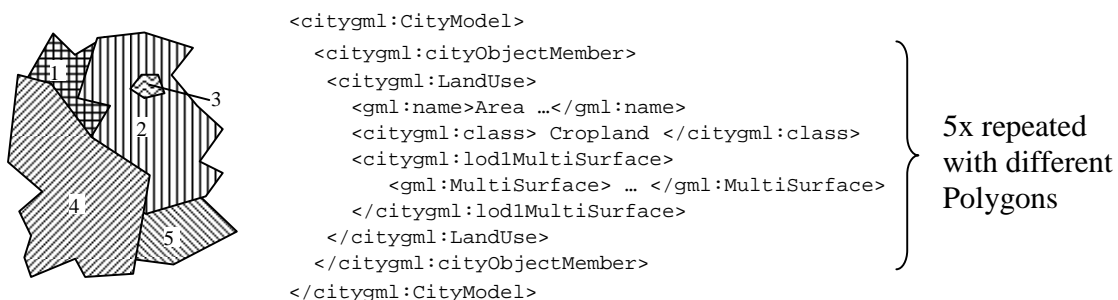


Fig. 2. Example of a simple CityGML instance document with 5 areal LandUse objects

This CityGML file leads to a graph (in this example a tree), as shown in Fig. 3. Each *LandUse* feature in the feature collection *CityModel* will be mapped to a feature node. The geometry of each feature will be stored encapsulated in an own geometry node. The object property relations will be represented by directed edges between nodes. Topologic relations – in this case adjacency relations – have to be added for each pair of adjacent geometry objects before the application of the algorithm. So, an explicit adjacency subgraph is added to our graph, shown in Fig. 3.

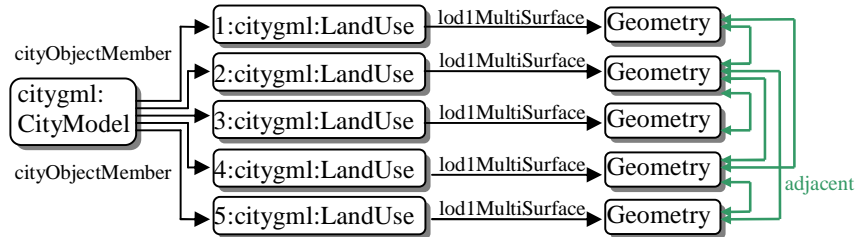


Fig. 3. Simplified graph with inserted adjacency relations

In this graph we can realize the aggregation of areal objects as described above using graph transformation. For that purpose, we map the four generalisation rules given above to a transformation program according to our language. As stated before, a rule consists of two declarative parts - object structure and condition declarations - and an imperative definition of actions. The source object structure of aggregation of two *LandUse* features can be declared as:

```
rule area_aggregation
  ∃ Feature citygml:LandUse f1,
  ∃ Feature citygml:LandUse f2,
  ∃ Geometry gml:MultiSurface g1,
  ∃ Geometry gml:MultiSurface g2,
  ∃ ObjectProperty citygml:lod1MultiSurface p1 from f1 to g1,
  ∃ ObjectProperty citygml:lod1MultiSurface p2 from f2 to g2,
  ∃ TopologicRelation adjacent r1 from g1 to g2,
  ∃ TopologicRelation adjacent r2 from g2 to g1,
  ∃ Variable n1 value $f1/name,
  ∃ Variable n2 value $f2/name,
  ∃ Variable c1 value $f1/class,
  ∃ Variable c2 value $f2/class,
  ∃ Variable ms1 value $g1/geometry,
  ∃ Variable ms2 value $g2/geometry,
  '-- the following line refers to a user defined class: --
  ∃ Instance ah class de.gdigrid.transform.AreaHandler
```

For later use, we define a set of variables and an instance of a handler class, which provides several Java methods for calculations on the areal geometries.

The declaration of conditions must reflect the four construction conditions of the algorithm given above. The first condition of connectivity of composed areas is already implicitly fulfilled by the object structure declaration. As class we take the *class* attribute of a *LandUse* area. The second condition is also implicitly fulfilled since the class remains unchanged. In this example the size of an area object acts as weight. We need a termination condition for the continuous rule application while matches exist. Here it is given by exceeding the total weight threshold – a minimal area size – of the composed area. After the termination of the continuous rule application, we can guarantee the third condition if the weight threshold isn't too high. Finally, we need a cost function dependent on the semantic difference between two areas, a total weight and a compactness function of both geometries, which must be minimal to fulfil the fourth condition. Details on the cost function are given in (HAUNERT 2008). Since we can use Java expressions we define the conditions by using Java methods provided by a declared *AreaHandler* instance:

```
precondition ah.getArea(g1) < 100 and
precondition
  ah.costFunction(ah.semanticDifference(c1,c2), ah.getWeight(g1,g2),
  ah.getCompactness(g1,g2))<=30
Please note: We define 30 as acceptable minimum value of the cost function to
simplify the example. The weight threshold in this example is set to 100 km2.
```

Now, we can formulate the imperative instructions – a union of the areal geometries and a concatenation of the names of the two affected *LandUse* features. The instructions stepwise lead to the destination graph structure:

```
set $f1/name value n1+n2      -- string concatenation --
set $g1/geometry value ah.union(ms1,ms2)
delete f2, delete g2, delete p2, delete r1, delete r2
```

The rule can be translated to AGG, as shown in Fig. 4 according to the concepts in section 4.2.

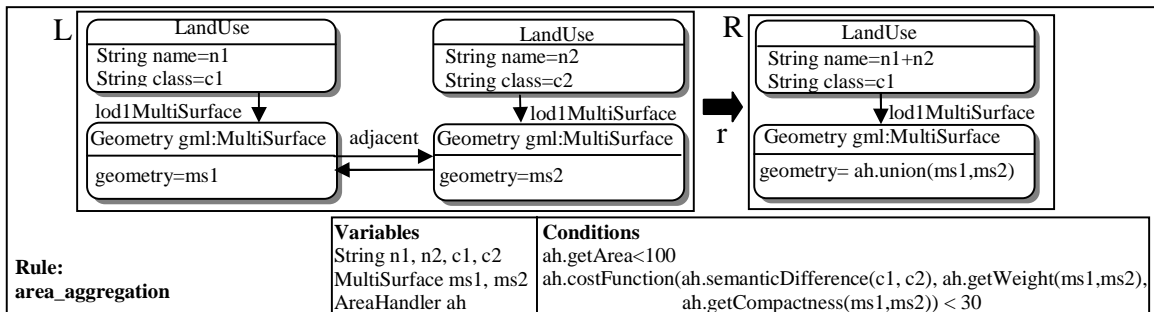


Fig. 4. AGG rule of the example algorithm, notation according to (MELAMED 1998 and EHRIG ET AL. 2006)

For the one defined rule *area_aggregation* we can have a simple rule application with a layer containing the one rule, mapped to an AGG layer including the rule in Fig. 4.

```
ruleapplication loop=false
layer layer1
rule area_aggregation
```

Now we can apply the example algorithm as rule within AGG. The rule will be stepwise applied to the given host graph until no match can be found, either by a non-fulfilled condition, e.g. exceeding weight threshold of all areas, or by none occurrence of the left-hand side graph structure within the host graph. The rule can be applied once, many times or not at all.

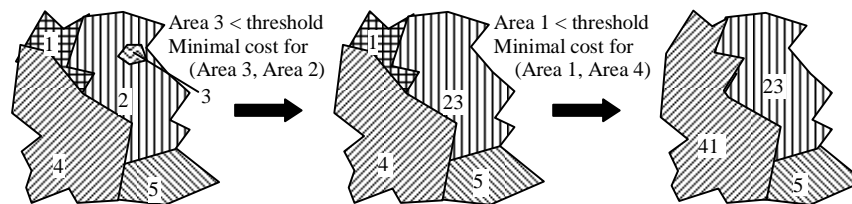


Fig. 5. Two applications of the *area_aggregation* rule

Fig. 5 depicts two applications of the *area_aggregation* rule. Here we can see the stepwise aggregation controlled by a cost function and a weight threshold. This example shows the data driven processing of the transformation by subsequent application of graph transformation rules, since the occurrence of matches – depending on the underlying data – decides if a rule is applicable or not. New matches can result from a rule application; other existing matches can become abolished. The rule terminates only if no match is left.

7 Conclusions & Outlook

In this paper we have proposed a framework for the analysis, interpretation, and transformation of arbitrary spatial datasets modelled according to the ISO 191xx standards and being physically

encoded in GML. We have shown how complex geospatial information models are mapped to attributed, typed graphs. The set of predefined node and relation types directly follows from the ISO 191xx standards and, thus, have specified and standardised semantics. The graph representation maintains the individual property relations between geographic feature instances and their geometric and topologic objects, aggregation relations between features, geometric and topologic relations and generic associations between spatial objects.

This representation facilitates the application of graph transformations. By using the graph transformation tool AGG, transformation rules can be specified in a declarative way. Complex spatial configurations can be identified using AGG's mechanism for subgraph isomorphism matching. This makes the proposed framework especially useful for recognition, interpretation, and generalization tasks. Also ontological transformations can be expressed by the creation of nodes which represent features according to a different application data model (e.g. representing a different ontology) given by a different GML application schema.

Furthermore, we have introduced a transformation language that copes with processing of complex GML object structures and provides concepts for graph transformation in an intuitive way. The notation is partially declarative concerning the expression of object structures and conditions and partially imperative concerning the expression of sequential transformation actions. The declarative part enables the recognition of complex substructures; the imperative actions provide a way to describe specific transformations on them. Since all feature types are fully qualified with respect to their namespaces, datasets from different GML application schemas can be combined and transformed in an integrated way. Because geometries comply with ISO19107 and GML, we can employ the *GeoAPI* framework and the *GeoTools* in our implementation to store and analyse geometry objects.

Based on this work, we see several further research directions. We want to realize more complex transformations within the above stated GML graph structure. It is planned to realise the recognition of bridges spanning valleys on the basis of GML based 2.5D Digital Terrain Models and GML based 2D cadastre data (German ATKIS and ALKIS). Therefore, we have to specify appropriate rules and implement accordant Java methods within the presented prototype. Another task for future research is the analysis of limitations of this concept, which can be named as:

- The application of subgraph isomorphism is NP-complete. On large graph structures this concept produces high computational cost. Thus, we have to analyze the cost-value-ratio in comparison to other transformation engines for geospatial information models.
- Since rules will be executed in arbitrary order on the same graph structure a rule must not reverse a transformation of a concurrent rule, otherwise a termination problem occurs.

The incorporation of inexact subgraph isomorphisms for rule matchings is a further research task aiming at the handling of uncertainty and incomplete or erroneous spatial datasets.

Acknowledgments

This research has been carried out within the framework of the GDI-Grid project as part of the German D-Grid initiative. It was funded by the German Federal Ministry of Education and Research (BMBF). We thank the BMBF for supporting our work.

References

- AGG-TEAM . The AGG 1.5.0 Development Environment: The User Manual.
URL=<http://user.cs.tu-berlin.de/~gragra/agg/AGG-ShortManual/AGG-ShortManual.html>.
Access: 2010-01-13.
- BALASUBRAMANIAN, D., NARAYANAN, A., VAN BUSKIRK, C., KARSAI, G. 2006. The Graph Rewriting and Transformation Language: GreAT. In: Proceedings of the 3rd Int. Workshop on Graph Based Tools, ECEASST, Vol. 10
- EHRIG, H., EHRIG, K., PRANGE, U., TAENTZER, G. 2006. Fundamentals of Algebraic Graph Transformation. Springer, Berlin et al.
- ERMEL, C., RUDOLF, M., TAENTZER, G. 1999. The AGG approach: language and environment. In Handbook of graph grammars and computing by graph transformation: vol. 2: applications, languages, and tools, G. Rozenberg, Ed. World Scientific, Singapore et al., 551-603.
- FALKOWSKI, K.; EBERT, J. 2009: Graph-based urban object model processing. In: Object Extraction for 3D City Models, Road Databases and Traffic Monitoring - Concepts, Algorithms and Evaluation (CMRT). ISPRS. 38 - 3/W4, 115-120.
- GARCIA-MOLINA, H., ULLMAN J.D., WIDOM, J. 2002. Database Systems: The Complete Book. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey.
- GeoAPI. URL= <http://geoapi.sourceforge.net/charter.html>. Access: 2010-01-19.
- GeoTools-Home. URL= <http://geotools.org>. Access: 2010-01-21.
- HAUNERT, J-H. 2008. Aggregation in Map Generalization by Combinatorial Optimization. Doctoral Dissertation. Institut für Kartographie und Geoinformation, Universität Hannover
- ISO 19109:2005:Geographic Information – Rules for application schema, 2005. International Organization for Standardization, Genf.
- KRÜGER, A., KOLBE, T.H. 2008. Mapping Spatial Data Infrastructures to a Grid Environment for Optimised Processing of Large Amounts of Spatial Data. In ISPRS 2008: Proceedings of the XXI congress: Proceedings of Commission IV. Beijing, 1559-1564.
- LAKE, R., BURGGRAF, D.S., TRNINIC, M., RAE, L. 2004. Geography Markup Language (GML): Foundation for the Geo-Web. John Wiley & Sons, Chichester, England.
- MELAMED, B. 1998. Design and Implementation of an Attribute Manager for Conditional and Distributed Graph Transformation. Master Thesis. Technische Universität Berlin.
- OGC 07-036: OpenGIS® Geography Markup Language (GML) Encoding Standard version 3.2.1. 2007. C. Portele Ed., Open Geospatial Consortium Inc.
- RANGER, U., WEINELL, E. 2008. The Graph Rewriting Language and Environment PROGRES. In: Applications of Graph Transformations with Industrial Relevance, vol. 5088 of LNCS, Springer.
- SCHÜRR, A., WINTER, A. J., ZÜNDORF, A. 1999. The PROGRES Approach: Language and Environment. In Handbook of graph grammars and computing by graph transformation:vol.2: applications, languages, and tools, G. Rozenberg, Ed. World Scientific, Singapore et al., 485-550.
- The <AGG> Homepage. URL=<http://tfs.cs.tu-berlin.de/agg>. Access: 2010-01-14.
- WERDER, S., KRÜGER, A. 2009. Parallelizing Geospatial Tasks in Grid Computing In: GIS.SCIENCE, 3/2009, abcverlag, Heidelberg, 71-76.

Neue Entwicklungen im Bereich Virtueller Globen am Beispiel der i3D-Technologie

MARTIN CHRISTEN, STEPHAN NEBIKER¹

Zusammenfassung: Virtuelle Globen wie Google Earth oder Microsoft Bing Maps 3D haben Geodaten und die Geoinformatik ins Blickfeld des öffentlichen und wissenschaftlichen Interesses gerückt und Ideen für zahlreiche zukünftige Anwendungsszenarien generiert. Trotz ihrer fast unermesslichen Datenbasen und ihrer beeindruckenden Leistungsmerkmale vermögen die etablierten Technologien viele neue Anforderungen noch nicht oder erst ansatzweise zu erfüllen. Dazu gehören die Unterstützung einer hohen geodätischen Genauigkeit, die Integration neuer Datentypen wie 3D Punktwolken oder die Realisierung von Mixed-Reality-Anwendungen. Dieser Beitrag beschreibt die Entwicklung der 3D-Visualisierungs-Engine i3D, welche am Institut für Vermessung und Geoinformation (IVGI) der Fachhochschule Nordwestschweiz implementiert wird und dabei die oben aufgeführten Anforderungen adressiert. i3D ist auf die webbasierte Echtzeitvisualisierung riesiger Geodatenmengen spezialisiert. Basis für diese Visualisierung bildet ein virtueller Globus, der auf einem exakten geodätischen Bezugsrahmen aufbaut und hochgenaue Anwendungen auf globaler Basis ermöglicht.

1 Einleitung

Die i3D-Technologie dient einerseits als Forschungs- und Entwicklungsplattform für neue Konzepte, Technologien und Anwendungen im Bereich virtueller Globen. Gleichzeitig bildet sie die Basis für erste neue Prototypen und Produkte in Bereichen wie drohnenbasierte Echtzeitüberwachung oder 3D location based services (LBS).

Die i3D-Softwarearchitektur unterstützt verschiedene Daten-Kanäle, welche über das Web oder von der Harddisk geladen werden können (Nebiker et al, 2007). Die Standard-Daten-Kanäle des virtuellen Globus sind: Bilddaten, Höhendaten, Points of Interest (POI), 3D-Objekte und Punktwolken. Ein besonderer Schwerpunkt des Beitrags ist ein neuer Ansatz zur effizienten stream-basierten Prozessierung und anschliessenden web-basierten Visualisierung riesiger TIN-basierter Höhenmodelle. Der neue Ansatz in i3D erlaubt eine signifikante Qualitätsverbesserung in der Geländerepräsentation gegenüber den etablierten virtuellen Globen, was für zukünftige Anwendungen mit gesteigerten Genauigkeitsanforderungen von grosser Bedeutung sein wird. Ein zweiter Schwerpunkt besteht in der Integration riesiger 3D-Punktwolken, z.B. von mobilen Laserscans ganzer Städte oder Regionen, in einen virtuellen Globus (Nebiker et al, 2010). Im Beitrag wird ein Ansatz auf der Basis eines Sparse-Voxel-Octree präsentiert. Mit diesem Ansatz können in i3D Punktwolken mit beliebig vielen Punkten aufbereitet und anschliessend im virtuellen Globus visualisiert werden.

Im Beitrag werden dazu Untersuchungen und Resultate mit realen Datensätzen aus dem Bereich der Verkehrsplanung präsentiert und diskutiert.

¹Martin Christen, Stephan Nebiker, {martin.christen, stephan.nebiker}@fhnw.ch
Fachhochschule Nordwestschweiz, Hochschule für Architektur Bau und Geomatik, Institut Vermessung und Geoinformation. Gründenstrasse 40, 4132 Muttenz, Schweiz

2 Problemstellung

Es gibt zahlreiche Ansätze für interaktives Terrain Rendering. Eine Übersicht zu verschiedenen Render-Methoden gibt es zum Beispiel von Pajarola et al. (2007). Grundsätzlich unterscheidet man zwischen hierarchischen Level of Detail Methoden mit regulärer Grid-Unterteilung und zwischen irregulären Datensätzen (Hoppe, 1998), (Pajarola et al., 2002). In letzter Zeit sind vermehrt Ansätze vorgestellt worden, welche für den Grafikkartenprozessor (GPU) optimiert wurden (Livny et al., 2009) und auch den Datentransfer zwischen CPU und GPU optimieren (Lindstrom und Cohen, 2010) (Dick et al., 2009).

Die meisten Terrain Rendering Ansätze beschränken sich auf planares Terrain für „Flat Earth“-Rendering bei dem die Erde als Scheibe betrachtet wird. Es gibt relativ wenig Literatur über sphärisches oder sogar ellipsoidisches planetares Rendering oder dessen Datenprozessierung, z.B. (Gerstner, 1999), (Szalay et al., 2007) (Qiming Zhou, 2008).

Ein Ansatz für die Berechnung der Delaunay-Triangulation für sehr grosse Datenmengen wurde von Isenburg et al. (2006) vorgestellt. Dieser Ansatz berechnet die Delaunay-Triangulation unter Verwendung der räumlichen Kohärenz des Datensatzes ohne zuvor eine Sortierung auszuführen. Allerdings wird das Resultat nicht in einer räumlichen Datenstruktur gespeichert, welche für die Visualisierung auf dem virtuellen Globus oder für die Berechnung verschiedener Auflösungsstufen geeignet wäre.

3 Prozessierung von Bild und Höhendaten

3.1 Bilddaten

Bilddatensätze haben im Allgemeinen keinen Platz im RAM, da diese mehrere Terabytes umfassen können. Um solche Datenmengen auf dem virtuellen Globus darstellen zu können, müssen zwei Voraussetzungen erfüllt werden. Erstens muss ein Datensatz räumlich unterteilt werden, so dass gezielt die notwendigen Daten in der Nähe des Betrachters geladen werden können. Zweitens müssen verschiedene Auflösungsstufen (Level of Detail) der Bilder existieren, um mit möglichst wenig RAM-Bedarf aus jeder Perspektive immer den gesamten Globus darstellen zu können.

Eine regelmässige, quadratische Unterteilung in einem Quadtree ist für die räumliche Unterteilung und Bereitstellung verschiedener Auflösungsstufen gut geeignet. Jeder Bilddatensatz wird in die Mercator-Projektion transformiert und in Kacheln mit einer Grösse von 256x256 Pixeln gespeichert (Abb. 1). Dieses Kachelprinzip kennt man vor allem in 2D-Kartendiensten wie Bing Maps (Microsoft), Google Maps (Google), OpenStreetMap (OpenStreetMap). Es ist üblich, die Kacheln mit dem Quad-Key des Quadtrees anzusprechen, da dieser die räumliche Information und auch die Auflösungsstufe beinhaltet.

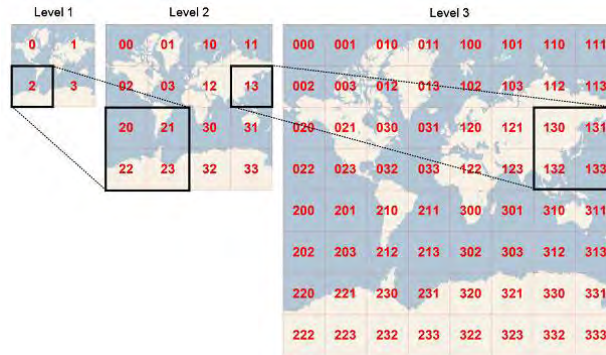


Abb. 1 Bing Maps Tile System mit Quadkeys (Microsoft)

Bei sehr grossen Datensätzen werden sehr viele Kacheln generiert. Dabei ist zu beachten, dass viele Filesysteme (z.B. NTFS unter Windows) Mühe mit einer grossen Anzahl Dateien haben, wenn diese im gleichen Verzeichnis sind. Das Laden einer Datei wird langsamer, je mehr Dateien im selben Verzeichnis sind. Die Kacheln müssen daher in verschiedenen Verzeichnissen gehalten werden, so dass die gesamte Anzahl Dateien in einem Verzeichnis immer unter ca. 1000 ist. In i3D wird dies gelöst, indem die räumliche Struktur auf den Verzeichnisbaum des File-Systems gespiegelt wird. Somit sind räumlich nahe Dateien auch im Filesystem nahe zusammen, was wiederum zu schnellerem Laden der Kacheln führt.

Die Mercator-Projektion hat auch den Vorteil, dass es minimale Verzerrungen in den prozessierten Bilddaten gibt, denn die Mercator-Projektion ist winkeltreu. Die Mercator Projektion ist auch ideal um die Bilddaten für den virtuellen Globus in eine quadratische Form zu bringen. Die maximale Breite der Projektion wird so gewählt, dass das resultierende Bild ein Quadrat wird. Bei der sphärischen Mercator-Projektion ist die maximale Breite ca. 85.05° und bei der ellipsoidischen Mercator-Projektion ist die maximale Breite ca. 85.08° . Die Projektion wird in den Bereich $(-1,-1)$ bis $(1,1)$ skaliert, um eine erhöhte numerische Stabilität bei der Verwendung von floating point Zahlen zu erreichen.

Bei der Visualisierung können die benötigten Kacheln mittels View-Frustum-Culling und einer geschickten Error-Metric ermittelt werden (Abb. 2).

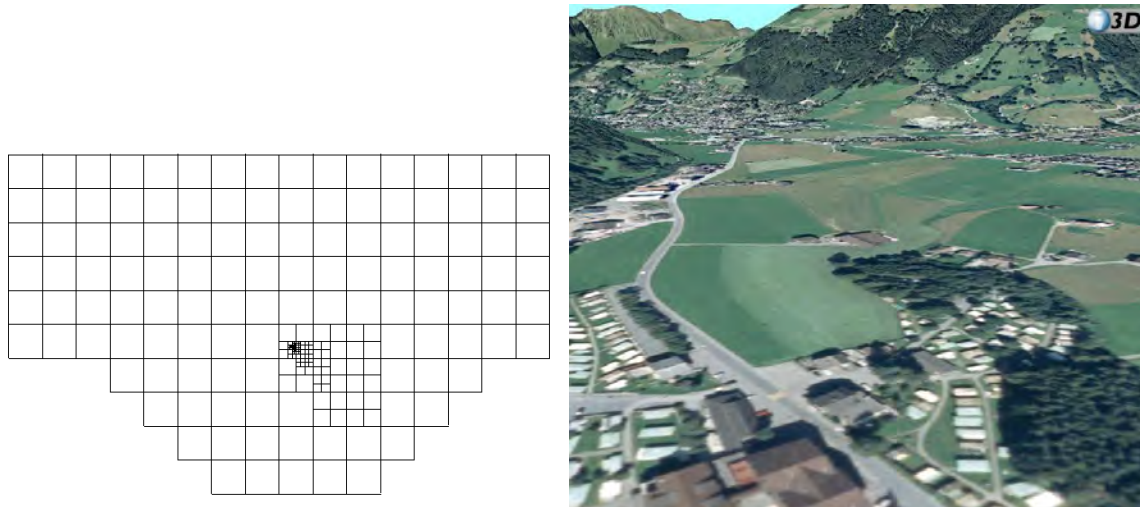


Abb. 2 Die im Speicher vorhandenen Kacheln und die entsprechende Visualisierung
DHM25 und SWISSIMAGE Daten © swisstopo (JA100071)

3.2 Höhendaten

Wenn man Höhendaten auf einen virtuellen Globus bringen will, so müssen bestimmte Voraussetzungen erfüllt werden. Ein virtueller Globus sollte in der Lage sein, präzise regionale und globale Höhendaten zu visualisieren. Wie bei den Bilddaten haben auch die Höhendaten im Allgemeinen nicht Platz im RAM und müssen daher in verschiedenen Auflösungsstufen vorliegen und gekachelt sein. Eine weitere wichtige Anforderung ist die Unterstützung von Bruchkanten und Höhenkoten.

Es gibt zahlreiche Möglichkeiten für eine Triangulierung von Höhendaten für die Visualisierung. Für unseren Globus wurde eine Delaunay-Triangulierung gewählt, welche gekachelt gespeichert wird. Da regionale oder gar nationale Höhendatensätze sehr viele Punkte haben können, musste ein Ansatz entwickelt werden, welcher leicht skalierbar ist. Das heisst, dass bei der Prozessierung der benötigte Arbeitsspeicher nicht proportional zur Datenmenge ist, sondern immer konstant und möglichst gering bleibt.

Die skalierbare, stream-basierte Delaunay-Triangulierung in i3D erfolgt in drei Durchläufen:

1. Geodätische Transformation von Punkten
2. Erstellen der Räumlichen Unterteilung von Punkten
3. Triangulierung und Teilen der Zellen

Im ersten Durchlauf werden die Punkte in die Mercator Projektion transformiert. Dabei kann ein beliebiges Rotations-Ellipsoid verwendet werden, in unserem Fall das WGS84-Ellipsoid. In diesem Prozessschritt wird ein neues binäres File geschrieben, welches alle transformierten Punkte enthält. In diesem Durchlauf werden auch die Anzahl Punkte und die Bounding Box des Datensatzes bestimmt.

Im zweiten Durchlauf wird die räumliche Unterteilung erstellt. Die räumliche Unterteilung entspricht genau der Unterteilung des globalen Quadrees welcher bei der Bilddatenprozessierung schon verwendet wurde. Die Punkte werden in dieser Unterteilung

gespeichert. Für jede Kachel wird ein File mit Punkten erstellt. Somit existiert eine räumliche Unterteilung von allen Punkten.

Im dritten und komplexesten Durchlauf wird die Triangulierung gerechnet indem durch die räumliche Struktur iteriert wird. Es werden immer genau vier Kacheln derselben Auflösungsstufe im Speicher gehalten und trianguliert.

Danach kann jede Auflösungsstufe ausgedünnt werden und somit erhält man die Kacheln für das Level of Detail (Abb. 3). Bei der Visualisierung wird derselbe View-Frustum Check wie bei den Bilddaten gemacht, so erhält man die entsprechenden Höhenkacheln (Abb. 4).

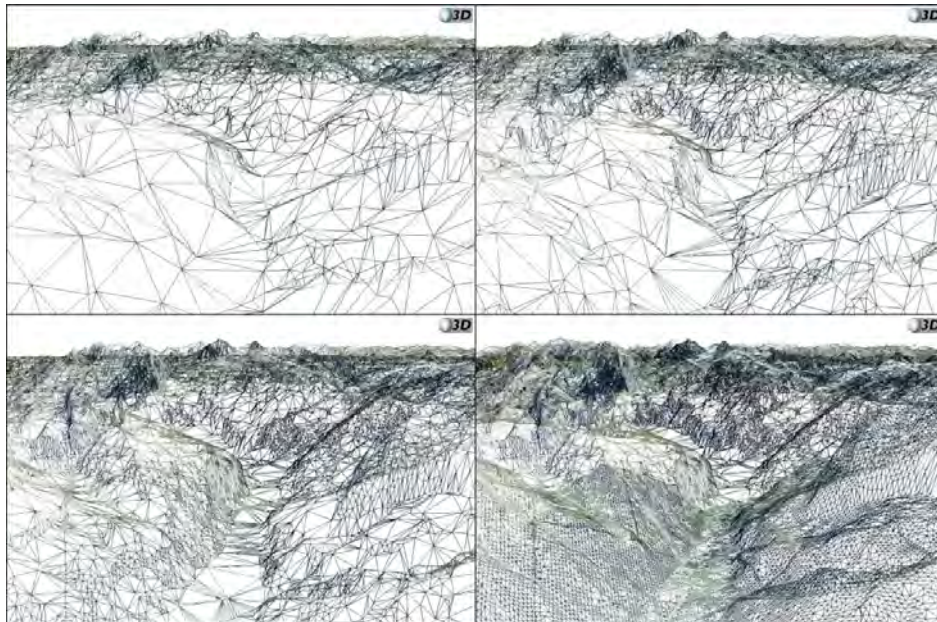


Abb. 3 Interaktive Änderung des Qualitätsparameters. Basisdaten DHM 25 © swisstopo (JA100071)



Abb. 4 Bilddaten und Drahtmodell des Höhenmodells zusammengemischt.
Basisdaten: DHM 25, SWISSIMAGE © swisstopo (JA100071)

4 Punktwolken-Streaming mit Sparse Voxel Octrees

Das Hauptproblem beim Visualisieren von Punktwolkendatensätzen ist die riesige Anzahl an Punkten. Eine Punktwolke kann aus mehreren Billionen Punkten bestehen. Schon eine einzelne grosse Punktwolke effizient auf einem virtuellen Globus zu visualisieren ist kein triviales Problem. Ein virtueller Globus welcher über Hunderte oder sogar Tausende solcher Datensätze verfügt ist eine Herausforderung.

Hier wird ein Lösungsansatz gezeigt, welcher eine Punktwolke in einen Sparse Voxel Octree mit verschiedenen Auflösungsstufen umrechnet und später effizient visualisieren lässt. Auf dem Globus können dank dem LOD-Ansatz unzählige Punktwolken visualisiert werden.



Abb. 5 Sparse Voxel Octree mit einem Punktwolkendatensatz (im Zentrum der Abbildung) in i3D

Der zuvor beschriebene Ansatz für verschiedene Auflösungsstufen für Bild- und Höhendaten eignet sich nicht für detaillierte 3D-Punktclouds aus terrestrischen und mobilen Laserscans, da einzelne horizontale Partitionen wiederum sehr viele vertikal verteilte Punkte enthalten können. Erweitert man allerdings den Quadtree um eine Dimension erhält man einen Octree (Abb. 5). Genau wie der Quadtree hat der Octree auch verschiedene Auflösungsstufen.



Abb. 6 Beispiel einer Voxel Gruppe (8x8x8)

Eine Punktwolke wird in einem Octree gespeichert, wobei jeder Octree-Knoten aus einer 8x8x8 Voxel-Gruppe besteht (Abb. 6). Jede Voxel-Gruppe kann durch einen Octocode (analog zum

Quadkey) oder über einen „Leveled Voxel Space Index“ (LVSI) referenziert werden: Der Octocode ist eine Zahl mit Basis 8 welche die Position im Octree eindeutig bestimmt. (Abb. 7). Der LVSI ist ein 3D-Index inklusive Level. Da man pro Octree-Knoten eine Voxel-Gruppe rechnen kann, verfügt man a) über mehrere Auflösungsstufen für einen Level-of-Detail-Ansatz und b) über einen gekachelten Datensatz, den man dynamisch laden kann. Somit hat man die gleichen Voraussetzungen geschaffen, wie sie für dynamisches Laden von Bilddaten und Höhendaten benötigt werden. Damit ist es möglich, sehr grosse Datensätzen zu prozessieren und auch zu visualisieren (Abb. 8).

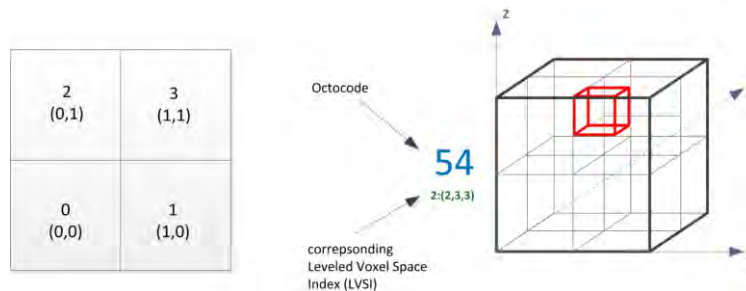


Abb. 7 Leveled Voxel Space Index (LVSI) und Octocodes

Die Voxeldaten-Prozessierung geschieht in 3 Phasen:

- Transformation nach geozentrisch-kartesischen WGS84-Koordinaten und erste Datenanalyse
- Erstellung Octree-Koordinatensystem und Transformation aller Punkte in dieses
- Octree- und Voxel-Gruppen-Konstruktion

Nach der Datenprozessierung findet die Visualisierung statt, welche Daten je nach Position des Betrachters lädt und – je nach verfügbarem Speicher – die entsprechenden Voxel Gruppen lädt.



Abb. 8 Voxel basierte 3D-Punktwolke mit RGB-Textur im i3D-Globus in unterschiedlichen Auflösungsstufen. (Oben links in der schlechtesten Auflösung. Unten Links in mittlerer Auflösung. Oben rechts in guter Auflösung und unten rechts in bester Auflösung.)

5 Resultate und Ausblick

Es wurden Ansätze für die effiziente Aufbereitung von sehr grossen Bild-, Höhen- und Punktwolkendatensätzen und für deren gestreamte Visualisierung in einem virtuellen Globus gezeigt. Mit dem vorgestellten TIN-basierten Ansatz können nicht nur beliebige nationale bis globale Höhendatensätze effizient prozessiert werden. Der Ansatz führt auch zu einer signifikanten Qualitätsverbesserung bei einer gleichzeitigen deutlichen Datenreduktion gegenüber den bisherigen gitter-basierten Höhenansätzen in virtuellen Globen. Mit dem vorgestellten Voxel-Ansatz ist es erstmals möglich, riesige 3D-Punktwolkendatensätze über das Internet in einem virtuellen Globus interaktiv zu visualisieren. Damit eröffnen sich völlig neue Perspektiven in der Modellierung und Nutzung hochdetaillierter 3D-Stadtmodelle (Nebiker et al., 2010).

Ein virtueller Globus benötigt umfangreiche Funktionalität zur performanten Unterstützung der unterschiedlichen Geodatentypen einer globalen virtuellen Welt. Gleichzeitig ist es wichtig, auch neue Anwendungen für Virtuelle Globen realisieren zu können. Eine einfache API, wie sie von Google Earth oder Microsoft Bing Earth zur Verfügung gestellt wird, reicht nicht aus, um komplexe neue Applikationen zu realisieren.

Ein möglicher Ausweg ist die Entwicklung einer einfach nutzbaren, standardisierten SDK² für virtuelle Globen, welche in verschiedenen Computersprachen vorliegt, wie zum Beispiel VisualBasic, C#, C++ und Java und auf vielen Hardwaresystemen lauffähig ist. Zur Zeit wird am IVGI eine derartige offene SDK konzipiert und am Beispiel von i3D implementiert, um unterschiedlichste Applikationen zu realisieren, welche den virtuellen Globus verwenden. Anwendungsbeispiele reichen von der drohnenbasierten Umweltbeobachtung und Kartierung (Euster et al., 2010) bis hin zu Anwendungen im Bereich 3D LBS.

6 Literaturverzeichnis

- DICK, C., SCHNEIDER, J., AND WESTERMANN, R. 2009. Efficient geometry compression for GPU-based decoding in realtime terrain rendering. *Computer Graphics Forum* 28:67–83.
- EUGSTER, H., FLCKIGER, K., AND NEBIKER, S. 2010. Drohnenbasierte umweltbeobachtung und kartierung basierend auf einem virtuellen globus. Dreiländertagung DGPF - OVG - SGPF. Wien.
- GERSTNER, T. 1999. Multiresolution visualization and compression of global topographic data. Technical report, GeoInformatica.
- GOOGLE. Google maps, available online at <http://maps.google.com>.
- HOPPE, H. 1998. Smooth view-dependent level-of-detail control and its application to terrain rendering. In *VIS '98: Proceedings of the conference on Visualization '98*, pp. 35–42, Los Alamitos, CA, USA. IEEE Computer Society Press.

² Ein Software Development Kit (SDK) ist eine Sammlung von Werkzeugen und Anwendungen, die verwendet werden um Software zu entwickeln.

- ISENBURG, M., LIU, Y., SHEWCHUK, J., AND SNOEYINK, J. 2006. Streaming computation of delaunay triangulations. *ACM Trans. Graph.* 25:1049–1056.
- LINDSTROM, P. AND COHEN, J. D. 2010. On-the-fly decompression and rendering of multiresolution terrain. *In* I3D '10: Proceedings of the 2010 ACM SIGGRAPH symposium on Interactive 3D Graphics and Games, pp. 65–73, New York, NY, USA. ACM.
- LIVNY, Y., KOGAN, Z., AND EL-SANA, J. 2009. Seamless patches for gpu-based terrain rendering. *Vis. Comput.* 25:197–208.
- MICROSOFT. Bing maps tile system, available online at <http://msdn.microsoft.com/en-us/library/bb259689.aspx>.
- NEBIKER, S., BLEISCH, S., AND CHRISTEN, M. 2010. Rich point clouds in virtual globes - a new paradigm in city modeling? To appear in: *Computers, Environment and Urban Systems* (in press).
- NEBIKER, S., CHRISTEN, M., EUGSTER, H., FLÜCKIGER, K., AND STIERLI, C. 2007. Integrating mobile geo sensors into collaborative virtual globes - design and implementation issues. Paper presented at the Mobile Mapping Technologies Symposium MMT 2007, Padua.
- OPENSTREETMAP. Openstreetmap tile system, available online at <http://wiki.openstreetmap.org/wiki/tiles@home>.
- PAJAROLA, R., ANTONIJUAN, M., AND LARIO, R. 2002. Quadtree based triangulated irregular networks. *In* VIS '02: Proceedings of the conference on Visualization '02, pp. 395–402, Washington, DC, USA. IEEE Computer Society.
- PAJAROLA, R. AND GOBBETTI, E. 2007. Survey of semi-regular multiresolution models for interactive terrain rendering. *Vis. Comput.* 23:583–605.
- QIMING ZHOU, BRIAN LEES, G.-A. T. 2008. *Lecture Notes in Geoinformation and Cartography*, chapter A Seamless and Adaptive LOD Model of the Global Terrain Based on the QTM. Springer Berlin Heidelberg.
- SZALAY, A. S., GRAY, J., FEKETE, G., KUNSZT, P. Z., KUKOL, P., AND THAKAR, A. 2007. Indexing the sphere with the hierarchical triangular mesh. *CoRR* abs/cs/0701164.

Matching von 3D Gebäudemodellen mit Wärmebildern einer Flugzeuggetragenen IR-Kamera

DOROTA IWASZCZUK, JANJA AVBELJ & UWE STILLA

Zusammenfassung: Energieeffizienz der Gebäude ist aufgrund immer wieder steigender Energiekosten, neuer Energiesparverordnungen und Klimaänderungen zu einem sehr wichtigen Thema geworden. Zur Verbesserung versucht man dabei nicht nur bessere Standards für Neubauten einzuführen, sondern auch die Zustände von Altbauten zu untersuchen. Für den Bau im Bestand ist besonders die Detektion und Dokumentation von Wärmelecks in der Gebäudehülle interessant. Die Abstrahlung der Gebäudehülle im infraroten Bereich kann durch Wärmebilder erfasst werden. Um Wärmebilder mit anderen Bilddaten zu kombinieren und automatisch mit Gebäudeinformationen zu versehen ist für die Messwerte ein räumlicher Bezug herzustellen. Dies kann beispielsweise durch eine Texturzuordnung zu entsprechenden Flächen von 3D Gebäudemodellen erfolgen. Eine direkte Georeferenzierung mit GPS/INS Information ist jedoch für eine präzise Zuordnung der Texturen meist nicht ausreichend. In diesem Beitrag wird ein Verfahren zur Verbesserung der Georeferenzierung durch Matching vorgestellt und untersucht. In den Wärmebildern werden zunächst Kanten extrahiert, durch Geradenstücke approximiert und Schnittpunkte bestimmt. Die 3D-Gebäudemodelle werden mit den GPS/INS Informationen in das Wärmebild projiziert und die Eckpunkte der Gebäudemodelle den vorher bestimmten Schnittpunkten zugeordnet. Basierend auf diesem Matching werden die Orientierungsparameter neu geschätzt um eine verbesserte Texturzuordnung zu erhalten. Die vorgestellte Methode wurde mit Bildsequenzen eines städtischen Gebietes, die von einem Hubschrauber aufgenommen wurden, getestet. An den Ergebnissen werden das Potenzial und die Grenzen des Verfahrens diskutiert.

1 Einleitung

1.1 Energieeffizienz

Die Energieeffizienz von Gebäuden ist aufgrund steigender Energiekosten, neuer Energiesparverordnungen und Klimaänderungen zu einem sehr wichtigen Thema geworden. Zur Verbesserung versucht man dabei nicht nur bessere Standards für Neubauten einzuführen, sondern auch die Zustände von Altbauten zu untersuchen. Für den Bau im Bestand ist besonders die Detektion und Dokumentation von Wärmelecks in der Gebäudehülle interessant. Die Abstrahlung der Gebäudehülle im infraroten Bereich kann durch Wärmebilder erfasst werden und die Schad- und Schwachstellen mit Methoden der Bildverarbeitung lokalisiert werden (KLINGERT, 2005, HOEGNER & STILLA, 2009).

1.2 Automatische Texturierung

Um Wärmebilder automatisch mit Gebäudeinformationen zu versehen und mit anderen Bilddaten zu kombinieren ist für die Messwerte ein räumlicher Bezug herzustellen. Dies kann beispielsweise durch eine Texturzuordnung von entsprechenden Flächen zu 3D Gebäudemodellen erfolgen. Weiterhin können in den Texturen Objekte, z.B. Wärmelecks, extrahiert werden und im 3D Gebäudemodell eingebettet werden (IWASZCZUK & STILLA, 2010).

Eine automatische Texturierung der 3D-Gebäudemodelle ist bei bekannter Orientierung des Aufnahmegerätes möglich. Näherungen für die Parameter der äußeren Orientierung werden in der Regel mit Navigationsgeräten aufgenommen und gespeichert. Dadurch kann eine direkte Georeferenzierung durchgeführt werden. Für die Messsysteme ist jedoch eine boresight & lever arm Kalibrierung notwendig (YASTIKLI & JACOBSEN, 2005; KOLECKI et al., 2010). Um außerdem eine Korrespondenz mit den im lokalen Koordinatensystem gespeicherten 3D-Gebäudemodellen zu ermöglichen, ist eine Transformation zwischen dem globalen und lokalen Koordinatensystem durchzuführen (SKALOUD & LEGAT, 2008).

Unter Verwendung eines kalibrierten DGPS/INS-Systems kann eine Genauigkeit für flugzeuggetragene Systeme von ca. 2-3 m in der Position und ca. 0.01 Grad in der Ausrichtung der Kamera erreicht werden (FEIT & BATES, 1994). Allerdings kann es besonders bei an Hubschraubern oder UAVs montierten Kameras, zu Vibrationen kommen, die sich auf das Kamerasystem übertragen und zu Ungenauigkeiten bei der Erfassung der Ausrichtung führen (STILLA et al., 2009, KOLECKI et al., 2010). Die Vibrationen spielen eine besonders große Rolle bei aus großer Entfernung mit großer Brennweite aufgenommenen Bildern.

1.3 „Model-to-Image“ Matching

Um relevante Strukturen in Wärmebildern in ihrer Position genau zu bestimmen, müssen auch die Texturen genau ausgeschnitten werden. Die durch ungenaue Erfassung der Orientierungsparameter der Kamera entstehenden Fehler können durch ein Matching von 3D-Gebäudemodellen mit Bildern ausgeglichen werden.

In den letzten Jahren wurden verschiedene Algorithmen für das „Model-to-Image“ Matching entwickelt. In einigen Arbeiten werden die Kanten im Bild den Kanten im Modell zugeordnet, um das 3D-Modell dem Bild anzupassen. FRUEH et al., 2004 extrahiert Kanten im Bild und projiziert das Modell mit zufälligen Orientierungsparametern ins Bild. Für jede Projektion wird ein Kantenmatching durchgeführt und bewertet. Die Orientierungsparameter, für die das Matching die beste Bewertung bekam, werden bei der Texturierung verwendet. Allerdings ist die Methode sehr rechenintensiv.

Weitere Probleme entstehen dadurch, dass die Kanten im einzelnen Bild nicht immer vollständig extrahiert werden können. Daher empfiehlt TIAN et al. (2008) ein Kantenmatching basierend auf zuverlässigen Punkten, die durch eine Qualitätsanalyse der gesamten Bildsequenz ausgewählt werden. DING et al. (2008) verwendet die Fluchtpunkte der vertikalen Linien und GPS-Daten für die grobe Berechnung der äußeren Orientierung der Kamera. Danach werden die angenäherten Parameter durch ein Matching von „orthogonalen Eckpunkten“ verfeinert.

In diesem Beitrag wird, in Anlehnung an STILLA et al. (2000), eine Methode zum Matching von 3D Gebäudemodellen mit Wärmebildern präsentiert. Dafür müssen zuerst die Bildmerkmale extrahiert werden, was im Kap. 2.1 erklärt wird. Danach wird das im Kap 2.2 beschriebene Matching durchgeführt. Unsere Methode wird mit dem im Kap.3 beschriebenen Datensatz getestet (Kap. 4). Zum Schluss werden die Ergebnisse im Kap. 4 vorgestellt und im Kap.5 diskutiert.

2 Methode

2.1 Extraktion von Bildmerkmalen

Bei der Extraktion von Objekten aus Wärmebildern ist insbesondere die Erscheinung der Objekte zu berücksichtigen. So fällt beispielsweise auf dass, besonders die Kanten zwischen Wänden und Dächer, sowie manche Dachstrukturen automatisch detektiert werden können (siehe Abb. 2a). Allerdings werden die Kanten nicht vollständig bis zu dem Eckpunkt extrahiert. Da Dächer, aufgrund der Aufnahmegeometrie, in den Bildern gut erkannt werden können, werden aus dem Gebäudemodell nur die Dachstrukturen für das Matching berücksichtigt.

Zunächst werden Kanten mit Geradenstücken approximiert. Danach werden die Geradenstücke in drei Gruppen eingeteilt: kurze, mittlere und lange. Für die weitere Verarbeitung wird die Gruppe der langen Linien verwendet, weil hier vermutet wird, dass sie am zuverlässigsten sind. Die Eckpunkte im Bild werden als Schnittpunkte der Verlängerungen der Geradenstücke berechnet. Die Schnittpunkte werden nur für die Geradenstücke berechnet, die sich unter dem Winkel $a \in [a_{min}, 180^\circ - a_{min}]$ scheiden, wobei a_{min} einen bestimmten Schwellenwert für den Winkel a darstellt. Nahezu parallele Kanten werden bei der Verschneidung ausgeschlossen. Der Schnittpunkt wird nur dann akzeptiert, wenn er nicht weiter als d_{max} von den Endpunkten der beiden Geradenstücke entfernt liegt.

2.2 Matching

Die 3D-Gebäudemodelle werden mit den näherungsweise bestimmten Parametern der Orientierung ins Bild projiziert und für jeden projizierten Eckpunkt wird ein kreisförmiger Suchbereich bestimmt. In diesem Suchbereich wird nach einem korrespondierenden Schnittpunkt, der aus den Geraden berechnet wurde, gesucht. Es können mehrere solche Schnittpunkte mit einem Modellpunkt korrespondieren, aber nicht umgekehrt. Sollen mehrere Eckpunkte mit einem Schnittpunkt korrespondieren, wird der Eckpunkt verknüpft, der sich am nächsten am Schnittpunkt befindet. Auf Basis von gefundenen Korrespondenzen werden die äußeren Orientierungsparameter durch Minimierung der kleinsten Quadrate neu berechnet.

3 Datenbeschreibung

3.1 IR-Bildsequenzen

Die IR-Daten wurden während einer Flugkampagne über einem dicht bebauten Bereich mit einer im Hubschrauber montierten Kamera vom Typ AIM 640 QLW FLIR aufgenommen. Die Frequenz des Videostroms lag bei 25 Bildern pro Sekunde. Die Flughöhe betrug ca. 400 m über Grund und die Bilder wurden schräg nach vorne unter einem Pitch-Winkel von ca. 45° aufgenommen. Der Hubschrauber flog viermal über das Testgebiet „TUM“, das die Gebäude der Technischen Universität München enthält. Dadurch wurden die Gebäude von vier Richtungen aufgenommen (siehe Abb.1).

3.2 GPS/INS

Der Hubschrauber verfügte über ein GPS/INS Navigationssystem vom Typ Applanix POS AV 510. Für die Zeit der Überfliegung waren keine DGPS-Korrekturen verfügbar. Das Projektionszentrum der Kamera war im Verhältnis zur Antenne des Navigationsgerätes versetzt. Die innere Orientierung der Kamera war nur ungefähr bekannt. Daher wurde eine erweiterte Systemkalibrierung mit der Berechnung von boresight & lever arm Parametern (STILLA et al., 2009, KOLECKI et al., 2010) durchgeführt.

3.3 3D-Gebäudemodelle

Die 3D-Gebäudemodelle wurden im Detailierungsgrad LOD2 aus Luftbildern semi-automatisch mithilfe des Programmes INJECT erstellt. Die Genauigkeit des Gesamtmodells in der Position beträgt weniger als 1 m. Die 3D-Daten wurden in das *CityGML*-Format übersetzt (Abb.1).

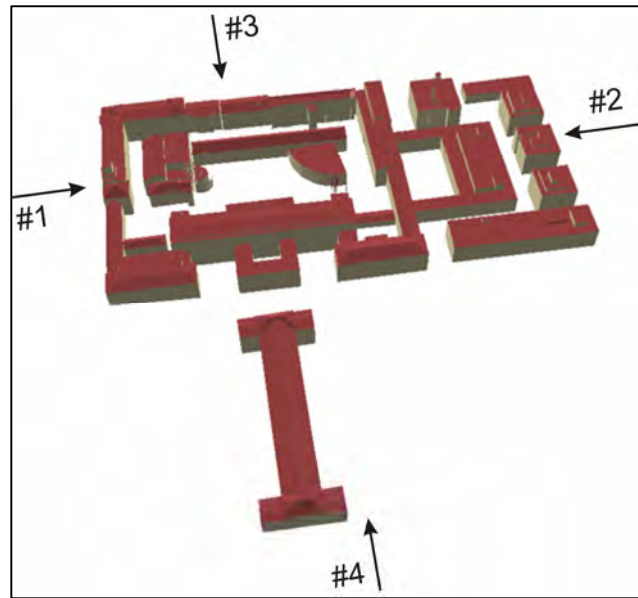


Abb. 1: Überflug in vier Richtungen

4 Experimente

Die im Kap. 2 präsentierte Methode wurde mit den beschriebenen Daten getestet. Zunächst wurden die Geradenstücke in einem Bild (Streifen #4) im Programm MVTEC Halcon extrahiert. Danach wurden die Geradenstücke in drei Gruppen aufgeteilt (siehe Abb. 2a). Die roten (kurzen) Geradenstücke wurden für die Extraktion der Schnittpunkte nicht berücksichtigt, da ihnen oft keine im Modell entsprechenden Strukturen zugeordnet werden können.

Im nächsten Schritt wurde das 3D-Gebäudemodell mit den aus der Kalibrierung verbesserten Orientierungsparametern ins Bild projiziert. Die für das Matching verwendeten Dachstrukturen sind in Abb. 2b rot dargestellt.

Zur Veranschaulichung wurde ein Gebäudeteil mit den Strukturen im Bild gematcht (siehe Abb. 3). Die Anfangsprojektion stimmte mit den Strukturen im Bild nicht exakt überein. Es wurden fünf korrespondierende Punkte gefunden (Abb. 3a) und die äußeren Orientierungsparameter wurden neu berechnet. Das 3D-Modell wurde nochmal mit den verfeinerten Parametern projiziert (dunkelblau in Abb. 3b). Die Position des Modells im Bild wurde verbessert, und dadurch die Extraktion von genaueren Texturen ermöglicht.

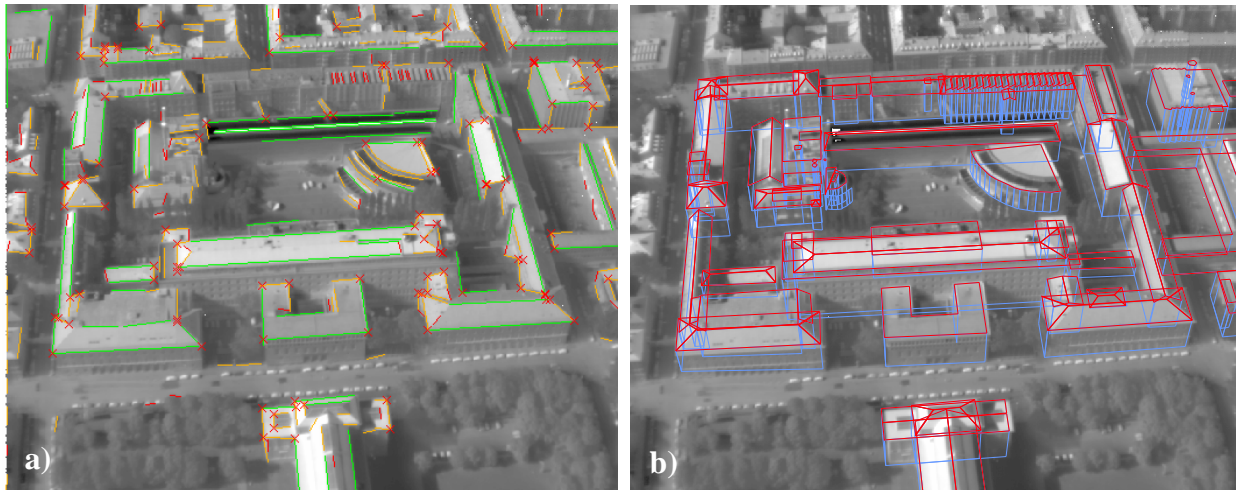


Abb. 2: Ein Beispielbild (#13200) aus dem IR-Bildsequenzen a) mit extrahierten und klassifizierten Geradenstücken (grün – lange, orange – mittlere, rot – kurze); b) mit den projizierten 3D-Gebäudemodellen: Dächer in rot, andere Kanten in blau

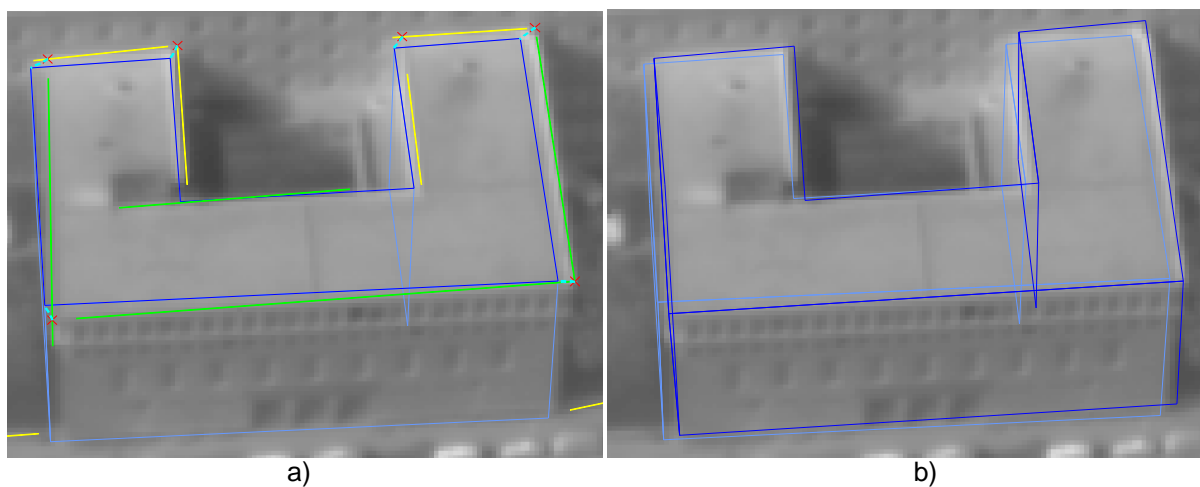


Abb. 3: a) Extrahierte Geradenstücke (grün und gelb), Schnittpunkte (rot), projizierte Modellkanten (dunkelblau und blau) und Korrespondenzen (Cyan); b) projiziertes Modell mit ursprünglichen Orientierungsparametern (blau) und nach dem Matching (dunkelblau)

5 Ergebnisse

Die Bestimmung der Parameter der äußeren Orientierung wurde durch Matching aller im Bild befindlichen Objekten durchgeführt. Gegenüber der Projektion des vorderen Gebäudeteils, konnte keine Verbesserung festgestellt werden. Dies kann einerseits mit den Ungenauigkeiten und Mängeln im Modell zusammenhängen (siehe Kap. 6). Andererseits kann dieses Problem mit der Ausgleichsmethode verbunden sein, da die Methode der kleinsten Quadrate nicht robust gegenüber Ausreißer ist.

Weiterhin wurde die Robustheit der Methode untersucht, indem die ursprünglichen Orientierungsparameter von 95 ausgewählten Bildern (Streifen #4) geändert wurden und mit einem Teilmodell getestet, sowie visuell evaluiert wurden. Der Algorithmus wurde als robust klassifiziert, wenn die Lage des projizierten Modells im Bild nach der Verbesserung der Orientierungsparameter besser mit den Bildstrukturen gepasst hat als vorher. Für die Bewertung der Robustheit wurde ein Faktor r als Anzahl der erfolgreichen Matchings geteilt durch die Anzahl der Proben definiert. Die Ergebnisse (Tab. 1) zeigen, dass die Robustheit des Algorithmus bei der Verschiebung um ca. 4 m oder Rotation um ca. 50° deutlich sinkt.

Die Robustheit der Methode kann durch eine iterative Prozedur verbessert werden. Nach der

Translation	$d_x=d_y=d_z$ [m]				
	+1	+2	+3	+4	+5
r	1.00	1.00	0.92	0.65	0.16
Verstellung des Winkels	$d_{roll}=d_{pitch}=d_{yaw}$ [°]				
	+10	+20	+30	+40	+50
r	1.00	1.00	0.97	0.93	0.61

Tab. 1: Robustheit der Methode

ersten Berechnung werden für Projektion und Matching in der Iteration i die Orientierungsparameter von $i-1$ verwendet (Abb. 4). Praktisch werden drei Iterationen eingesetzt. Wenn das mit den ursprünglichen Orientierungsparametern projizierte Modell zu weit von den korrespondierenden Bildstrukturen entfernt liegt, kommt es zu vielen Fehlzuordnungen und die richtige Position kann nicht berechnet werden (Abb. 5).

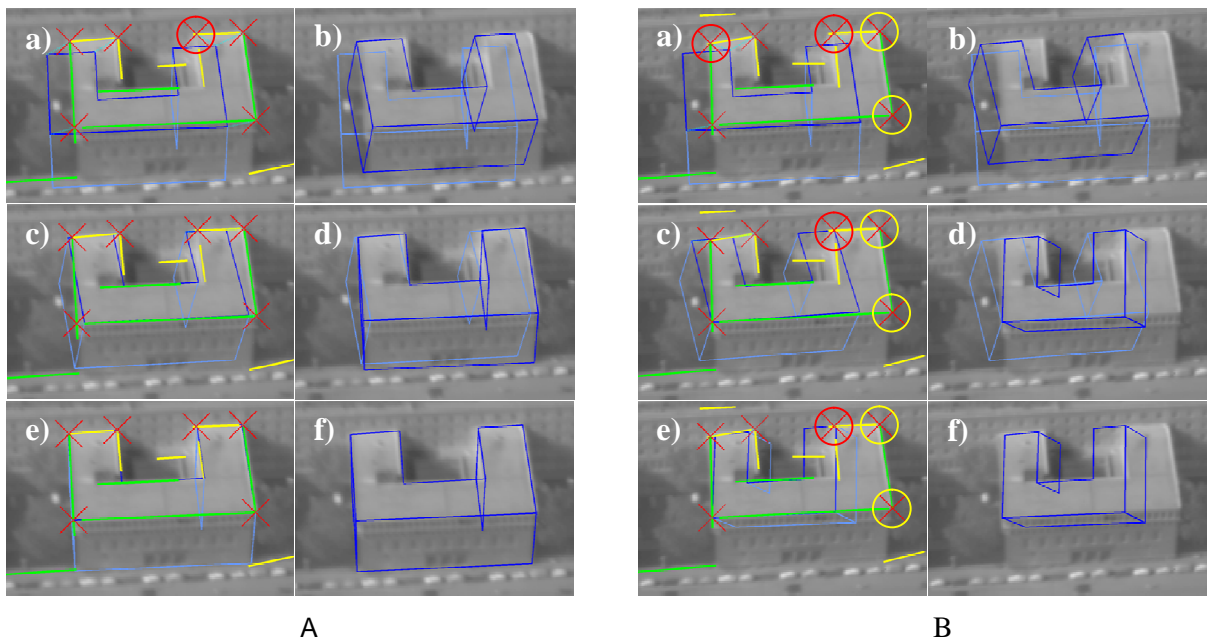


Abb. 4: A – Robustes Matching mit Verbesserung der Position des Modells im Bild; B – keine Verbesserung durch Matching. Für A und B: In einer Reihe wird eine Iteration dargestellt. In a,c,e sind extrahierte Geradenstücke (grün und gelb), Schnittpunkte (rote Kreuze), Korrespondenz (Cyan), falsche Zuordnung (rote Kreise) und keine Zuordnung (gelbe Kreise) dargestellt. In b,d,f - projiziertes Modell mit ursprünglichen Orientierungsparametern (blau) und nach dem Matching (dunkelblau)

6 Diskussion

Die Ergebnisse werden unter anderen durch die Ungenauigkeiten der 3D-Modelle beeinflusst. Der für die Tests verwendete 3D-Datensatz beinhaltet Fehler in der Modellierung, von denen einige in der Abb. 5 dargestellt sind. Die Mängel entstanden durch die semiautomatische Modellierung, sowie durch Umwandlungen zwischen den Formaten. So werden z.B dieselben Ecken in verschiedenen Gebäudeteilen durch unterschiedliche Koordinaten repräsentiert.

Als Folge dessen entstehen im Modell mehrere dicht beieinanderliegende Punkte, die eigentlich einem Punkt in der Realität entsprechen. Dies kann zu falscher Zuordnung von Punkten führen.

Ein weiteres Problem ist in Abb. 5b gezeigt. Ein Dach besteht aus kleinen sich wiederholenden vertikal-schrägen Strukturen, die zu Fehlzuordnungen führen. Solche Strukturen sind für ein Matching ungeeignet und müssten vorher ausgeschlossen werden.

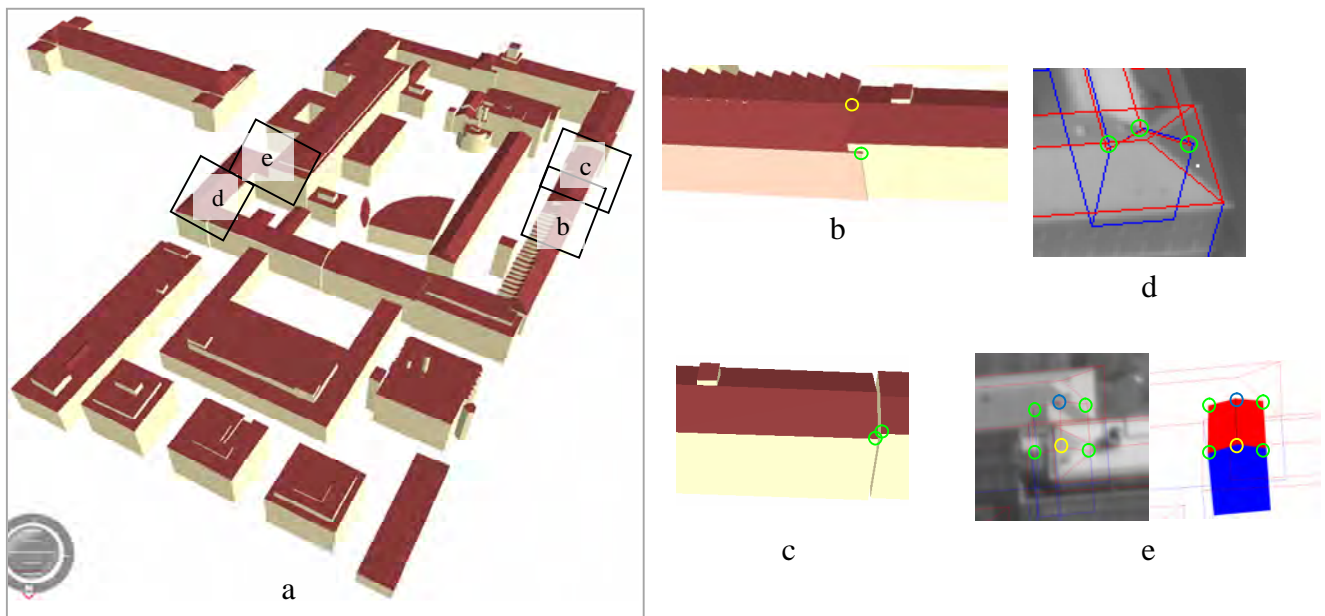


Abb. 5: Ungenaue Modellierung des Modells kann die Ergebnisse beeinflussen: a) Übersichtsbild der 3D-Gebäudemodelle mit markierten Problemstellen (b-e); b) Überlappung von Gebäuden und Dächern; c) Abstand und Drehung zwischen Gebäuden; d) der Dach endet nicht exakt an der Wand oder Dach des Nachbarhauses; e) komplizierte Dachstrukturen werden als Gebäude im Gebäudemodelliert, wobei in manchen Fällen entspricht das Modell nicht dem wirklichen Aussehen

7 Zusammenfassung

In diesem Beitrag wurde eine Methode für ein „Model-to-Image“ Matching vorgestellt. Das Verfahren basiert auf Punktkorrespondenzen zwischen den projizierten 3D-Gebäudemodellen und den im Bild extrahierten Punkten. Diese Methode ist für Korrekturen von kleinen Unterschieden zwischen Bildstrukturen und projizierten Modellelementen geeignet. Bei ungenauen Anfangsparametern für die Projektion ($>5\text{m}$) liefert die Methode allerdings keine befriedigenden Ergebnisse.

8 Danksagung

Die Autoren danken FGAN-FOM für die Bereitstellung der IR-Daten und dem DAAD für die Unterstützung der Forschung durch ein Stipendium für D. Iwaszczuk.

9 Literaturverzeichnis

- DING, M. & ZAKHOR, A., 2008: Automatic registration of aerial imagery with untextured 3D LiDAR models, IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Anchorage, Alaska, June 2008
- FEIT, C.M. & BATES, M.R., 1994: Accurate positioning in a flight inspection system using Differential Global Navigation Satellite Systems. Satellite Division of the Institute of Navigation 7th International Technical Meeting, ION GPS-94, September 20-23, Salt Lake City, Utah
- FRUEH, C., SAMMON, R. & ZAKHOR, A., 2004: Automated Texture Mapping of 3D City Models With Oblique Aerial Imagery, Proceedings of the 2nd International Symposium on 3D Data Processing, Visualization, and Transmission (3DPVT'04)
- HOEGNER, L. & STILLA, U., 2009: Thermal leakage detection on building facades using infrared textures generated by mobile mapping. Joint Urban Remote Sensing Event (JURSE 2009), IEEE
- IWASZCZUK, D. & STILLA, U., 2010: Anreicherung der Gebäudehüllen mit Oberflächenstrukturen in CityGML. Mitteilungen des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie (im Druck)
- KLINGERT, M., 2005: Methoden der digitalen Bildverarbeitung in der Infrarotbauwerksthermografie. In: Forum Bauinformatik (Hrsg.: F. Schley, L. Weber), Lehrstuhl Bauinformatik, BTU Cottbus: S.287-294
- KOLECKI, J., IWASZCZUK, D. & STILLA, U., 2010: Calibration of an IR camera system for automatic texturing of 3D building models by direct geo-referenced images. Eurocow 2010, Spain
- SKALLOUD, J. & LEGAT, K., 2008: Theory and reality of direct geo-referencing in national coordinates. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing 63 (2008). 272-282
- STILLA, U., KOLECKI, J. & HOEGNER, L., 2009: Texture mapping of 3D building models with oblique direct geo-referenced airborne IR image sequences. ISPRS Hannover Workshop 2009: High-resolution earth Imaging for geospatial information. 38(1-4-7/W5)
- STILLA, U., SÖRGEL, U. & JÄGER, K., 2000: Generation of 3D-city models and their utilisation in image sequences. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. Vol. 33, Part B2, 518-524
- TIAN, Y., GERKE, M., VOSSELMAN, G. & ZHU, Q., 2008: Automatic Edge Matching Across an Image Sequence Based on Reliable Points. In: J. Chen, J. Jiang and W. Förstner (Editors), the International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science Beijing, pp. 657-662
- YASTIKLI, N. & JACOBSEN, K., 2005: Direct sensor orientation for large scale mapping – potentials, problems, solutions. The Photogrammetric Record 20(111), September 2005: 274-284

Untersuchung der Effizienz und Akzeptanz von 2D- und 3D-Kartenvarianten für die Innenraumnavigation

ALEXANDRA LORENZ¹, CORNELIA THIERBACH², THOMAS H. KOLBE¹ & NINA BAUR²

Zusammenfassung: In einer Kooperation zwischen Geodäten und Soziologen wurde ein Nutzertest durchgeführt, welcher den Mehrwert von 3D-Karten gegenüber herkömmlichen 2D-Karten für die Navigation in Innenräumen untersucht. Durch einen Methoden-Mix aus quantitativen Methoden (standardisierte Befragung) und qualitativen Methoden (schwach strukturierte Beobachtung) konnten unterschiedliche Aspekte beleuchtet werden: Stärken und Schwächen der Darstellung in drei Dimensionen, Nutzerverhalten während der Navigation in Abhängigkeit von den zur Verfügung stehenden Informationen sowie das Verhältnis zwischen Effizienz und Akzeptanz unterschiedlicher Kartendarstellungen. Der vorliegende Artikel stellt die Ergebnisse der Testauswertung vor und diskutiert die daraus abgeleiteten Erkenntnisse für die Gestaltung von Navigationskarten für Innenräume.

1 Einleitung

Dank moderner Erfassungsmethoden liegen immer mehr Modelle von einzelnen Gebäuden und ganzen Städten in 3D vor. Ein Beispiel ist das Berliner 3D-Stadtmodell, welches auf CityGML, einem internationalen Standard für 3D-Stadtmodelle (GRÖGER ET AL., 2008) beruht. Neben ihrem Einsatz in der Stadtplanung, im Katastrophenschutz, für Netzwerkplanungen (z.B. Funknetzplanung) oder auch für Simulationen, werden 3D-Stadtmodelle seit einigen Jahren immer öfter als Datenbasis für Navigationssysteme genutzt (BECKER ET AL., 2008; GOGO 3D, 2010; TELEATLAS, 2010). Untersuchungen über den tatsächlichen Mehrwert von 3D-Karten gegenüber herkömmlichen 2D-Karten für die Navigation liegen kaum vor. Aus eigener Erfahrung weiß man aber, dass die dritte Dimension vor allem dann wertvoll wird, wenn die Bewegung nicht mehr ausschließlich in einer konzeptionellen Ebene stattfindet. Diese Form der Bewegung wird vor allem dann relevant, wenn man sich nicht mehr zwischen Gebäuden, sondern im Inneren von Gebäuden aufhält. Durch den Stockwerkscharakter bewegen wir uns nicht mehr primär horizontal, sondern ebenso vertikal. Durch die Bewegung in allen drei Raumdimensionen liegt die Vermutung nahe, dass die Verwendung von 3D-Darstellungen für die Innenraumnavigation nicht nur Modeerscheinung, sondern auch inhaltlich begründet ist.

In einer Kooperation zwischen dem Institut für Geodäsie und Geoinformationstechnik und dem Institut für Soziologie werden an der TU Berlin derzeit folgende Forschungsfragen bearbeitet: „Wann ist die dritte Dimension bei Kartendarstellungen für Innenraumnavigation von Nutzen?“, „Wie müssen Karten für Innenräume beschaffen sein, um effektiv die Wegfindung zu unterstützen?“ und „Welche Praktiken nutzen Menschen, um sich in Innenräumen zu orientieren?“

1) Institut für Geodäsie und Geoinformationstechnik, Technische Universität Berlin, Sekr. H12, Straße des 17. Juni 135, 10623 Berlin; E-Mail: alexandra.lorenz@tu-berlin.de, thomas.kolbe@tu-berlin.de

2) Institut für Soziologie, Technische Universität Berlin, Sekr. FR 2-5, Franklinstraße 28/29, 10587 Berlin; E-Mail: cornelia.thierbach@soz.tu-berlin.de, nina.baur@tu-berlin.de

Die Kooperation ermöglicht es, das Wissen um die Bereiche Kartengestaltung und Produktevaluation zu kombinieren und in einen iterativen Prozess einzubinden. Kern dieses Prozesses sind umfangreiche Nutzertests mit großen Probandengruppen, welche die Effektivität und Akzeptanz von unterschiedlichen Kartendarstellungen (2D und 3D) für die Innenraumnavigation untersuchen. Aus dem Nutzerverhalten und der Beurteilung der Karten werden Rückschlüsse auf die Stärken und Schwächen der jeweiligen Kartenvariante gezogen und Schlüsselstellen entlang der Route identifiziert.

Dieser Artikel beschreibt den Aufbau des ersten Nutzertests, die verwendeten Kartenvarianten, die Darstellung und Analyse der erzielten Testergebnisse sowie deren Verallgemeinerung in Form von neuen Erkenntnissen für die Kartengestaltung.

2 Der Test

Erste Antworten auf die oben genannten Forschungsfragen konnten auf Basis eines Nutzertests gefunden werden, welcher im Rahmen der Langen Nacht der Wissenschaften 2009 an der TU Berlin durchgeführt wurde (LNDW, 2009). Getestet wurden dabei vier Kartenvarianten, welche 2D- bzw. 3D-Darstellungen von zuvor festgelegten Routen durch das Hauptgebäude der TU Berlin enthielten. Die Erstellung dieser Karten war Teil einer Lehrveranstaltung am Institut für Geodäsie und Geoinformationstechnik, die Datenerhebung und Datenauswertung Teil einer Lehrveranstaltung am Institut für Soziologie. Die Planung und Durchführung sollen im Folgenden erläutert werden.

2.1 Methodik

Der Nutzertest wurde in Form eines sozialwissenschaftlichen Experimentes durchgeführt. Bei einem Experiment handelt es sich um eine Untersuchungsordnung, die versucht, Kausalbeziehungen eindeutig zu identifizieren (BEHNKE ET AL. 2006, S. 29-50, ATTESLANDER 2006, ZIMMERMANN 1972, S. 37). Der Aufbau des durchgeführten Experimentes ist in Abb. 1 dargestellt. Aufgabe der Testteilnehmer (Rekrutierten) ist es, den Weg vom Startpunkt (Haupteingang des TU-Hauptgebäudes) zum Zielpunkt (Geodätenstand auf dem Dach des TU-Hauptgebäudes) mit Hilfe einer an sie zufällig zugeteilten Karte (2D oder 3D) so schnell wie möglich zu finden.

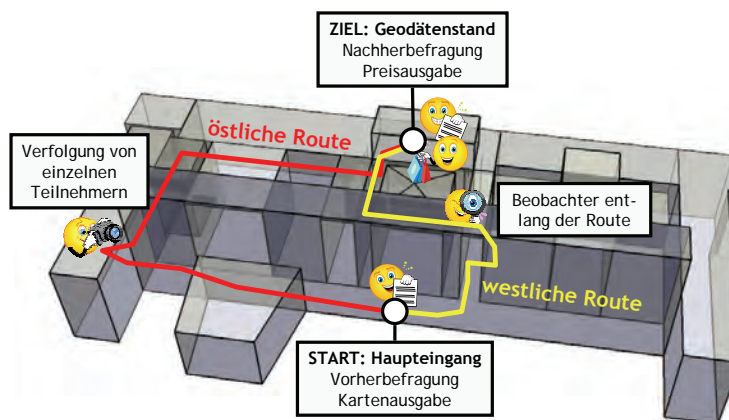


Abb. 1: Der Aufbau des Experimentes im Hauptgebäude der TU Berlin

Ein erstes Kernelement des sogenannten experimentellen Designs ist die sogenannte *Drittvariablenkontrolle*: Es wird versucht, alle Einflüsse bis auf den zu untersuchenden (die Wirkung von 2D- und 3D-Karten auf das Orientierungsverhalten) auszuschließen. Im vorgestellten Experiment wurden hierzu vier Mittel eingesetzt:

- Am Startpunkt nahm jeder Teilnehmer an einer standardisierten Vorher-Befragung teil, bei der Vorerfahrungen und soziodemografische Daten abgefragt werden. Am Zielpunkt wurde eine ebenfalls standardisierte Nachher-Befragung durchgeführt, welche auf Fragen und Kommentare zur Karte sowie auf mögliche Störungen (z.B. Wegunterbrechungen) bei der Wegsuche fokussierte.
- Da möglicherweise nicht nur die Gestaltung der Karte, sondern auch die Eigenschaften der Strecke das Endergebnis beeinflussen, wurden äquivalente Karten für zwei sehr unterschiedliche Strecken entwickelt. Es gab also insgesamt vier Kartenvarianten: jeweils eine 2D- und eine 3D-Variante für die östliche und die westliche Route.
- Es fand eine Randomisierung statt, d.h. nachdem die Versuchsteilnehmer den Fragebogen ausgefüllt hatten, starteten jeweils zwei Rekrutierte gleichzeitig auf parallelen Routen. Die Zuteilung zur Route und Karte erfolgte dabei zufällig, so dass alle vier Teilgruppen etwa gleich groß waren.
- Entlang der Routen waren an verschiedenen Standorten Beobachter postiert, welche mittels einer nicht teilnehmenden, offenen und schwach strukturierten Beobachtung untersuchten, ob die Teilnehmer richtig laufen und wie sie sich orientieren (LAMNEK, 2005). Schwierigkeiten bei Beobachtungen sind die verzerrte und selektive Wahrnehmung der Beobachter sowie die mögliche Beeinflussung des Beobachteten (BEHNKE ET AL., 2006).

Ein zweites Kernelement des experimentellen Designs ist die Aufteilung der Probanden in verschiedene *Experimentalgruppen*, welche jeweils ein unterschiedliches *Treatment* erfahren. In unserem Fall handelt es sich um faktorielles Design ohne Kontrollgruppe. Das Treatment bestand aus einer von vier Karten, die den Probanden ausgehändigt wurde, nachdem sie den Vorher-Fragebogen ausgefüllt hatten. Sowohl am Startpunkt, als auch am Endpunkt wurde die Zeit gemessen (*Vorher-* und *Nachher-Messung*), um auf dieser Basis die Wegzeit berechnen zu können.

Die Teilnehmer zu rekrutieren war insofern nicht schwer, als das Experiment im Rahmen der Langen Nacht der Wissenschaft stattfand: Die Besucher hatten Eintritt bezahlt, um neuste wissenschaftliche Entwicklungen kennenzulernen. Da es am besagten Abend aber ein umfangreiches Alternativangebot an Veranstaltungen gab, lieferten wir weitere Anreize zur Teilnahme: Viele Kinder und Jugendliche waren an dem Mini-Wettkampf interessiert. Als zusätzliche Motivation für die Teilnahme gab es kleine Preise für die Sieger der Parallelstarts sowie die Möglichkeit für alle Teilnehmer, an einer Tombola teilzunehmen, in der Bücher und ein Navigationsgerät verlost wurden. Vor allem ältere Besucher ließen sich durch die Möglichkeit locken, den Ausblick über Berlin bei einem Getränk zu genießen. Außerdem gab es am Ziel weitere Stände zu besichtigen.

Insgesamt gelang es, über 500 Teilnehmer zu rekrutieren und somit eine hinreichend große Stichprobe zu erfassen, um statistisch belegte Aussagen über diverse Teilmengen wie Alters- und Interessensgruppen treffen zu können. Durch den Methoden-Mix aus quantitativen Methoden (standardisierte Befragung) und qualitativen Methoden (schwach strukturierte Beobachtung) ist es möglich, zielgerecht unterschiedliche Arten von Fragestellungen zu beantworten. So waren die quantitativen Daten vor allem für die Kartenbewertung wichtig und die qualitativen Daten für die Identifizierung von schwierigen Passagen.

Laut FRIEDRICHS (1985) muss man bei sozialwissenschaftlichen Experimenten mit Problemen rechnen, die zum einen vom Versuchsleiter, zum anderen von den Teilnehmern ausgehen können. Wenn die Ergebniserwartungen des Versuchsleiters auf die Teilnehmer auswirken, spricht man vom *experimenter bias*. Des Weiteren wird der Versuchsleiter teilweise als Stimulus angesehen, welcher durch seine Persönlichkeitsmerkmale und soziale Herkunft die Teilnehmer unbewusst beeinflusst. Um diese Fehlerquellen zu vermeiden, wurden alle Mitarbeiter intensiv geschult und hinsichtlich Verhalten und Anweisungsformulierung genau instruiert. Als *demand characteristics* bezeichnet man die Anpassung des Nutzerverhaltens an die Erwartungshaltung des Versuchsleiters. Auch wenn die Erwartung nicht geäußert wird, interpretieren die Teilnehmer die Situation. Durch die große Anzahl an mitwirkenden Mitarbeitern kann man aber von einer Relativierung der Einzelinterpretationen ausgehen.

Darüber hinaus zu beachten sind die Fehlerquellen interne und externe Validität. Die interne Validität bezieht sich auf die Eindeutigkeit der Messung, welche nicht gegeben ist, wenn unkontrollierte Variablen in die Messung mit eingehen. Die externe Validität drückt die Generalisierbarkeit der Ergebnisse aus (FRIEDRICHS 1985). Bei unserem Nutzertest handelt es sich um ein sogenanntes Feldexperiment, welches den Vorteil hat, realitätsnäher zu sein (also eine höhere externe Validität aufzuweisen). Ein Nachteil besteht darin, dass eine vollkommene Drittvariablenkontrolle niemals möglich und damit die interne Validität durch unvorhergesehene Faktoren gefährdet ist. Um diese zu erkennen und berücksichtigen zu können, wurden während der Navigation Beobachtungen durchgeführt. Es wurden einerseits Streckenabschnitte entlang der beiden Routen festgelegt, um das Orientierungsverhalten der Teilnehmer stationär zu überprüfen (Beobachtungspunkte) und andererseits Teilnehmer stichprobenweise über die gesamte Strecke hinweg beschattet. Die Auswahl der Beobachtungspunkte erlaubte die Beobachtung während entscheidender Orientierungsphasen: bei der initialen Richtungsbestimmung am Startpunkt sowie an verzweigten Stellen, an denen die richtige Abzweigung genommen werden musste. Beobachtet wurden auf diese Weise unvorhergesehene Faktoren wie die Einbeziehung von externen Quellen in die Wegfindung (Erfragen des Weges, Positionsverifikation anhand von Fluchtplänen, Absolvierung von Wegstrecken in Gruppen, etc.).

2.2 Teilnehmer

An dem Experiment haben offiziell $n = 548$ Personen teilgenommen, d.h. die Karten getestet und Fragebögen ausgefüllt. Da die Teilnehmer teilweise in Grüppchen (zusammen mit Partnern, Freunden oder Kindern) starteten, ist die tatsächliche Teilnehmerzahl noch höher anzusetzen. Für die Auswertung der Karten entscheidend ist jedoch die Zahl der Befragten, also die offizielle

Teilnehmerzahl. Der Anteil der Männer war mit 59% erwartungsgemäß etwas höher als jener der Frauen. Abb. 2 zeigt die Aufteilung auf die teilnehmenden Altersklassen. Aufgrund der nicht barrierefreien Routenwahl wurden gehschwache Personen von vornherein ausgeschlossen.

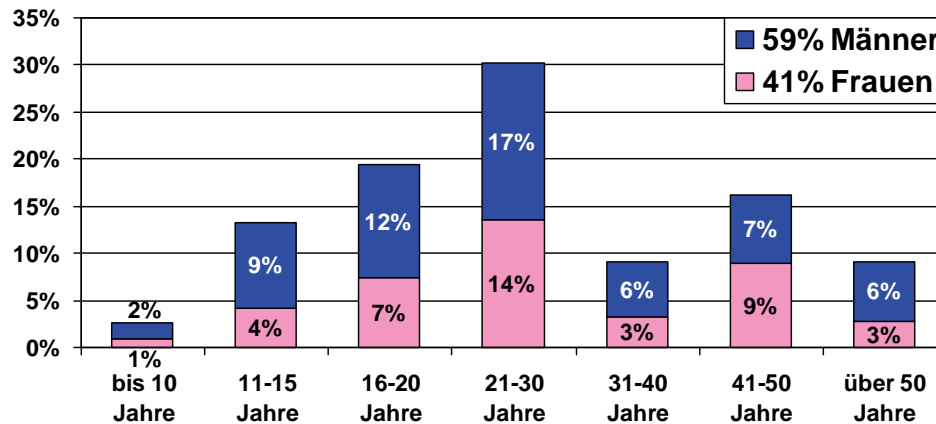


Abb. 2: Altersverteilung der Teilnehmer

2.3 Kartenvarianten

Im Vorfeld des Experiments wurden zwei Routen ausgewählt, welche vom Haupteingang des TU-Hauptgebäudes über Schleichwege zum Geodätenstand auf dem Dach der TU führen. Beide Routen führen durch Teile des Alt- und Neubaus, die Benutzung von Aufzügen ist nicht vorgesehen und die Längen sind nahezu identisch. Vortests haben ergeben, dass die Routen ohne Vorwissen in etwa drei Minuten absolvierbar sind. Für beide Routen wurden jeweils zwei Kartenvarianten erstellt: eine 2D- und eine 3D-Darstellung (Abb. 3 bis 6). Als Grundlage dienten Stockwerkspläne des TU-Hauptgebäudes, die anhand ihrer Raumhöhe extrudiert und zu einem Gesamtgebäudemodell zusammengesetzt wurden. Entlang der Route wurden Texturen in das Modell eingepflegt um einen möglichst realitätsnahen Eindruck zu vermitteln und so den Wiedererkennungseffekt zu erhöhen. Als zusätzliche Information wurden an wichtigen Entscheidungspunkten Fotos der Umgebung eingebunden. Die grafische Gestaltung der 2D- und 3D-Karten wurde aufeinander abgestimmt, so dass der einzige Unterschied in der gewählten Perspektive (Grund- bzw. Schrägriss) und den dadurch ausgelösten Überdeckungsproblemen besteht.

Bei den getesteten Karten handelt es sich um Darstellungen von vorgegebenen Routen im Format A4. Im Gegensatz zu kleinen Displays, die typischerweise nur Routenteile im für die Navigation notwendigen Maßstab anzeigen, ist hier die gesamte Route auf einen Blick erfassbar. Die zusätzliche Abbildung eines Überblickplans wurde daher vorerst nicht für notwendig erachtet. Das Darstellungsmedium Papier, welches für einen Test in der beschriebenen Größenordnung als einziges praktikables Format erachtet wurde, zwingt den Karten – ähnlich wie Fluchplänen – einen statischen Charakter auf. Es gibt also keine Möglichkeit für Interaktionen zwischen Kartennutzer und Karteninhalt. Interaktive Karten können sich durch Verarbeitung von Positionierungsinformationen der Umgebung und durch Reaktion auf Nutzereingaben den individuellen Wünschen anpassen – die vorliegenden statischen Karten müssen eine eindeutige

und vollständig nachvollziehbare Routenverfolgung zulassen und alle notwendigen Zusatzinformationen von vornherein enthalten. Darin liegt die Herausforderung für die Kartenerstellung.

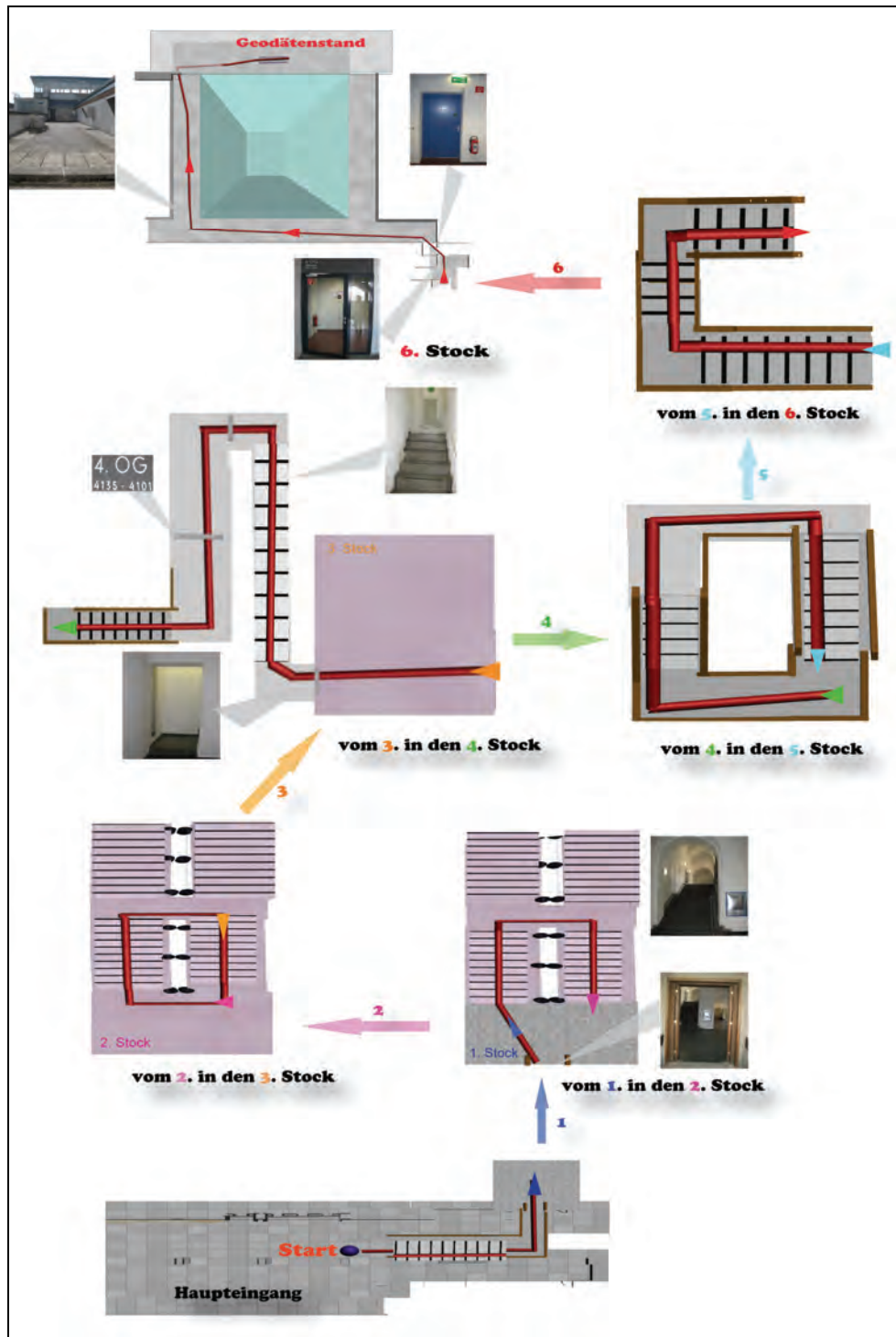


Abb. 3: Karte 1: Westliche Route durch das Hauptgebäude in 2D – durch die Perspektive bedingte Überlagerungen führten zu einer Segmentierung der Route

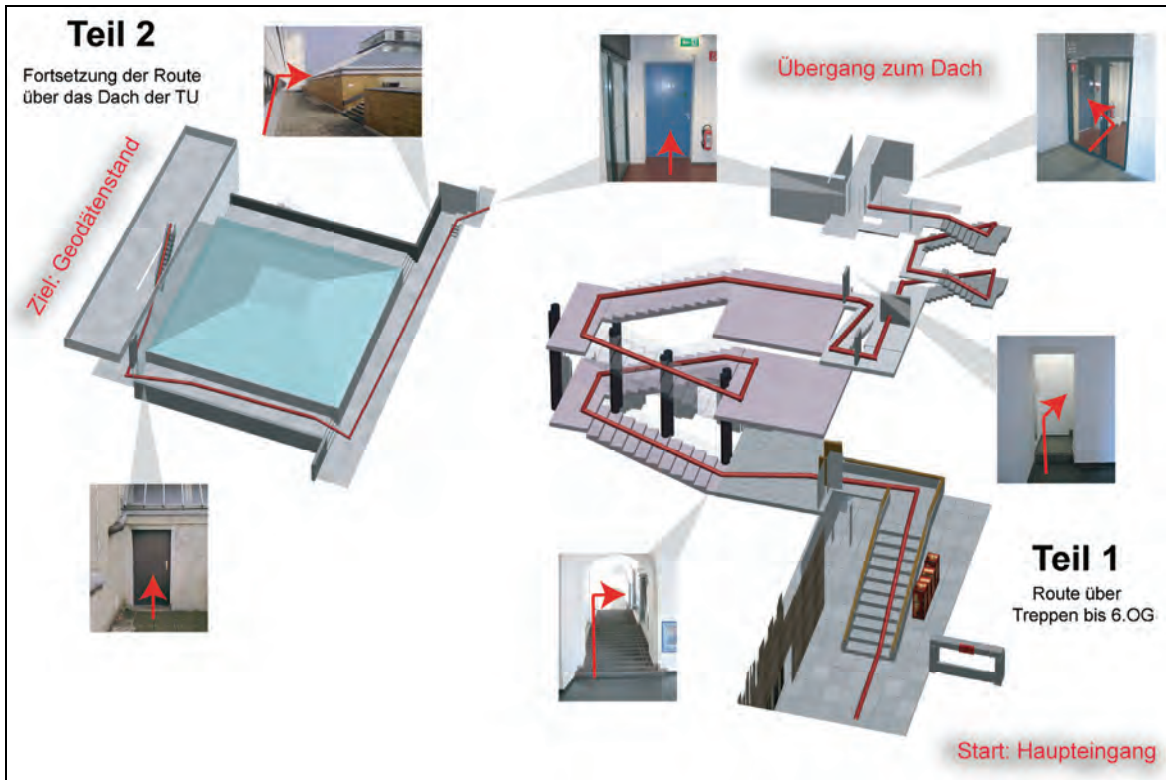


Abb. 4: Karte 2: Westliche Route durch das Hauptgebäude in 3D

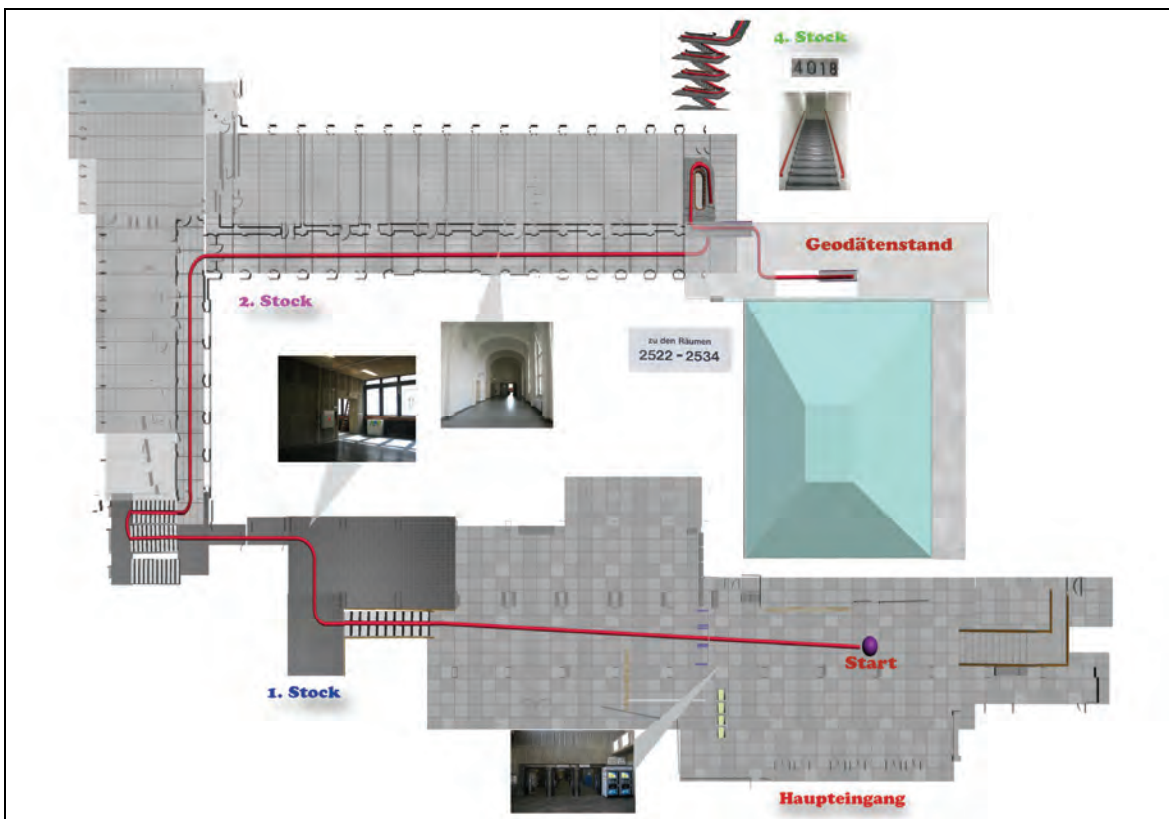


Abb. 5: Karte 3: Östliche Route durch das Hauptgebäude in 2D

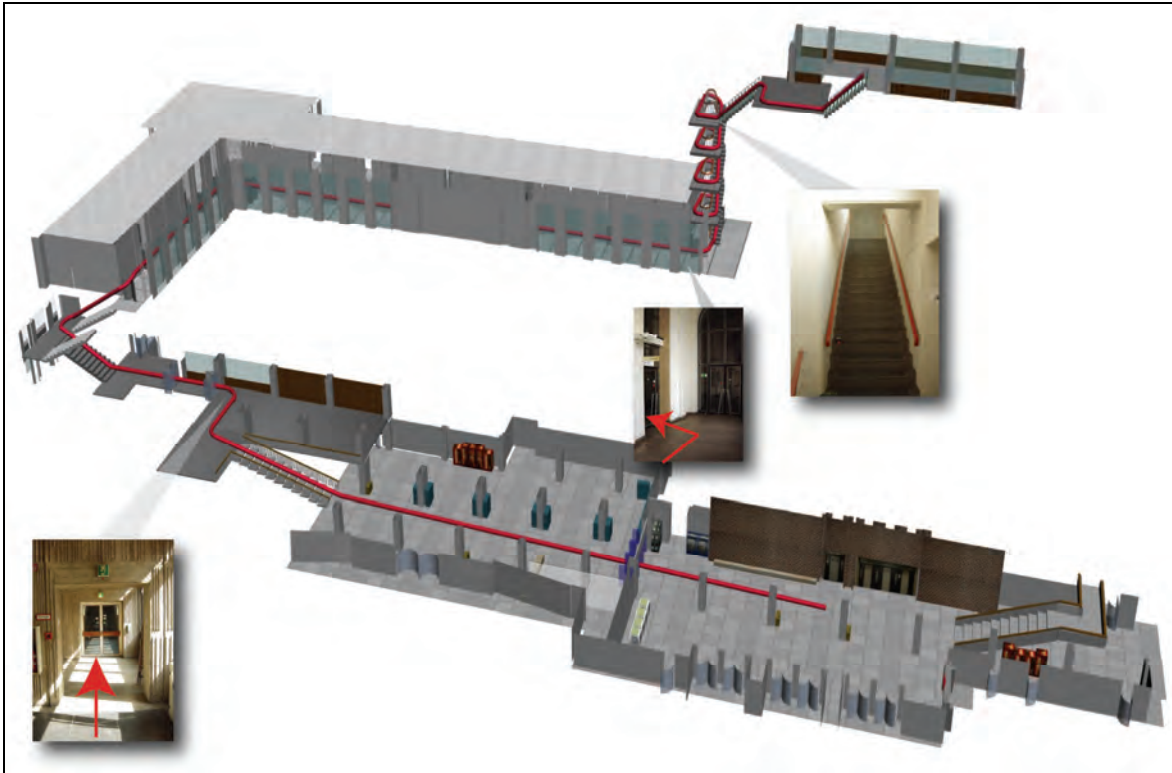


Abb. 6: Karte 4: Östliche Route durch das Hauptgebäude in 3D

3 Auswertung

Nach der Beschreibung der Motivation zur Durchführung des Experiments, dessen Aufbau und der getesteten Kartenvarianten, sollen nun die wichtigsten Ergebnisse vorgestellt, interpretiert und diskutiert werden.

3.1 Effektivität der Kartendarstellung – Wer kommt am schnellsten ans Ziel?

Ziel des Kooperationsprojekts ist es herauszufinden, wie Karten gestaltet werden müssen, damit Personen einen Weg so schnell wie möglich finden können. Als Referenzwert ist daher vor allem die Messung der Zeit von Interesse, welche die Probanden für die Bewältigung der Route benötigen. Untersuchungen zur Verteilung der Wegzeiten auf Altersgruppen und Geschlechter haben ergeben, dass nicht nur das Orientierungsvermögen und die körperliche Fitness zu schnellen Wegzeiten beigetragen hat, sondern zu einem großen Maß auch die Stärke des Wettbewerbsempfindens. So waren Jugendliche zwischen 16 und 20 Jahren sowie generell Männer tendenziell schneller und ließen sich weniger ablenken. Da diese Phänomene über alle Karten verteilt gleichmäßig beobachtet wurden, wird hier nicht näher auf unterschiedliche Altersgruppen und Geschlechter eingegangen. Weitere Phänomene, die sich auf die Wegzeiten ausgewirkt haben, sind Unterbrechungen entlang der Route (durch Gespräche, Toilettenbesuche oder die Besichtigung anderer Veranstaltungspunkte) sowie Verzögerungen beim Zieleinlauf wegen des unerwartet hohen Andrangs.

Entscheidend für unsere Fragestellung ist die Wegzeit bezogen auf die verschiedenen Kartenvarianten (Abb. 7). Der Vergleich der Wegzeiten für die beiden Routen zeigt keine deutlichen Unterschiede. Auf Route A (westliche Route) erreichten die Teilnehmer mit 3D-Karten deutlich bessere Wegzeiten als jene mit 2D-Karten. Das liegt vermutlich an dem stark segmentierten Charakter der 2D-Karten, welcher durch horizontal überlagerte Wegabschnitte bedingt ist. Auf Route B (östliche Route) sind die Wegzeiten für 2D- und 3D-Kartennutzer im Durchschnitt gleich: Die größere Anzahl an „sehr schnellen“ und „durchschnittlich schnellen“ Teilnehmern mit 2D-Karten werden durch mehr „schnelle“ Teilnehmer mit 3D-Karten ausgeglichen.

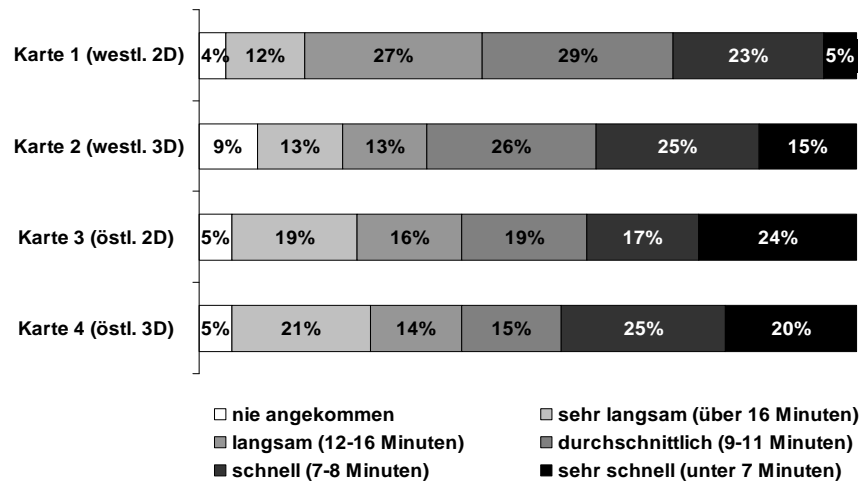


Abb. 7: Kategorisierte Wegzeiten für die einzelnen Karten

3.2 Bewertung der Karten

Für eine umfassende Einschätzung der Kartenqualität ist nicht nur die durchschnittliche Wegzeit von Interesse. Es sollte auch untersucht werden, mit welcher Karte sich die Teilnehmer am wohlsten bzw. sichersten fühlen und welche Kartenelemente dazu beitragen. Die Teilnehmer wurden daher in der Nachherbefragung aufgefordert, ihre jeweilige Karte durch Vergabe einer Schulnote, Beantwortung von Fragen zu Teilaspekten und offene Nennung von Stärken, Schwächen sowie fehlenden Informationen zu beurteilen. Während beide 3D-Karten mit einer Durchschnittsnote von 2,4 recht gut ankamen, wurden die 2D-Karten mit 2,7 (östliche Route) und 3,7 (westliche, stark segmentierte Route) weniger gut bewertet. Hier deckt sich die Bewertung der Karten nur teilweise mit der durchschnittlichen Wegzeit (Abb. 7). Karte 1 (westliche Route in 2D) schneidet in beiden Fällen am schlechtesten ab. Karte 3 (östliche Route in 2D) hingegen wird weniger gut bewertet als die beiden 3D-Karten, obwohl die Wegzeiten vergleichbar sind.

Detailliertere Erkenntnisse liefert die Einschätzung der Kartenteilaspekte. So war die Streckenführung auf Karte 1 durch die Segmentierung nicht so deutlich erkennbar wie bei den anderen Karten. Ob die Route nach oben oder unten führt, ist aus den 3D-Karten besser ersichtlicher als aus den 2D-Karten. Abzweigungen nach links oder rechts werden vor allem in Karte 1 schwer verstanden, vermutlich weil dort viele Segmentierungsgrenzen überschritten werden. Die Wiedergabe von Treppen, Türen und Durchgängen sowie die Verwendung von fotorealistischen Texturen werden in den 3D-Karten besser beurteilt. Zusätzliche Beschriftungen (z.B. Stock-

werkszahlen) werden vor allem in den 2D-Karten als sehr hilfreich eingestuft. Die räumliche Vorstellung des zu absolvierenden Weges ist sowohl routen-, als auch darstellungsabhängig. Die östliche Route war generell leichter nachvollziehbar – deutlich unterstützt wurde die räumliche Vorstellung jeweils durch die 3-dimensionale Darstellung (Abb. 8).

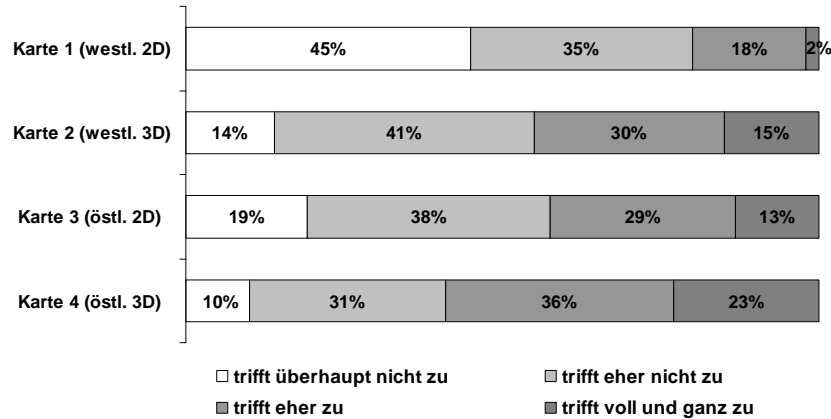


Abb. 8: Kartenspezifische Möglichkeit der räumlichen Vorstellung

	Karte 1 östliche Route in 2D		Karte 2 östliche Route in 3D		Karte 3 westliche Route in 2D		Karte 4 westliche Route in 3D	
Positives	Bilder	52%	Bilder	43%	Bilder	32%	3D	42%
	Pfeile	10%	3D	29%	Darstellung der Route	15%	Bilder	29%
	nichts	9%	Darstellung der Route	8%	Einfachheit	10%	Darstellung der Route	9%
Negatives	Segmentierung	13%	fehlender Kontext	16%	nichts	10%	nichts	10%
	Unübersichtlichkeit	11%	Erkennbarkeit d. Starts	14%	Treppendarstellung	9%	fehlender Kontext	8%
	Übergänge	7%	nichts	6%	fehlender Detailgrad	8%	Erkennbarkeit d. Starts	7%
fehlende Informationen	Zusatzinfos	25%	Zusatzinfos	25%	Zusatzinfos	11%	Zusatzinfos	19%
	Text mit Hinweisen	9%	Kontext	8%	mehr Wegmarken	9%	Kontext	13%
	Nordrichtung	8%	Text mit Hinweisen	8%	Text mit Hinweisen	9%	Text mit Hinweisen	10%

Tab. 1: Offene Nennungen

Sehr aufschlussreich ist auch die Auswertung der offenen Nennungen. Tab. 1 enthält eine Übersicht der meistgenannten Begriffe je Karte in den Kategorien *Positives*, *Negatives* und *fehlende Informationen*. Demnach sind Zusatzinformationen in Form von Bildern mit 32% bis 52% offenen Nennungen in allen Karten äußerst gut angekommen. Generell geschätzt wurde bei allen Karten bis auf Karte 1 auch die Darstellung der Route als roter Linienzug. Besonders positiv hervorgehoben wurde bei den 3D-Karten der 3D-Aspekt. Einige Teilnehmer gingen sogar soweit, nichts Negatives an den Karten zu finden. Das gilt für alle Kartenvarianten bis auf die erste, an der von Einigen umgekehrt nichts Positives entdeckt werden konnte. An Karte 1 stürten die Segmentierung und alle dadurch ausgelösten Probleme wie Übersichtlichkeit und eine große Anzahl von Übergängen zwischen den Segmenten. Negativ an den 3D-Karten wurde der fehlende Kontext vor allem an Entscheidungspunkten und die schwere Erkennbarkeit des Startpunkts bemängelt. Wünschen würden sich die Teilnehmer bei allen Karten noch mehr Zusatzinformationen – explizit genannt wurden in diesem Zusammenhang Etagenbezeichnungen, Raumnum-

mern und Entfernungsangaben. Zum Zwecke der einfacheren Routenverfolgung bestand des Weiteren das allgemeine Bedürfnis nach Hinweisen in textueller Form. Bei den 2D-Karten wurden zusätzlich Hilfsmittel für die Orientierung wie die Angabe der Nordrichtung und die Kennzeichnung von mehr Wegmarken gefordert. Aus den genannten Punkten erklärt sich die Bewertung der Karten insgesamt, aber auch die Zufriedenheit mit den Karten, die in Abb. 9 dargestellt ist.

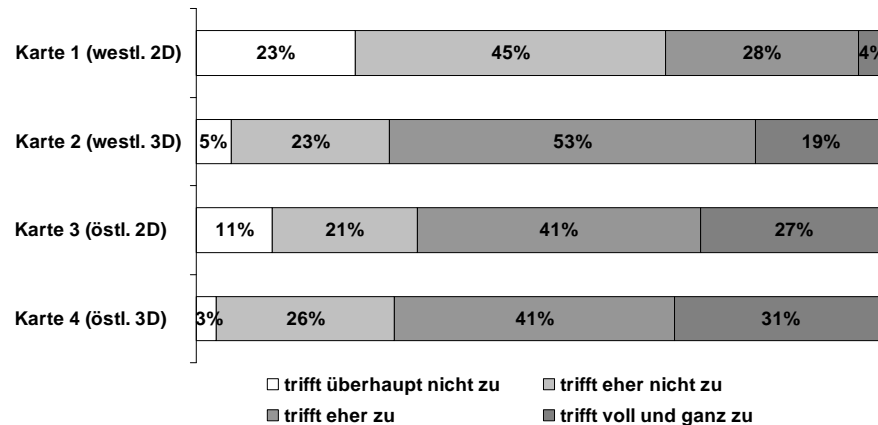


Abb. 9: Zufriedenheit mit der ausgehändigten Kartenvariante

3.3 Identifizierung von schwierigen Stellen

Aus den Beobachtungen der Teilnehmer während der Navigation konnten schwierige Passagen erkannt und in Abhängigkeit von der verwendeten Kartendarstellung ausgewertet werden. Die Ergebnisse werden im Folgenden kurz zusammengefasst.

Entlang der beiden Routen mussten jeweils kleine, teilweise versteckte Durchgänge benutzt werden. Die Darstellung von Durchgängen wurde in den 2D-Karten nicht klar erkannt. Bei Karte 1 kommt hinzu, dass durch die Segmentierung wichtige Kontextinformation fehlt, welche wegen der unterschiedlichen Ausrichtung der einzelnen Segmente nur schwer aus den benachbarten Routenteilen entnommen werden kann. Die Darstellung von Durchgängen in 3D-Karten wurde als deutlicher empfunden. Dennoch kam es in der Realität zu Zuordnungsproblemen, welche auch durch Zusatzinformationen in Form von Fotos der Durchgänge nicht vollständig behoben werden konnten. Auch die Fotos konnten aufgrund der eingeschränkten Größe nicht den nötigen Kontext wiedergeben und wiesen teilweise Aufnahmerichtungen auf, die im entscheidenden Moment nicht der Blickrichtung entsprachen.

Bei der Benutzung von Treppen kam es vor allem bei den 2D-Karten zu unklaren Situationen, da die Erkennung des Treppensymbols Voraussetzung für die Erkennung eines zu erwartenden Höhenunterschiedes ist. Unklar bleibt dann immer noch, in welche Richtung sich die Höhe verändert, d.h. ob die Treppen hinauf oder hinunter führen. Die Darstellung von Treppen in 3D-Karten ist aufgrund des perspektivischen Charakters wesentlich intuitiver. Umgekehrt verhält es sich für die Abbildung von horizontalen Verzweigungen. Während diese in den 2D-Karten (abgesehen von allfälligen Segmentgrenzen) problemlos eingezeichnet werden können, ergeben

sich in 3D-Karten aufgrund der schrägen Perspektive Verzerrungen in horizontalen Winkeln welche die genaue Richtungsbestimmung erschweren. Hinzu kommt, dass sowohl in den 2D-, als auch in den 3D-Karten durch die Beschränkung der Abbildung auf routennahe Gebäudeteile Information über alternative Abzweigungen verloren gehen und somit eine Orientierung auf Basis der topologischen Struktur nicht möglich ist: Eine Person kann nur – und wirklich nur – die Informationen zurate ziehen, die auf der Karte abgebildet sind. Alles, was sie sonst noch im Gebäude sieht, muss ausgeblendet werden. Wenn sich eine Person verläuft und den auf der Karte eingezeichneten Abschnitt im Gebäude verlässt, bietet ihr die Karte keine Möglichkeit, wieder zur vorgesehenen Route zurückzufinden.

Die Erkennung der aktuellen Etage ist bei den 2D-Karten aufgrund der eingebundenen Etagennummern als Zusatzinformation direkt möglich. In den 3D-Karten gibt es keine explizite Etageninformation, wodurch ein Mitzählen erforderlich ist, um einen Stockwerksabgleich durchführen zu können. Ein Problem, welches bei der Fußgängernavigation ohne Positionsverifikation mittels GPS generell auftritt, ist die Abschätzung von Weglängen. Als Hilfsmittel kann hier die Kennzeichnung markanter Gebäudeteile eingesetzt werden.

4 Resümee

Eine interessante Erkenntnis des durchgeführten Navigationstests ist, dass es keinen linearen Zusammenhang zwischen Effektivität und Zufriedenheit gibt. Die Unzufriedenheit der Teilnehmer mit der ihnen zugeteilten Karten steigt rascher an als die entsprechenden Wegzeiten. Aus Abb. 9 geht hervor, dass für die ähnlich bewerteten Karten 2 bis 4 die Prozentsätze von Teilnehmern, die zufrieden mit der Karte waren, mehr als doppelt so hoch sind als jener von Karte 1. In Abb. 7 sieht man, dass für Karten 2 bis 4 die Prozentsätze derer, die schnell oder durchschnittlich schnell das Ziel erreichten, nicht deutlich höher sind als jener von Karte 1. Bei der Zufriedenheit scheint es sich also um eine sehr sensible Stellschraube zu handeln, die maßgeblicher für die Akzeptanz einer Karte ist als die Effektivität und daher genauer untersucht werden sollte. Aus den offenen Nennungen und den Beobachtungen lassen sich einige Gründe für Zufriedenheit oder Unzufriedenheit der Teilnehmer herauslesen, welche derzeit bereits teilweise in die Gestaltung zukünftiger Testkarten mit einfließen. Auf Basis dieser nächsten Kartengeneration soll herausgefunden werden, wie groß der Einfluss verschiedener Kartenelemente auf die Sicherheit und Zufriedenheit des Kartenlesers ist.

Wie bereits in Abschnitt 3.2 und 3.3 erläutert wurde, haben 2D- und 3D-Karten unterschiedliche Stärken und Schwächen. 2D-Karten sind besser für die Wiedergabe horizontaler Strukturen geeignet, da eine winkeltreue Abbildung möglich ist. Trotzdem haben 2D-Karten beim Erkennen von Abzweigungen nach links und rechts nicht besser abgeschnitten als 3D-Karten. Grund dafür scheint die bessere Eignung von 3D-Karten als Basis für die räumliche Vorstellung zu sein, denn nur wenn der Bezug zwischen Karte und Realität und damit die momentane Position klar ist, sind Richtungsänderungen nachvollziehbar. Die Wiedergabe von vertikalen Informationen (z.B. Treppen) ist nur in 3D-Karten inhärent vorgesehen. 2D-Karten müssen sich mittels eingblendeter Zusatzinformation in Form von Symbolen, Beschriftungen oder Bildern behelfen. Auch können

bei 3D-Karten durch die schräge Perspektive Türen und Durchgänge prägnanter gekennzeichnet werden als bei 2D-Karten. Durch die dreidimensionale, also räumliche Wiedergabe der Umgebung, kann man sich bei 3D-Karten den Weg bereits vorstellen, bevor man ihn gelaufen ist, was durch die fotorealistische Texturierung zusätzlich unterstützt wird. Der einzige offensichtliche Nachteil an 3D-Karten ist, dass im Gegensatz zu 2D-Karten nicht die Möglichkeit besteht, die Karte mitzudrehen. Laut Untersuchungen zum Nutzerverhalten bevorzugen mehr als 80% eine Kartenrichtung, die mit der Laufrichtung abgeglichen ist (RADOCZKY, 2004). Die Herausforderung bei Karten, welche eine fixe Ausrichtung vorgeben liegt darin, ständig die Kartendarstellung in die Realität hineinzudrehen. Laut der Meinung unserer Teilnehmer überwiegen die Vorteile der 3D-Karten aber deutlich, so dass dieses kleine Manko gerne hingenommen wird.

Aus den Bewertungen der Karten und den Beobachtungen der Teilnehmer können wertvolle Verbesserungspotenziale abgeleitet werden. Einer der Hauptkritikpunkte ist die Segmentierung der Karten, welche durch Überlagerung von Routenteilen bedingt wird. Alternative Möglichkeiten diese Überlagerungen zu vermeiden oder zumindest einzuschränken, sind die Verwendung von Transparenz, das Auseinanderziehen von Gebäudeteilen oder Perspektivwechsel im Fall von 3D-Darstellungen. Sollte dennoch eine Segmentierung notwendig sein, sollten Ausrichtungswechsel zwischen den einzelnen Segmenten unbedingt vermieden werden. Die positive Reaktion der Teilnehmer auf Zusatzinformationen deckt sich mit Untersuchungsergebnissen zu mehrfach kodierten Navigationsanweisungen von RADOCZKY (2004). Vertikale Zusatzinformationen in Form von Etagenbezeichnungen wurden als ebenso hilfreich eingestuft wie horizontale Zusatzinformationen in Form von Fotos wichtiger Positionen (z.B. Durchgänge). Die Position von Etagenbezeichnungen sollte möglichst auf die Beschilderung in der Realität abgestimmt sein, um den Informationsabgleich für den Kartennutzer einfach zu gestalten. Fotos sollten der Blickrichtung und dem Blickfeld, also der egozentrischen Sicht des Kartennutzers (MÜNZER ET AL., 2007) am Entscheidungspunkt angepasst sein und eindeutig in der Kartendarstellung verankert sein. Zusatzinformationen sind nicht nur an Entscheidungspunkten, sondern während der gesamten Navigation von großer Bedeutung, da sie einen regelmäßigen Abgleich von Kartendarstellung und Realität erlauben und so Sicherheit geben. Ein weiterer Aspekt, der hierzu beitragen kann, ist die Erhaltung der Topologie von Verzweigungen. Nur wenn alle Abzweigungsvarianten auch in der Karte verzeichnet sind, kann der Nutzer durch relative Orientierung die richtige Abzweigung wählen. Das ist vor allem dann entscheidend, wenn zwischen ähnlich gerichteten Wegvarianten gewählt werden muss oder die Karte Horizontalwinkel verzerrt abbildet.

5 Ausblick

Eine differenziertere Analyse der vorliegenden Testergebnisse nach Geschlecht und Altersklassen soll Auskunft über signifikante Wahrnehmungsunterschiede und etwaige Präferenzen geben. Wie im vorigen Abschnitt erwähnt, fließen die Erkenntnisse des durchgeführten Nutzertests bereits in die Gestaltung von zukünftigen Testkarten mit ein. Der nächste Test findet im Rahmen der Langen Nacht der Wissenschaften 2010 statt (LNDW, 2010). Bei den neuen Testkarten handelt es sich ausschließlich um 3D-Darstellungen der gleichen Routen, welche unterschiedliche Formen von Zusatzinformationen enthalten. Eine Version bildet das – an den als schwierig

identifizierten Stellen verbesserte – 3D-Modell inklusive Routendarstellung ab (Variante 1). Zwei weitere Versionen enthalten an den Entscheidungspunkten Zusatzinformationen in Form von Bildern (Variante 2) bzw. textuellen Hinweisen (Variante 3). Die Zusatzinformationen sind zum Zwecke der besseren Übersichtlichkeit nicht direkt in die Karte eingebunden, sondern am Rand abgebildet und über Nummernsymbolen zugeordnet. Ziel des diesjährigen Tests ist es herauszufinden, wie sich die nutzerangepasste Adaption des 3D-Modells, sowie unterschiedliche Formen von Zusatzinformationen auf den Navigationsprozess auswirken. Ideen für zukünftige Testläufe werden gerade gesammelt. Denkbar sind Untersuchungen zur Auswirkung von photo-realistischen Darstellungen im Gegensatz zu Abstraktionen (im Sinne des Zeichenstils und der Geometrievereinfachung) sowie die Beantwortung der Frage welchen Wert kartenähnliche Darstellungen im Vergleich zu Bildgeschichten bzw. rein textuellen Wegbeschreibungen haben.

6 Literaturverzeichnis

- ATTESLANDER, P., 2006: Methoden der empirischen Sozialforschung. 11. neu bearbeitete und erweiterte Auflage. Erich Schmidt Verlag, Berlin, S. 165-180.
- BECKER, T., NAGEL, C., KOLBE, T.H., 2008: A Multilayered Space-Event Model for Navigation in Indoor Spaces. In: LEE, J., ZLATANOVA, S. (Hg.): Proceedings of the 3rd International Workshop on 3D Geo-Information, Seoul, Korea. Lecture Notes in Geoinformation & Cartography, Springer Verlag, Seoul.
- BEHNKE, J., BAUR, N., BEHNKE, N., 2006: Empirische Methoden der Politikwissenschaft. Schöningh, Paderborn.
- FRIEDRICHS, J., 1985: Methoden empirischer Sozialforschung. 13. Auflage. Westdeutscher Verlag, Opladen, S. 333-353.
- GOGO 3D, 2010: 3D-Navigationssoftware von EnGIS Technologies, <http://www.engistech.com/products/gogo3d.htm> (letzter Zugriff: 1.6.2010).
- GRÖGER, G., KOLBE, T.H., CZERWINSKI, A., NAGEL, C., 2008: OpenGIS City Geography Markup Language (CityGML), Implementation Specification, Version 1.0.0, doc.no. 08-007, OGC.
- LAMNEK, S., 2005: Qualitative Sozialforschung – Lehrbuch, 4. Aufl., Beltz Verlag, Basel, S.547-640.
- LNDW (LANGE NACHT DER WISSENSCHAFTEN AN DER TU BERLIN), 2009: Ankündigung des Navigationstests, <http://lndw.tu-berlin.de/lndw09/course/view.php?id=1233> (letzter Zugriff: 1.6.2010).
- LNDW (LANGE NACHT DER WISSENSCHAFTEN AN DER TU BERLIN), 2010: Ankündigung des Navigationstests, <http://lndw.tu-berlin.de/course/view.php?id=217> (letzter Zugriff: 1.6.2010).
- MÜNZER, S., STAHL, C., 2007: Providing Individual Route Instructions for Indoor Wayfinding in Complex, Multi-Level Buildings. GI-Days 2007 Young Researchers Forum, Münster.
- RADOCZKY, V., 2004: Kartographische Unterstützungsmöglichkeiten zur Routenbeschreibung in Fußgänger Navigationssystemen im In- und Outdoorbereich. Diplomarbeit, TU Wien.
- TELEATLAS, 2010: Advanced City Models – Bringing maps closer to reality. White Paper. http://www.teleatlas.com/stellent/groups/public/documents/content/ta_ct030469.pdf (letzter Zugriff: 1.6.2010).
- ZIMMERMANN, E., 1972: Das Experiment in den Sozialwissenschaften. Teubner, Stuttgart.

Verwaltung landesweiter Full Waveform Airborne Laser Scanning Daten

**GOTTFRIED MANDLBURGER¹, CHRISTIAN BRIESE², JOHANNES OTEPKA¹, BERHARD HÖFLE³
& NORBERT PFEIFER²**

Zusammenfassung: In diesem Beitrag wird das Verwaltungskonzept für Full Waveform ALS Daten innerhalb des am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung (I.P.F.) der TU Wien entwickelten Programmsystems TopDM vorgestellt. Neben der Erweiterung des Tabellenschemas zur Speicherung von punktbezogenen Attributen (Echoweite, Amplitude, ...) wird auf die Zusammenhänge zwischen dem Flugpfad, der Orientierung des Laserscanners und den eigentlichen 3D-Objektpunkten eingegangen. Besondere Bedeutung kommt der Zeit als verbindender Größe zwischen den unterschiedlichen Sensoren zu. Die Definition und gegenseitige Überführung gebräuchlicher Zeitsysteme wird daher ebenso behandelt wie die Datenverwaltung für Aufnahmekonfigurationen mit mehreren Laserscannern auf einer Plattform. Anhand konkreter Anwendungsbeispiele wird das Potential des vorgestellten Verwaltungskonzeptes demonstriert.

1 Einleitung

In Österreich beträgt die Abdeckung mit dichten Airborne Laser Scanning (ALS) Daten derzeit etwa 60% (Abb. 1a). Weitere Teile der Landesfläche sind in der Saison 2009/2010 befliegen worden und eine Gesamtabdeckung kann etwa für 2012 prognostiziert werden. In Deutschland beträgt die derzeitige Abdeckung 51% (Stand: 01.06.2010, Abb. 1b) und in der Schweiz sind alle Gebiete unter 2000m Seehöhe mit ALS erfasst (Abb. 1c). Immer mehr Projekte werden dabei mit Sensoren befliegen, welche die gesamte Wellenform (Full Waveform, FWF) des rückgestreuten Lasersignals aufzeichnen. Neben den 3D-Punktkoordinaten und den klassischen Attributen, wie erstes oder letztes Echo und Signalstärke, erlauben FWF ALS Datensätze einerseits die Bestimmung einer größeren Anzahl von Zwischenechos pro ausgesandtem Laserplus und andererseits die Ableitung von zusätzlichen Attributen pro Echo. Als besonders nützliche Attribute für die anschließende Datenprozessierung (Klassifizierung der Punktwolke, Kantenmodellierung, DGM-Erstellung, Vegetationskartierung) hat sich dabei vor allem die Echoweite, ein Maß, welches die Höhenvariation von Einzelzielen innerhalb des Laserstrahlkegels beschreibt, herausgestellt. Die Datenabgabe an Endkunden erfolgt in der Regel in Form von Digitalen Geländemodellen (DGM) oder Digitalen Oberflächenmodellen (DOM) und seltener in Form der 3D-Punktwolke. Anwendungen in Fachbereichen, wie Orthophotoproduktion, Gebäudemodellierung, Hydraulik

¹ Gottfried Mandlbürger & Johannes Otepka: Christian Doppler Labor „Räumliche Daten aus Laserscanning und Fernerkundung“ am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, TU Wien, Gusshausstr. 27-29, A-1040 Wien, E-Mail: gm{jo}@ipf.tuwien.ac.at

² Christian Briese & Norbert Pfeifer, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, TU Wien, Gusshausstr. 27-29, A-1040 Wien, E-Mail: cb{np}@ipf.tuwien.ac.at

³ Bernhard Höfle: Universität Heidelberg, Geographisches Institut, Berliner Straße 48, D-69120 Heidelberg, E-Mail: hoefle@uni-heidelberg.de

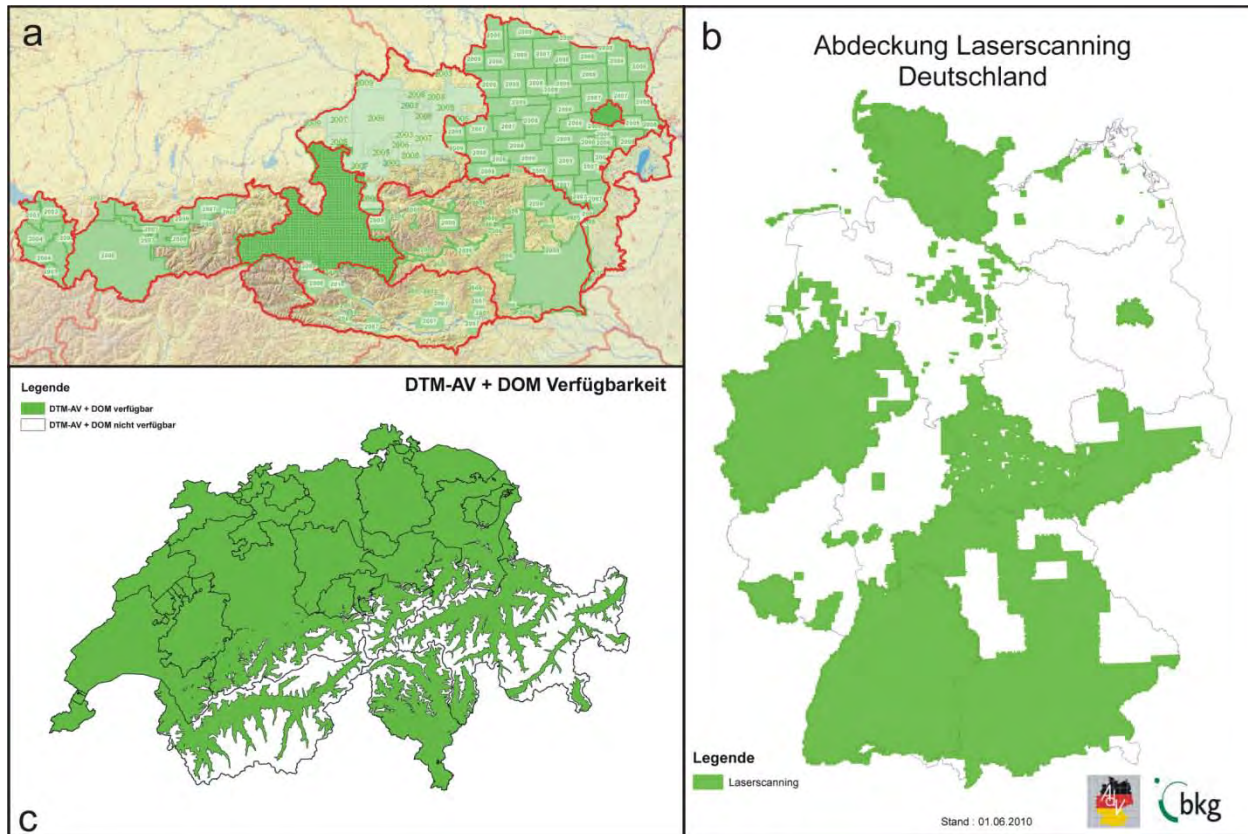


Abb. 1: ALS-Datenabdeckung in Österreich (a), Deutschland (b) und der Schweiz (c), Stand: 1. Juni 2010, Daten und Copyright: Österreich: Geoland (<http://www.geoland.at>), Deutschland: Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG/ GeoBasis-DE), Schweiz: swisstopo (<http://www.swisstopo.ch>)

oder Forstwirtschaft, benötigen aber oftmals Informationen, die im DGM/DOM nicht mehr, wohl aber in der originalen Punktwolke enthalten sind. So lassen sich z.B. Rückschlüsse auf die Vegetationsstruktur aus der Analyse der Zwischenechos ziehen, während das DOM generell lediglich aus den ersten, bzw. das DGM aus den letzten Echos abgeleitet wird. Für Anwendungen in der Hydraulik wiederum ist es wesentlich, einerseits die Höhen von Böschungskanten nicht zu unterschätzen und andererseits lokale Depressionen (Entwässerungsgräben, Durchlässe) möglichst präzise abzubilden. Dies verlangt in den neuralgischen Bereichen nach spezialisierten ALS-Filterverfahren, damit Überschwemmungsgrenzen möglichst präzise abgebildet werden können. Daraus erkennt man, dass es ein Potential für die großflächige Bereitstellung von 3D-Punktwolken samt allen verfügbaren punktbezogenen Attributen gibt.

Die landesweite Verwaltung derart komplexer Daten stellt eine Herausforderung für topographische Datenbank-Managementsysteme (DBMS) dar. Neben der eigentlichen 3D-Punktwolke gilt es auch den zugehörigen Flugpfad (Position und Orientierung der Messplattform) zu verwalten. Besondere Bedeutung kommt dabei der Synchronisation aller beteiligten Sensoren zu, was oftmals eine Homogenisierung von Zeitangaben in verschiedenen Systemen (GPS Zeit, UTC...) erforderlich macht. Noch höhere Anforderungen an das Verwaltungssystem werden gestellt, wenn mehrere Laserscanner auf einer Plattform montiert sind, da in diesem Fall die Zeitstempel

alleine nicht mehr ausreichen, um eine eindeutige Zuordnung zwischen Laserpunkt und Aufnahmeposition zu gewährleisten.

Der Beitrag ist daher wie folgt gegliedert: Im Abschnitt 2 wird das Basiskonzept von TopDM zur Verwaltung digitaler Geländehöhendaten vorgestellt. Die Abschnitte 3 und 4 beschäftigen sich mit den erforderlichen Erweiterungen zur Administration der ALS-Punktwolke und des Flugpfades. Einige Anwendungsbeispiele sind im Abschnitt 5 angeführt und der Artikel endet mit einer abschließenden Zusammenfassung sowie einem Ausblick auf künftige Arbeiten.

2 TopDM Basiskonzept

TopDM (Topographic Data Management) wurde am I.P.F. als System zur Verwaltung landesweiter Geländehöhendaten (HOCHSTÖGER, 1996) auf Basis einer geo-relationalen Datenbank entwickelt. Als Datenbank (DB) kommen wahlweise zum Einsatz:

- TOPDB (LOITSCH & MOLNAR, 1991), Eigenentwicklung des I.P.F.,
- Oracle Spatial (ORACLE, 2010), kommerzielles Produkt
- Postgre SQL/PostGIS (REFRACTION RESEARCH, 2010), Open Source DB (Anbindung in Arbeit)

Die Kommunikation zwischen TopDM und der DB ist über TOPSQL, eine Abfragesprache basierend auf ANSI-SQL (DIN, 2004) mit Erweiterungen hinsichtlich geometrischer Typen und Operatoren, realisiert. Mittels TOPSQL können geometrische und Attribut-bezogene Abfragen in einem einzigen SQL Befehl kombiniert werden.

Das Hauptziel von TopDM ist die Langzeitspeicherung und -archivierung von primären Geländehöhendaten und abgeleiteten Produkten (z.B. DGM, Isolinien...). Neben der Geometrie (Koordinaten) und der Objektkodierung (geometrischer Typ und Semantik) erfordert dies auch die Speicherung von Metadaten (Datenerfasser, Nutzungsberechtigte, Aktualität, Genauigkeit...), um eine detaillierte Datenselektion zu gewährleisten. Weitere wichtige Aspekte sind die Unterstützung von gängigen Datenformaten für einen flexiblen Datenimport und –export und die rigorose Georeferenzierung aller verwalteten Daten. Die Definition der räumlichen Bezugssysteme basiert auf den Spezifikationen des Open Geospatial Consortiums (OGC A, 2010), und für die Koordinatentransformationen werden Open Source Bibliotheken (GDAL, 2010; PROJ4, 2010) genutzt. Diese Komponenten sind in eine Bibliothek der Firma INPHO, eines langjährigen Entwicklungspartners des I.P.F., integriert, welche darüber hinaus auch eine Unterstützung für die Umrechnung vertikaler Bezugssysteme (Geoide, Höhendatum) zur Verfügung stellt (INPHO, 2010). Transformationen sind für ALS Daten von besonderer Bedeutung, da diese ursprünglich in einem globalen, kartesischen Koordinatensystemen (z.B. WGS84) erfasst und in der Regel im Landessystem weiterverarbeitet werden.

TopDM ist in erster Linie als Verwaltungstool für regionale und nationale Vermessungsbehörden ausgelegt. Durch die enormen Datenmengen, welche moderne ALS Sensoren zur Verfügung stellen, wird es aber auch zur Abwicklung größerer ALS Projekte eingesetzt. Darüber hinaus kann TopDM auch als Datenbasis für DGM Programme fungieren. In geeignete Teilbereiche portioniert, werden die originalen ALS Punkte von der DB den jeweiligen Anwendungsprogrammen zur ALS Filterung und DGM Interpolation zur Verfügung gestellt. Endprodukte (z.B.

DOM, DSM, klassifizierte Punktwolke, Höhenlinien) können schließlich wieder in der TopDM DB gespeichert werden, um von dort aus dann an Kunden abgegeben zu werden.

3 Punktdatenverwaltung

Das in Abschnitt 2 beschriebene Basiskonzept hat sich für Daten aus klassischen Erfassungsmethoden (Tachymetrie, Photogrammetrie, Vektorisierung...) bewährt. Auch zur Verwaltung von ALS Punktwolken wurde es bereits erfolgreich eingesetzt. Es sieht allerdings nur die Speicherung der Koordinaten und der Objektkodierung vor, während punktbezogene Zusatzattribute dabei verloren gehen. Neben den klassischen Echoattributen (Anzahl der Echos pro Impuls, Echonummer, Zeitstempel, Auslenkwinkel) können heute durch Analyse der vollen Wellenform und anschließender Signalkalibrierung (WAGNER ET AL., 2006) weitere Zusatzattribute abgeleitet werden:

- Amplitude (Maximale Signalstärke in Einheiten des Empfängers [DN])
- Echoweite (Strahlaufweitung durch Mehrfachreflexion innerhalb des Strahlkegels [ns])
- Streuquerschnitt (Laser Cross Section, ermittelt durch radiometrische Kalibrierung [m²])

Durch simultane Befliegung mit bildgebenden Sensoren können pro Echo noch Farbinformationen (Rot, Grün, Blau, Infrarot) und durch die anschließende Datenprozessierung weitere Attribute (Klassifizierung, etc.) hinzukommen.

Ein Konzept zur Verwaltung landesweiter Full Waveform ALS Punktwolken muss nun folgende Anforderungen erfüllen:

- Effiziente Verwaltung von riesigen ALS-Punktwolken
- Speicherung von ALS-spezifischen Zusatzattributen pro Echo
- Möglichst kompakte Speicherung von Geometrie und Punktattributen
- Datenselektion auf Basis von Metadaten und geometrischen Kriterien
- Zusätzliche Datenfilterung auf Basis der punktbezogenen Attribute

Die folgende Tabelle 1 zeigt den wesentlichen Ausschnitt der Definition für Datenbanktabellen zur Verwaltung von FWF ALS Punkten.

Tab.1: ALS-Punktdatenverwaltung, TOPDB Tabellendefinition (Auszug)

NAME	TYPE	INDEX INFO	NULL INFO	FURTHER PROPERTIES
IDOBJ	INTEGER	UNIQUE INDEX	NOT NULL	SYSNUM IDENTIFIER
AGGREGATE	CHAR(64)	INDEX	NOT NULL	
OBJECTTYPE	CHAR(16)	INDEX	NOT NULL	
FEATURECODE	CHAR(32)	INDEX	NULL	
COORDINATES	POINT	INDEX	NOT NULL	PERIOD(3) RESOLUTION(2,2,3)
PULSETIME	NUMBER(15.6)	INDEX	NULL	ARRAY
AMPLITUDE	NUMBER(6.2)	NO INDEX	NULL	ARRAY
ECHOWIDTH	NUMBER(6.2)	NO INDEX	NULL	ARRAY
CROSSSECTION	NUMBER(6.2)	NO INDEX	NULL	ARRAY
RETURNINFO	INTEGER	NO INDEX	NULL	ARRAY
CLASSINFO	INTEGER	NO INDEX	NULL	ARRAY
CUSTOMINFO	INTEGER	NO INDEX	NULL	ARRAY
COLOR	INTEGER	NO INDEX	NULL	ARRAY
BEAMVECTOR	INTEGER	NO INDEX	NULL	ARRAY

Die Speicherung der ALS Punkte erfolgt nicht in Form von Einzelpunkten (ein Echo = ein Datensatz in der DB-Tabelle), sondern als Punkthaufen. Im Sinne der Simple Feature Spezifikation des Open Geospatial Consortiums (OGC B, 2010) handelt es sich dabei um *MultiPoint* Objekte, deren Äquivalent in TOPDB mit POINT bezeichnet werden. Gegenüber der Speicherung als Einzelpunkte erlaubt die Verwaltung als Punkthaufen einen effizienteren räumlichen Zugriff, vor allem in Hinblick auf die angestrebte landesweite Verwaltung. Des Weiteren rechtfertigt der zufällige Charakter der einzelnen ALS-Punkte die Zusammenfassung zu Gruppen. Für schnellen Datenzugriff ist eine Indizierung, sowohl für die Geometrie (COORDINATES) als auch den Objekttyp (OBJECTTYPE, FEATURECODE), unerlässlich. Die Speicherung der Punktattribute erfolgt nun in Form zusätzlicher Spalten (PULSETIME, AMPLITUDE...), die allesamt (i) als Feld-Typen (ARRAY) definiert sind, wobei die Feld-Länge stets mit der Punktzahl korrespondiert, (ii) optional sind (NULL-Spalten) für den Fall, dass bestimmte Attribute nicht zur Verfügung stehen und (iii) nicht indiziert sind. Von einer Indizierung der Punktattribute kann abgesehen werden, da die Attributwerte innerhalb eines MultiPoint-Objektes nicht speziell ausgeprägt sind. Mit anderen Worten, innerhalb eines Objektes kommen alle möglichen Amplituden, Echoweiten, etc. vor. Da die Datenselektion in erster Linie über Bereichsabfragen sowie auf Basis bestimmter Metadaten erfolgt, stellt dies auch keinen wesentlichen Nachteil dar. Um eine möglichst kompakte Speicherung zu gewährleisten, sind manche Teilattribute zu Kontainern zusammengefasst. So werden z.B. die Anzahl der Echos pro Impuls (1 Byte), die Echonummer (1 Byte), der Auslenkwinkel (1 Byte) und weitere Bits für die Scanrichtung, etc. in der Spalte RETURNINFO als ein 4-Byte-Integer abgelegt. Das DBMS sorgt intern für eine korrekte Aufspaltung in die Teilattribute. Diese Organisation stellt einen Kompromiss dar, da TOPDB keine Zahlentypen kleiner als 32-Bit zur Verfügung stellt, während dies etwa für Oracle oder PostgreSQL sehr wohl der Fall wäre. Die Letztgenannten ermöglichen auch ein direktes Ansprechen der Teilattribute außerhalb von TopDM durch die jeweils eingebetteten prozeduralen Programmiersprachen PL-SQL (Oracle) bzw. PL/pgSQL (PostgreSQL). In der selben Art sind auch die Spalten CUSTOMINFO (formatspezifische Attribute), COLORINFO (Farbwerte Rot, Grün, Blau, Infrarot) und CLASSINFO (Klassifizierung) realisiert, wobei für letztere einerseits der für das ASPRS LAS File Format (ASPRS, 2010) definierte Klassifizierungsschlüssel zur Anwendung kommt und darüber hinaus auch eine benutzerdefinierbare Attributierung (1 Byte) möglich ist.

Auch wenn die Datenselektion nicht über die Punktattribute erfolgt, so ist es trotz allem erforderlich, nach gewünschten Kriterien filtern zu können. Dazu wurde eine allgemeine Grammatik in Erweiterter Backus-Naur-Form (EBNF) eingeführt, welche z.B. eine Selektion aller letzten Echos, aller Echos mit beliebigem Attribut größer/kleiner einem bestimmten Schwellwert oder Ähnlichem erlaubt. Die genaue Syntax kann der Dokumentation des Programmsystems OPALS (Orientation and Processing of Airborne Laser Scanning data) entnommen werden (OPALS, 2010). Für Beispiele sei auf den Abschnitt 5 verwiesen.

Rascher Zugriff auf die Punktdaten ist nur dann möglich, wenn die einzelnen Datentabellen eine überschaubare Größe aufweisen und darüber hinaus in ein System eingebettet sind, welches eine Vorauswahl aller potentiellen Datentabellen anhand von Übersichtstabellen erlaubt. Für die Datentabellen hat es sich bewährt, wenn die darin gespeicherten Daten regional zusammenhängend sind und die Punktzahl 100 Mio nicht wesentlich überschreitet. Es bietet sich daher etwa

an, die Daten eines Flugstreifens in einer Datentabelle abzulegen. Auf Basis der Streifenumfahrung, die in Form des minimalen orientierten Rechtecks zusammen mit einem Streifen-Identifizier (AGGREGATE), dem Namen der Datentabelle und allen Metadaten in der Übersichtstabelle abgelegt sind, gelingt es in einer Vorauswahl sehr rasch die potentiellen Datentabellen zu finden und die Detailsuche nur auf diese anzuwenden. Für nähere Details, betreffend das generelle Konzept von Datenimport, -selektion und -export, sei auf (HOCHSTÖGER, 1996) bzw. (WARRINER & MANDLBURGER, 2005) verwiesen.

Ein wesentlicher Punkt bei der Konzeption des Verwaltungsschemas für ALS-Punktwolken war auch die Kompatibilität zu Industriestandards. So erlaubt das vorgestellte System etwa eine vollständige Verwaltung aller Datenattribute, die im ASPRS LAS File Standard (ASPRS, 2010) definiert sind (Zeitstempel, Intensität, Auslenkwinkel...). Die aktuelle LAS Version 1.3 sieht darüber hinaus auch die Speicherung der vollen Wellenform als „waveform packages“ vor. Davon wurde für TopDM bewusst Abstand genommen, da dadurch die Datenmengen unverhältnismäßig ansteigen würden und darüber hinaus bei LAS 1.3 keine exakte Synchronisierung zwischen den detektierten Echos und der digitalisierten Wellenform gegeben ist. Für die großräumige Verwaltung von Daten, auf die TopDM ausgelegt ist, wird die vorherige Umwandlung der Wellenform in geometrisch und/oder geophysikalisch interpretierbare Größen (z.B. Echoweite, Streuquerschnitt) als zielführender erachtet. TopDM unterstützt daher Systeme, welche diese Informationen vorhalten, wie etwa das SDW Format der Firma Riegl Laser Measurement Systems (RIEGL, 2010).

4 Flugpfadverwaltung

Im Tabellenlayout zur Verwaltung von ALS Punktdaten ist auch die Spalte BEAMVECTOR (vgl. Tab. 1) vorgesehen. Es handelt sich wiederum um eine Container-Spalte, in welcher für jedes Echo die Länge (2 Byte) sowie Azimut (1 Byte) und Zenitdistanz (1 Byte) des Laserstrahls abgelegt sind. Für viele Anwendungen, wie z.B. die Berechnung von Inzidenzwinkeln (Winkel zwischen dem Laserstrahl und der Flächennormalen), ist diese genäherte Auflösung (Distanz: 1m, Orientierungswinkel: ca. 1°) ausreichend. Um diese Information in voller Genauigkeit zur Verfügung zu haben, ist entsprechend mehr Speicherplatz erforderlich. Andererseits kann der Strahlvektor auch aus den 3D-Punktkoordinaten und dem Flugpfad berechnet werden, sofern die beiden Datensätze über einen gemeinsamen Zeitstempel synchronisiert werden können. Im folgenden ist daher das Grundkonzept einer Flugpfadverwaltung beschrieben. Die Zusammenhänge sind in Gleichung 1 (nach: SKALOUD, J. & LICHTI, D., 2006) verdeutlicht.

$$X = X_{GNSS}(t) + R_{IMU}(t) * \left(m - R_m \begin{pmatrix} 0 \\ \rho \cdot \sin \theta \\ \rho \cdot \cos \theta \end{pmatrix} \right) \quad (1)$$

In Gleichung 1 bezeichnet X den Objektpunkt im Referenzsystem. Das Antennenzentrum X_{GNSS} und die Rotation R_{IMU} der inertialen Messeinheit (IMU) definieren Position und Orientierung der Messplattform und sind zeitabhängig (t). Das System des Laserscanners ist gegenüber der IMU leicht verdreht um R_m und gegenüber dem Antennenzentrum um m verschoben. R_m und m zusammen werden als Mounting Calibration bezeichnet, welche in der Regel für eine Flugmissi-

on konstant ist. Der Laserscanner selbst misst die Distanz ρ und den Auslenkwinkel θ . Das Tabellensystem zur Flugpfadverwaltung muss daher die zeitabhängigen Größen (GNSS, IMU) ebenso abbilden wie die temporär konstanten Werte der Mounting Calibration. In den Tabellen 2 und 3 ist ein entsprechendes Tabellenlayout angegeben.

Tab. 2: Flugpfadverwaltung (Position und Orientierung), TOPDB Tabellendefinition

NAME	TYPE	INDEX INFO	NULL INFO	FURTHER PROPERTIES
IDFLIGHTPOS	INTEGER	UNIQUE INDEX	NOT NULL	SYSNUM IDENTIFIER
COORDINATES	POINT	INDEX	NOT NULL	PERIOD(3) RESOLUTION(2,2)
ORIENTATION	NUMBER(12.8)	NO INDEX	NOT NULL	ARRAY(3)
TIME	NUMBER(15.6)	INDEX	NOT NULL	
IDSCANNER	INTEGER	INDEX	NOT NULL	ARRAY

Das Antennenzentrum (COORDINATES) und die Raumstellung der IMU (ORIENTATION) ist dabei für jeden Messzeitpunkt (TIME) zu speichern, wobei die Abtastrate typischerweise 0,1-1 kHz beträgt. Um einen schnellen räumlichen und zeitlichen Datenzugriff zu ermöglichen, sind die entsprechenden Spalten zu indizieren.

Tab.3: Flugpfadverwaltung (Mounting Calibration), TOPDB Tabellendefinition

NAME	TYPE	INDEX INFO	NULL INFO	FURTHER PROPERTIES
IDMOUNTING	INTEGER	UNIQUE INDEX	NOT NULL	SYSNUM IDENTIFIER
OFFSET	POINT	NO INDEX	NOT NULL	PERIOD(3) RESOLUTION(2,2)
ROTATION	NUMBER(12.8)	NO INDEX	NOT NULL	ARRAY(3)
CALIBDATE	DATE	INDEX	NOT NULL	
IDSCANNER	INTEGER	INDEX	NOT NULL	

Die Mounting Calibration ist für jede Systemkalibrierung (CALIBDATE) festgelegt durch den Vektor zwischen den Zentren der Antenne und des Laserscanners (OFFSET) sowie der Schrägstellung der IMU gegenüber dem Laserscanner (ROTATION). Beide Tabellen werden über einen gemeinsamen Sensor-Identifizierer (IDSCANNER) verknüpft. Dieser kann darüber hinaus verwendet werden, um eine konsistente Verwaltung mit mehreren Laserscannern auf ein und derselben fliegenden Plattform zu realisieren. Aus diesem Grund ist die IDSCANNER-Spalte in Tabelle 2 als ARRAY definiert. Für mehrere Laserscanner kann derart derselbe Flugpfad (GNSS und IMU) verwendet werden.

Wie bereits erwähnt, ist eine strenge Synchronisation aller beteiligten Sensordaten eine Voraussetzung für deren korrekte Verknüpfung. Analog zu den unterschiedlichen räumlichen Bezugssystemen zur Speicherung der Koordinaten, muss das Verwaltungssystem auch die verschiedenen Zeitsysteme und deren gegenseitige Überführung bereitstellen. Im Bereich von ALS sind vor allem folgende Zeitsysteme (NELSON ET AL., 2001) im Gebrauch:

- TAI: Internationale Atomzeit, gleichförmige Zeitskala basierend auf der atomaren Definition der SI Sekunde (Dauer von 9.192.631.770 Schwingungen des Caesium-(133)-Atomkerns), eingeführt 1971.
- UTC: Koordinierte Weltzeit. Zeitskala wie TAI, basierend auf der atomar definierten SI-Sekunde, und mit der astronomischen Zeitskala UT1 über folgende Beziehung verknüpft: $UTC = TAI - n$ Sekunden (n ganzzahlig). Über Schaltsekunden wird UTC derart mit

UT1 synchronisiert, dass: $|\text{UTC} - \text{UT1}| < 0.9 \text{ s}$. Der International Earth Rotation Service (IERS) überwacht die Evolution von UTC - UT1 und entscheidet, wann UTC um eine Sekunde korrigiert wird (jeweils Mitte und/oder Ende des Jahres). Derzeit (02.06.2010) ist $\text{TAI} - \text{UTC} = n = 34 \text{ s}$.

- GPS-Zeit: Zeitsystem des Global Positioning Systems, Zeitskala wie TAI, gegenüber TAI um konstant 19 s verschoben ($\text{GPS} = \text{TAI} - 19\text{s}$), Der Nullpunkt der GPS-Zeit ist am 6. Jänner 1980, 00:00 UT. Zu diesem Zeitpunkt war $\text{GPS} = \text{UTC}$. Da die GPS Zeit die Schaltsekunden nicht mitmacht, ist die GPS-Zeit derzeit 15 s vor UTC.
- GPS-Zeit (Wochensekunden): Als GPS-Woche wird eine kontinuierliche Wochenzählung seit Beginn des Jahres 1980 bezeichnet. Die GPS-Woche beginnt jeden Sonntag um 00:00 UT. Die Wochen werden von 0 bis 1023 (=10 Bit) hochgezählt. Im August 1999 wurde daher das erste Mal die Woche 1023 erreicht und der nächste Überlauf wird im April 2019 stattfinden.
- POSIX: Zeitskala wie GPS-Zeit. Nullpunkt der POSIX Zeitskala ist der 1. Jänner 1970. Die Festlegung stammt aus dem EDV-Bereich und hat deswegen Bedeutung erlangt, weil POSIX alternativ zur GPS Zeit in ASPRS LAS Files als Zeitsystem zulässig ist.

Praktische Erfahrungen haben gezeigt, dass es immer wieder zu Fehlern in der Datenprozessierung kommt, die auf dem Unwissen bezüglich des zugrunde liegenden Zeitsystems beruhen. Auf eine konsequente Berücksichtigung der Zeitangaben ist daher im Rahmen des Verwaltungssystems zu achten.

Wie zu Eingang des Abschnitts erwähnt, steht es dem Anwender frei, Informationen über den Strahlvektor näherungsweise als zusätzliches Attribut bei den ALS-Punkten abzulegen oder den Flugpfad mitzuverwalten. Bis dato wurde mit der Näherungsvariante das Auslangen gefunden, weswegen die Flugpfadverwaltung zwar wie in diesem Abschnitt beschrieben konzipiert, aber noch nicht in TopDM implementiert ist.

5 Anwendungsbeispiele

In diesem Abschnitt wird das Potential des vorgestellten Verwaltungskonzeptes anhand einer FWF Befliegung des Schlosses Schönbrunn aus dem Jahr 2005 demonstriert. Folgende Vorverarbeitungsschritte wurden vorab durchgeführt: Dekomposition der Laserechos aus der digitalisierten Wellenform, direkte Georeferenzierung der Echos auf Basis des Flugpfades (GNSS, IMU, Mounting Calibration), Qualitätskontrolle und Streifenausgleichung. Die präzise georeferenzierte Punktwolke samt allen Zusatzattributen wurde anschließend streifenweise in TopDM importiert. Für den Bereich des Schlosses und des Schlossparks wurden die ersten Echos selektiert und daraus ein DOM berechnet, welches als Schummerung in Abb. 2a dargestellt ist. Abb. 2b-f zeigen verschiedene Sets von ALS Punkten, basierend auf unterschiedlichen Filterkriterien. Allen Abfragen liegt folgende grundsätzliche Selektionsbedingung zu Grunde:

```
SELECT .... WHERE COORDINATES .X. WINDOW (765 338060 2050 338460) AND AGGREGATE='Steifen8';
```

Durch diese Bedingung wird die gesamte Punktwolke auf jene Punkte des Flugstreifens 8 eingeschränkt, welche im angegebenen Datenfenster liegen (Abb. 2b). Durch Anwendung von

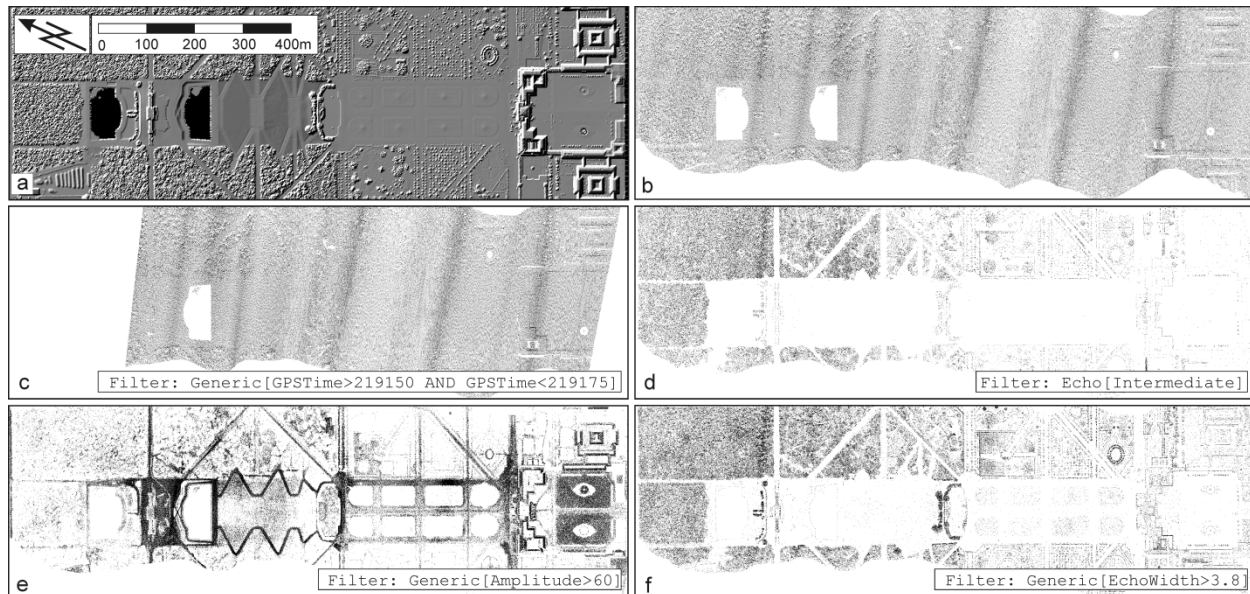


Abb. 2: Schloss Schönbrunn mit Gartenanlage; a) Schummerung des DOM, b) Alle Echos von Streifen 8 (ausgedünnt auf jeden 4. Punkt), c) 25 Flugsekunden von b, d) Zwischenechos, e) Echos mit Amplitude > 60 [DN], e) Echos mit Echoweite > 3.8 [ns], Daten: Schloss Schönbrunn Kultur und Betriebs GmbH

Filtern, kann die Auswahl noch verfeinert werden. So zeigt Abb. 2c alle Echos innerhalb eines 25 Flugsekunden-Ausschnittes und Abb. 2d alle Zwischenechos (d.h. Echos, die weder erstes noch letztes Echo sind). Man erkennt, dass Zwischenechos fast ausschließlich im Vegetationsbereich auftreten. Die Selektion nach Amplituden (Abb. 2e) wiederum lässt deutlich die Wege im Schlosspark und die offenen Flächen vor dem Schloss hervortreten, wogegen hier kaum Echos in der Vegetation oder den geneigten Dachflächen des Schlosses vorhanden sind. Diese Echos sind offensichtlich gut für die DGM Bestimmung verwendbar. Echos in der Vegetation und auch an steilen Flächen (Hauwände) sind meist durch hohe Echoweiten ausgezeichnet (Abb. 3f). Derart selektierte Punkte lassen sich daher gut für die Detektion von Gebäudeumrissen und Waldflächen nutzen. Die angegebenen Filterbeispiele wurden allesamt bewusst einfach gewählt. Je nach Aufgabenstellung lassen sich diese aber auch zu komplexen Bedingungen kombinieren und erlauben dadurch eine gezielte Datenauswahl für spezielle Anwendungen.

6 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurde ein Konzept für die landesweite Verwaltung von FWF ALS Daten und dessen Realisierung im Programmsystem TopDM vorgestellt. Neben den Koordinaten der Punkte und den klassischen Informationen, wie Zeitstempel und Intensität, erlaubt das Konzept ein Management von zusätzlichen punktbezogenen FWF Attributen, wie Amplitude, Echoweite Streuquerschnitt, aber auch von zugeordneten Informationen anderer Sensoren (Farbwerte) und aus der Datenprozessierung (Punktklassifizierung, Strahlvektor). Fachanwendungen im Bereich der Gebäudemodellierung, Forstwirtschaft oder Hydraulik sind dadurch nicht mehr länger auf Standardprodukte wie das DGM oder DOM angewiesen, sondern können großflächig auf die

originale Punktwolke mit allen Zusatzattributen zurückgreifen. Darüber hinaus wurde ein System zur Flugpfadverwaltung in den Grundzügen vorgestellt, dessen Implementierung noch aussteht. Das System ist bereits im praktischen Einsatz und hat sich bei der ALS-Befliegung der Stadt Wien (MA 41) sowie bei zahlreichen wissenschaftlichen Projekten am I.P.F. bereits bewährt.

7 Literaturverzeichnis

- ASPRS, 2010: URL: http://www.asprs.org/society/committees/lidar/lidar_format.html. Homepage des ASPRS LAS File Formats, [Stand:2010-06-02].
- DIN, 2004: Die SQL-Normen, Normen der Reihe ISO/IEC 9075. In: DIN-Mitteilungen 4/2004, S. 27- 36
- GDAL, 2010: URL: <http://www.gdal.org/>. Homepage der Geospatial Data Abstraction Library, [Stand:2010-06-02].
- HOCHSTÖGER, F., 1996: Software for Managing Country-Wide Digital Elevation Data. In: IAPRS, Vol. XXXI, Part B2, Vienna, Austria, 1996, S. 160–163
- INPHO, 2010: URL: <http://www.inpho.de/>. Homepage der Firma INPHO GmbH, [Stand: 02-06-2010]
- LOITSCH J. & MOLNAR L., 1991: A Relational Database Management System with Topological Elements and Topological Operators. In: Proceedings of Spatial Data 2000, Department of Photogrammetry and Surveying, University College London, 1991, S. 260–269
- NELSON, R. A., MCCARTHY, D. D., MALYS S., LEVINE, J., GUINOT, B., FLIEGEL, H. F, BEARD, R. L. & BARTHOLOMEW, T. R, 2001: The leap second: its history and possible future. *Metrologia*, **38** (6), S. 509-529
- OGC A, 2010: URL: <http://www.opengeospatial.org/standards/ct/>. OpenGIS Coordinate Transformation Service Implementation Specification, [Stand:2010-06-02].
- OGC B, 2010: URL: <http://www.opengeospatial.org/standards/sfa/>. OpenGIS Implementation Specification for Geographic information - Simple feature access - Part 1: Common architecture, [Stand: 2010-06-02]
- OPALS, 2010: URL: <http://www.ipf.tuwien.ac.at/opals/>. Dokumentation des Programmsystems OPALS, [Stand: 2010-06-02]
- ORACLE, 2010: URL: <http://www.oracle.com/technology/products/spatial/>. Oracle Spatial Homepage, [Stand:2010-06-02].
- PROJ4, 2010: URL: <http://trac.osgeo.org/proj/>. Homepage der Proj4 Cartographic Projections Library, [Stand:2010-06-02].
- REFRACTION RESEARCH, 2010: URL: <http://postgis.refractions.net/>. PostGIS Homepage, [Stand:2010-06-02].
- RIEGL, 2010: URL: <http://www.riegl.com>. Homepage der Firma Riegl Laser Measurement Systems, [Stand:2010-06-02].
- SKALOUD, J. & LICHTI, D., 2006: Rigorous approach to boresight self-calibration in airborne laser scanning. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* **61** (1), S. 47-59.
- WAGNER, W., ULLRICH, A., DUCIC, V., MELZER, T. & STUDNICKA, N., 2006: Gaussian decomposition and calibration of a novel smallfootprint full-waveform digitising airborne laser scanner. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* **60** (2), S. 100– 112.
- Warriner, T. & Mandlbürger G., 2005: Generating a New High Resolution DTM Product from various Data Sources. In: Proceedings of the 50th Photogrammetric Week, D. Fritsch (ed.), ISBN: 3-87907-421-6; S. 197 - 206.

Effiziente Verschattungsberechnung für die Solarpotenzialanalyse unter Berücksichtigung der Einstrahlungsintensität

JURI ENGEL & JÜRGEN DÖLLNER

In diesem Beitrag stellen wir ein Verfahren zur effizienten Berechnung von Verschattungsdaten vor, das insbesondere die Einstrahlungsintensität berücksichtigt und einen zentralen Bestandteil von Solarpotenzialanalysen bildet. Das Verfahren basiert auf der 3D-Analyse einer virtuellen 3D-Umgebung und nutzt dabei die Funktionalität von 3D-Grafikhardware, um die Berechnung zu beschleunigen, indem 3D-Analyserechnungen durch bildbasierte Verfahren approximiert werden. Bisherige Verfahren berechnen den Verschattungsgrad für eine definierte Zeitspanne, berücksichtigen aber nicht wann in dieser Zeitspanne die analysierte Fläche verschattet ist. Dies bestimmt jedoch maßgeblich die potenziell erzeugbare Energiemenge. Im vorgestellten Verfahren werden hierfür die für die Analyse herangezogenen Sonnenpositionen anhand der Einstrahlungsintensität gewichtet. Aus den somit erzeugten Verschattungsdaten mit gewichteten Werten kann die Reduktion der potenziell erzeugbaren Energiemenge aufgrund von zeitweiliger Verschattung präzise errechnet werden.

1 Einleitung

Den Kontext des vorgestellten Verfahrens bilden erneuerbare Energien, die maßgeblich dazu beitragen, die CO₂ Emission zu reduzieren und von fossilen Rohstoffen unabhängiger zu werden. Rund acht Prozent aller deutschen Wohngebäude verfügen mittlerweile über eine Solarstrom- oder Solarwärmanlage (BSW 12. Jan 2009). Sowohl private Investoren als auch Kommunen sind daran interessiert, weitere potentielle Flächen, insbesondere Dächer, zu identifizieren, die für die Anbringung von Solaranlagen geeignet sind. Für die Planungs- und Finanzierungsstrategien sind detaillierte Informationen über geeignete Flächen und die potenziell erzeugbare Energiemenge notwendig. Erst durch eine vollautomatische Solarpotenzialanalyse ist die großflächige Identifikation von geeigneten Flächen möglich, die den Behörden zum Beispiel die Erstellung eines „Solarpotenzialatlas“ ermöglicht.

Technisch ist die erzeugbare Energiemenge einer Photovoltaik-Anlage auf einem Dach abhängig von der Dachneigung und -ausrichtung sowie dem Grad der Verschattung (ŠŮRI & HOFIERKA 2004). Insofern ist die *Verschattungsanalyse* kritisch, da ein einzelnes verschattetes Modul die Gesamtleistung einer solchen Anlage erheblich reduzieren kann (WOYTE ET AL. 2003). Deshalb ist die Berücksichtigung der Reduktion der potenziell erzeugbaren Energiemenge durch Verschattung essentiell für die Auswahl von geeigneten Flächen für Photovoltaik-Anlagen, insbesondere bei zeitlich teilweise verschatteten Dächern. Hierauf liegt der Schwerpunkt des vorgestellten Verfahrens.

Als Grundlage dient der in ENGEL & DÖLLNER (2010) entwickelte Algorithmus zur effizienten Verschattungsberechnung für die Solarpotenzialanalyse, der auf der 3D-Analyse einer virtuellen 3D-Umgebung basiert und 3D-Grafikhardware nutzt, um die Berechnung zu beschleunigen, in-

dem die 3D-Analyserechnungen durch eine Folge bildbasierter Auswertungen approximiert werden.

Die Genauigkeit der Verschattungsberechnung ist maßgeblich von dem Zeitintervall für die Diskretisierung des untersuchten Zeitraums abhängig: Ein kürzeres Zeitintervall erhöht die Wahrscheinlichkeit, alle schattenwerfenden Merkmale der Umgebung zu berücksichtigen. Abb. 1 visualisiert die Ergebnisse der Analyse mit unterschiedlichen Zeitintervallen. Mit unserem Verfahren ist die Berechnungszeit nahezu unabhängig von dem Zeitintervall.

Des Weiteren ist die Genauigkeit der Verschattungsanalyse direkt abhängig von der geometrischen Genauigkeit und Auflösung des 3D-Umgebungsmodells. Diese Modelle stehen zunehmend in Form von amtlichen oder privatwirtschaftlichen virtuellen 3D-Modellen bereit, etwa in Form von digitalen Höhenmodellen (DEMs), die aus LiDAR-Daten rasterisiert werden, oder in Form virtueller 3D-Stadtmodelle (DÖLLNER ET AL. 2006, KOLBE 2009).

Das bisherige Verfahren berechnet den Verschattungsgrad für eine beliebige definierte Zeitspanne. Bei der Analyse wird aber nicht berücksichtigt, wann in dieser Zeitspanne die Fläche verschattet ist. Die Tages- und Jahreszeit bestimmt jedoch maßgeblich die Einstrahlungsintensität und somit die potenziell erzeugbare Energiemenge, z.B. über den Einstrahlungswinkel. So kann beispielsweise eine Anlage, die in den frühen Morgenstunden verschattet ist, sich immer noch für die Installation einer Solaranlage eignen, wenn in der restlichen Tageszeit ausreichend Energie produziert werden kann, um die Anlage wirtschaftlich zu betreiben.

Der hier vorgestellte Algorithmus berücksichtigt die Einstrahlungsintensität bei der Analyse, wobei die für die Analyse herangezogenen Sonnenpositionen anhand der Einstrahlungsintensität gewichtet werden. Aus den somit erzeugten Verschattungsdaten mit gewichteten Werten kann die Reduktion der potenziell erzeugbaren Energiemenge durch die Verschattung errechnet werden.

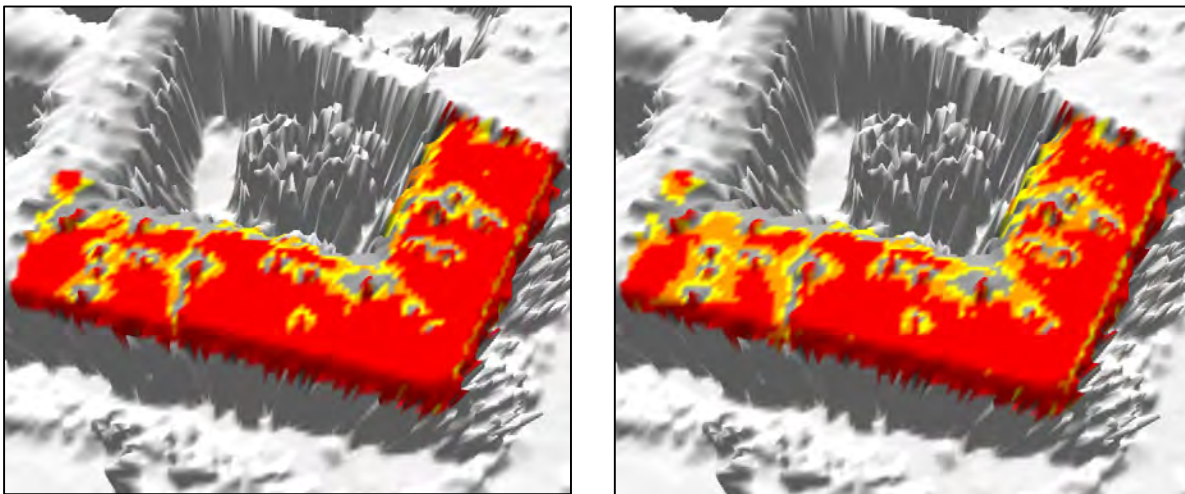


Abb. 1: Prozentuale Reduktion der potenziell erzeugbaren Energiemenge durch Verschattung (rot: <5%; orange: 5-10%; gelb: 10-15%; grau >15%). Die linke Grafik zeigt das Ergebnis der Analyse mit geringer Genauigkeit (272 Sonnenpositionen), die rechte mit hoher Genauigkeit (14262 Sonnenpositionen).

2 Verwandte Arbeiten

Eine Vielzahl von Algorithmen wurden für die Berechnung der Verschattung aus LiDAR- und DEM-Daten vorgestellt; darunter Verfahren, die auf Raytracing im DEM basieren (LUDWIG ET AL. 2009, KLÄRLE ET AL. 2008 und CARNEIRO ET AL. 2009). Dabei wird in einem bestimmten Zeitintervall für jede zu analysierende Rasterzelle die Verschattung berechnet. Von dieser Rasterzelle aus wird die Sichtlinie zur Sonne an einer bestimmten Sonnenposition zurückverfolgt. Für jede Rasterzelle dazwischen wird der Strahl auf einen Schnittpunkt mit der Umgebung getestet. Die Rasterzelle ist verschattet, wenn ein Schnittpunkt existiert. Die Verschattungsdaten werden bei LUDWIG ET AL. (2009) und KLÄRLE ET AL. (2008) als Ausschlusskriterium verwendet. Ist eine Rasterzelle an einem der analysierten Zeitpunkte verschattet, kommt sie nicht mehr für die Installation einer Solarzelle in Frage und es werden keine weiteren Berechnungen für diese Zelle durchgeführt.

KASSNER ET AL. (2008) benutzten die GIS Hillshade-Analysefunktion um für jede Sonnenposition die Verschattung zu berechnen. Auch hier wird die Verschattung lediglich als Ausschlusskriterium verwendet. Des Weiteren müssen bei diesem Ansatz für eine fehlerfreie Berechnung die Vegetationsobjekte identifiziert und mit höher aufgelösten Daten modelliert werden. RATTI & RICHENS (2004) und CARNEIRO ET AL. (2008) erstellen für jede Sonnenposition eine Shadow Map durch Image Processing des DEMs. Mit Hilfe dieser Shadow Maps kann dann für jeden zu analysierenden Punkt dessen Verschattung für diese Sonnenposition bestimmt werden, anhand derer entschieden wird, ob die Direktstrahlung an dieser Sonnenposition berücksichtigt wird.

Die Berechnungszeit all dieser Verfahren ist direkt proportional zu der Anzahl der berücksichtigten Sonnenpositionen. Bei dem von ENGEL & DÖLLNER (2010) vorgestellten und in diesem Beitrag erweiterten Verfahren hat die Anzahl der Sonnenpositionen hingegen nahezu keine Auswirkung auf die Berechnungszeit. Außerdem sind weder Erkennung noch Modellierung von Vegetation oder anderen Objekten notwendig. Die Funktionsweise dieses Verfahrens wird im nächsten Kapitel genauer vorgestellt.

JOCHEM ET AL. (2009a und 2009b) berechnen für jeden zu analysierenden Punkt einen Horizont. Der Horizont gibt für jeden Azimut die minimale Sonnenhöhe an, bei welcher der zu analysierende Punkt noch beleuchtet wird. Ist der Horizont berechnet, kann die Verschattung für jede Sonnenposition daraus ermittelt werden. Alle notwendigen Berechnungen werden dabei auf der CPU ausgeführt. Unser Ansatz beruht hingegen auf einer Implementierung, die die GPU heutiger 3D-Grafikhardware zur effizienten Berechnung nutzt.

3 Verschattungsberechnung durch bildbasierte 3D-Analyse

Die Berechnung, ob ein Punkt im Schatten liegt, kann auf eine Sichtbarkeitsberechnung zurückgeführt werden. Ist die Sonne von diesem Punkt aus sichtbar, dann liegt der Punkt nicht im Schatten; ist sie hingegen nicht sichtbar, liegt der Punkt im Schatten. Das von ENGEL & DÖLLNER (2010) vorgestellte Verfahren zur effizienten Berechnung von Verschattungsinformationen basiert auf dem Konzept der bildbasierten 3D-Analyse (ENGEL & DÖLLNER 2009). Die Sichtbarkeitsberechnung wird dabei durch Projektion und Rasterisierung mit Hilfe der 3D-Grafikhardware approximiert.

Die Eingabedaten für den Algorithmus sind ein digitales Höhenmodell (DEM), welches z.B. aus LiDAR Luftaufnahmen berechnet werden kann. Aus diesen Daten wird ein 3D-Modell durch Triangulation erstellt. Anschließend werden *Dachpunkte* anhand von topologischen Grundrisskarten identifiziert, für die die Analyse durchgeführt werden soll.

Für jeden Dachpunkt wird eine interne perspektivische Ansicht der 3D-Umgebung erzeugt. Dazu wird eine virtuelle Kamera auf einem Dachpunkt platziert und die 3D-Umgebung aus dieser Kameraposition gerendert. Da wir die Sichtbarkeit der Sonne ermitteln wollen, rendern wir zusätzlich einen ein Pixel großen *Sonnenpunkt* an jeder zu analysierenden Sonnenposition.

Anschließend wird eine Bildanalyse des gerenderten Bildes durchgeführt. Ist ein Sonnenpunkt sichtbar, dann ist auch die Sonne, die durch diesen Punkt approximiert wurde, von der Position der virtuellen Kamera aus sichtbar. Der analysierte Dachpunkt ist bei dieser Sonnenposition nicht verschattet. Diese Bildanalyse kann beschleunigt werden indem *Occlusion Queries* (BARTZ ET AL. 1998, BITTNER ET AL. 2004) benutzt werden. Occlusion Query ist eine Funktion der 3D-Grafikhardware, die die Anzahl der gerenderten Fragmente und damit die Anzahl der sichtbaren Sonnenpunkte zurückliefert. Dabei kann aber nur der Verschattungsgrad als Anteil der nicht sichtbaren Sonnenpunkte ermittelt werden. Der Einstrahlungswinkel, und allgemein die Einstrahlungsintensität, kann dabei nicht berücksichtigt werden. Die Erweiterung des Verfahrens um diese Berücksichtigung wird in den folgenden Kapiteln erläutert.

Die Berechnungszeit pro Dachpunkt ist dabei direkt proportional zu der Anzahl der gerenderten Primitive, die sich aus der Summe der Dreiecke des 3D-Umgebungsmodells und der Sonnenpunkte ergibt. Da die Anzahl der berücksichtigten Sonnenpositionen in der Regel viel kleiner ist als die Anzahl der Dreiecke, kann deren Anzahl und damit die Genauigkeit erhöht werden ohne den Zeitaufwand wesentlich zu erhöhen.

4 Berechnung der Einstrahlungsintensität

Die Einstrahlungsintensität wird für jede Sonnenposition, die bei der Analyse berücksichtigt wird, berechnet. Dabei werden zunächst die zu analysierenden Dachflächen und damit der Einfallswinkel der Einstrahlung nicht in die Berechnung einbezogen, sondern die maximale direkte Einstrahlung bei einem senkrechten Einstrahlungswinkel wird berechnet und der Sonnenposition statisch zugeordnet.

Für unsere Berechnungen haben wir das von PAGE J. K. (ED) (1986) veröffentlichte und von RITZENHOFF P. (1992) zusammenfassend erläuterte Strahlungsmodell verwendet. Die direkte Strahlung auf eine ideal der Sonnenposition nachgeführten Fläche bei einem klaren Tag I_c errechnet sich wie folgt:

$$I_c = K_d \cdot I_0 \cdot e^{(-T_L \cdot \delta_R \cdot m)}$$

Dabei ist K_d die Korrektur für den sich ändernden Erde-Sonne-Abstand:

$$K_d = 1 + 0,03344 \cdot \cos(\text{Tagesnummer} \cdot 360/365,25 - 2,8)$$

I_0 ist die Solarkonstante. T_L ist der Trübungsfaktor nach Linke und spiegelt die Einflüsse von Wasserdampf, Rauch, Staub und anderen Partikeln in der Atmosphäre wieder. Dieser Wert variiert abhängig von der Jahreszeit und den klimatischen Bedingungen am Standort und wird z.B. in

PAGE J. K. (ED) (1986) tabelliert. m ist die relative optische Luftmasse, die die Sonnenstrahlen durchqueren müssen. Sie ist abhängig von der Sonnenhöhe γ :

$$m = \frac{p/p_0}{\sin \gamma + 0,15 \cdot (\gamma + 3,885)^{-1,253}} \quad \gamma < 10^\circ$$

$$m = \frac{p/p_0}{\sin \gamma} \quad \gamma > 10^\circ$$

δ_R ist die optische Schichtdicke der Rayleigh-Atmosphäre:

$$\delta_R = \frac{1}{0,9 \cdot m + 9,4}$$

Da wir mit I_c die Sonnenstrahlung an einem klaren Tag berechnet haben, müssen wir noch die relative 4° Sonnenscheindauer σ_4 berücksichtigen. Zusätzlich wird eine Korrekturfunktion f_5 nach PAGE J. K. (ED) (1986) angewendet:

$$I = f_5 \cdot \sigma_4 \cdot I_c$$

5 Berücksichtigung der Einstrahlungsintensität bei der 3D-Analyse

Die berechnete Einstrahlungsintensität für eine Sonnenposition wird auf einen Grauwert im Wertebereich [0; 1] abgebildet. Dieser Wert wird dem Sonnenpunkt, der die Sonnenposition repräsentiert, als Farbattribut zugeordnet. Dabei entspricht die Eins im Wertebereich dem maximalen Grauwert und damit der maximalen Einstrahlungsintensität, die später in einem Pixel gespeichert werden kann.

Um die gesamte Einstrahlungsintensität für einen Dachpunkt zu erhalten, müssen die Intensitäten aller von diesem Dachpunkt sichtbaren Sonnenpositionen, d.h. die Grauwerte aller Sonnenpunkte, addiert werden. Dabei können keine Occlusion Queries benutzt werden, die bei dem bisherigen Verfahren eingesetzt wurden, um die Berechnungen zu beschleunigen. Mit einem Occlusion Query kann nur die Anzahl der gerenderten Pixel ermittelt werden, die Farbe dieser Pixel wird dabei nicht berücksichtigt. Um die Gesamtintensität zu erhalten kopieren wir das gerenderte Bild von dem Grafikspeicher in den Hauptspeicher, traversieren die Pixel und addieren die Grauwerte aller Sonnenpunkt-Pixel.

Bei der Rasterisierung durch die Grafikhardware werden zu Sonnenpunkten, deren Entfernung zueinander klein genug ist, Fragmente erzeugt, die sich überlagern. Die Verdeckung eines Fragments würde bedeuten, dass dessen Grauwert und damit die Einstrahlungsintensität der dazugehörigen Sonnenposition nicht berücksichtigt werden kann. Um trotzdem korrekte Ergebnisse zu erhalten, müssen die Grauwerte beider Fragmente addiert werden. Dies erreichen wir durch *Color-Blending* auf der Grafikhardware. Als Blend-Funktion verwenden wir die Additionsfunktion. Dadurch werden die Grauwerte aller Fragmente, die andere Fragmente verdecken, zu dessen Grauwerten addiert und in dem Ergebnisbild gespeichert.

Der Wertebereich der Pixel bleibt dabei weiterhin [0; 1]. Grauwerte, die durch die Addition diesen Bereich überschreiten, werden auf den Wert 1 beschränkt. Damit die Einstrahlungsintensität der dazugehörigen Sonnenpositionen nicht verloren geht, sondern berücksichtigt wird, muss bei

der Abbildung von Intensität auf Grauwert skaliert werden, so dass nicht die maximale Intensität auf 1 abgebildet wird, sondern ein Vielfaches davon. Es hat sich gezeigt, dass bei einer Auflösung von 128×128 Pixel das Zwei- bis Dreifache ausreichend ist.

Damit sich trotzdem so wenige Sonnenpunkte wie möglich überlagern, wählen wir für die Diskretisierung des untersuchten Zeitraums kein Intervall, welches ein ganzzahliger Teiler von 24 Stunden (bzw. 1440 Minuten) ist, sondern einen Wert, der davon abweicht, z.B. 57 Minuten statt einer Stunde. Dadurch erzielen wir eine gleichmäßigere Verteilung der berücksichtigten Sonnenpositionen auf der Himmelskugel (siehe Abb. 2), weil die Sonnenpunkte aufeinander folgender Tage nicht für die selbe Uhrzeit erzeugt werden und deshalb dicht nebeneinander sind und Muster bilden, sondern die Uhrzeiten und damit auch die Positionen versetzt sind. Falls zuvor die Einstrahlungsenergie für das Originalintervall berechnet wurde, müssen diese Werte für das angepasste Intervall skaliert werden (z.B. durch Multiplikation mit $57/60$).

Bisher haben wir nur die Sonneneinstrahlung auf eine zur Einstrahlungsrichtung senkrechte Fläche betrachtet. Dies würde einem dem Sonnenstand ideal nachgeführten Solarmodul entsprechen. Da wir aber Dächer identifizieren wollen, die für die Installation statischer Solarmodule geeignet sind, müssen wir den Einstrahlungswinkel bei jeder Sonnenposition berücksichtigen. Die Einstrahlungsintensität I bei einem Einstrahlungswinkel α ergibt sich wie folgt:

$$I_{\alpha} = I \cdot \cos \alpha$$

Diese Berechnung können wir aber nicht einmalig für alle Sonnenpositionen durchführen, weil der Einstrahlungswinkel von der Neigung und Orientierung der jeweiligen Dachfläche abhängig ist. Deshalb wird sie in einem *Vertex-Shader* (LINDHOLM ET AL. 2001) dynamisch durchgeführt, indem die Einstrahlungsintensität pro gerenderten Sonnenpunkt angepasst wird. Ein Vertex-Shader ist ein Programm, welches auf der 3D-Grafikhardware für jeden Vertex - in unserem Fall Sonnenpunkt - parallel ausgeführt wird. Der Shader erhält als Eingabe die Normale der Dachfläche. Die Vertexposition entspricht der Sonnenposition und die Vertexfarbe der normierten Strahlungsintensität für diese Sonnenposition. Der Pseudocode für den Shader sieht wie folgt aus:

```
faktor = punktprodukt(normale, normalisieren(vertexpos));
ausgabefarbe = faktor * eingabefarbe;
```

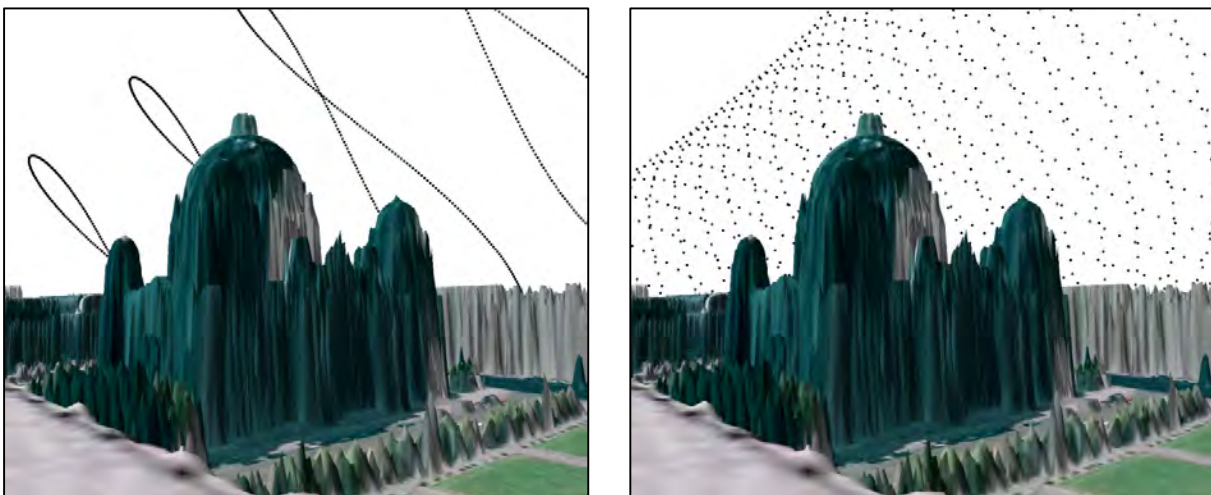


Abb. 2: Verteilung der berücksichtigten Sonnenpositionen. Die linke Grafik zeigt eine ungünstige Verteilung mit einem Intervall von einer Stunde, die rechte eine bessere Verteilung mit 57 Minuten.

Das Ergebnis dieser Berechnungen ist die Menge der direkten Strahlung für den kompletten untersuchten Zeitraum unter Berücksichtigung der Verschattung. Diese Strahlungsmenge kann ins Verhältnis gesetzt werden zu der maximalen Strahlungsmenge für das jeweilige Dach ohne Berücksichtigung der Verschattung. Dadurch kann visualisiert werden, wie viel potenziell erzeugbarer Energie einer auf diesem Dach angebrachten Solaranlage durch Verschattung verloren geht (siehe Abb. 3). Die berechnete Strahlungsmenge kann auch ins Verhältnis gesetzt werden zu der Strahlungsmenge eines optimal ausgerichteten Daches. Dadurch kann das Energiepotenzial eines Daches im Verhältnis zu anderen Dächern schnell eingeschätzt werden (siehe Abb. 4).

Vergleicht man die Ergebnisse mit denen einer Verschattungsanalyse ohne Berücksichtigung der Einstrahlungsintensität (Abb. 5), wird es deutlich wieso die Einstrahlungsintensität ein wichtiger Faktor ist. Eine relativ lange Verschattung der Dächer (bis zu 15%) führt nicht zwangsläufig zu einer hohen Reduktion der potenziell erzeugbaren Energiemenge (<5%). Dies ist der Fall, wenn die Dachfläche nur bei einem flachen Einstrahlungswinkel verschattet wird. Trotz einer Verschattung von bis zu 15% kann ein Dach optimal für die Installation einer Photovoltaikanlage sein (>90% der maximalen potenziell erzeugbaren Energiemenge).

6 Zusammenfassung

In diesem Beitrag haben wir die Erweiterung eines Verfahrens für effiziente Verschattungsberechnung um die Berücksichtigung der Einstrahlungsintensität vorgestellt. Die Verschattungsberechnung ist ein zentraler Baustein für die Solarpotenzialanalyse.

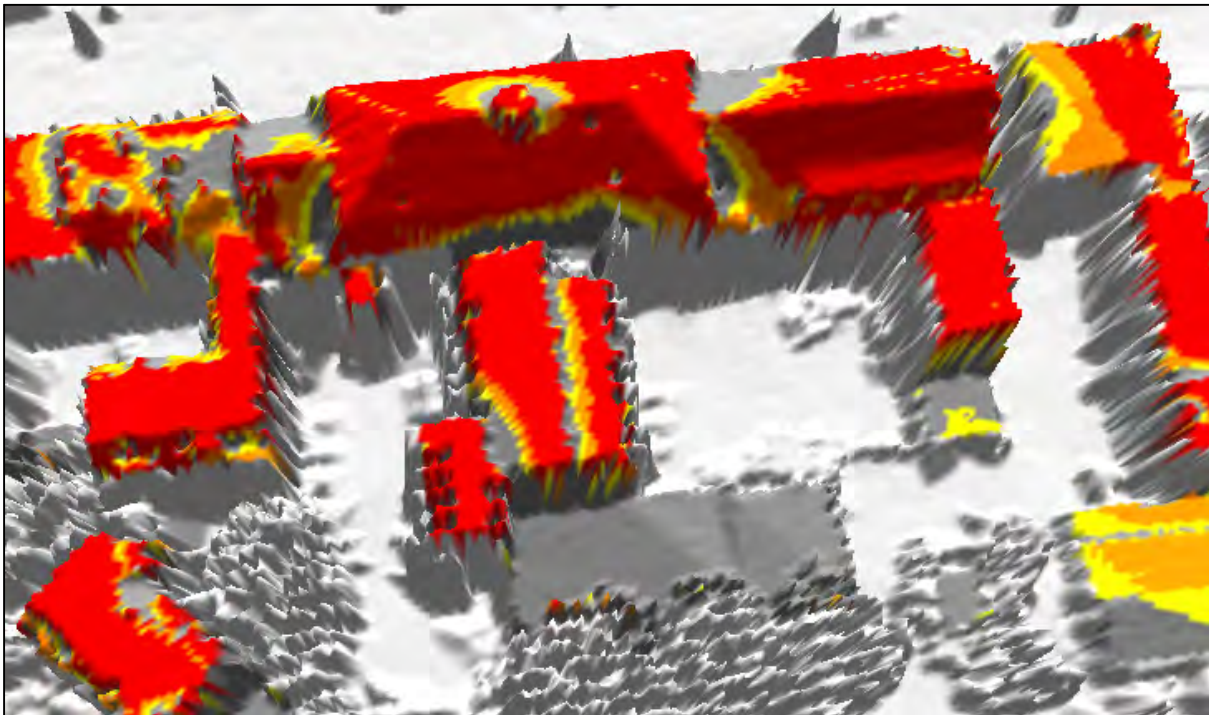


Abb. 3: Prozentuale Reduktion der potenziell erzeugbaren Energiemenge durch Verschattung (rot: <5%; orange: 5-10%; gelb: 10-15%; grau >15%).

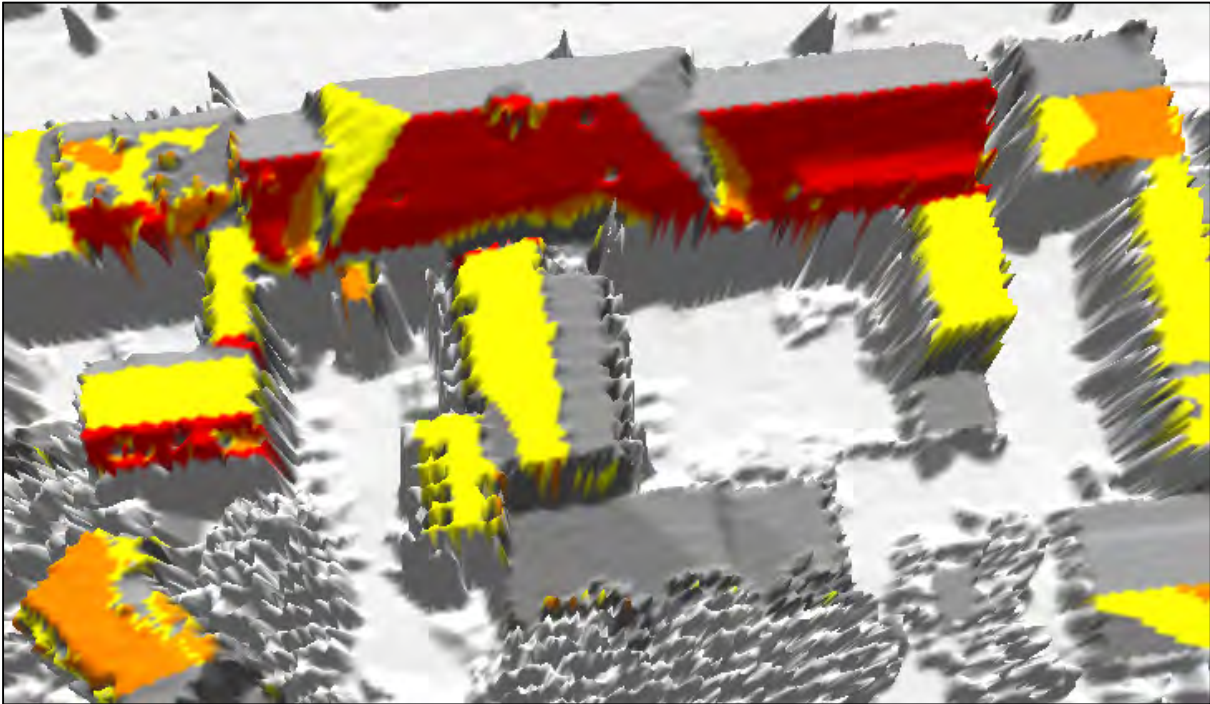


Abb. 4: Potenziell erzeugbare Energiemenge als Prozentsatz der maximal erzeugbaren Energiemenge einer optimal ausgerichteten Fläche (rot: >90%; orange: 80-90%; gelb: 70-80%; grau <70%).

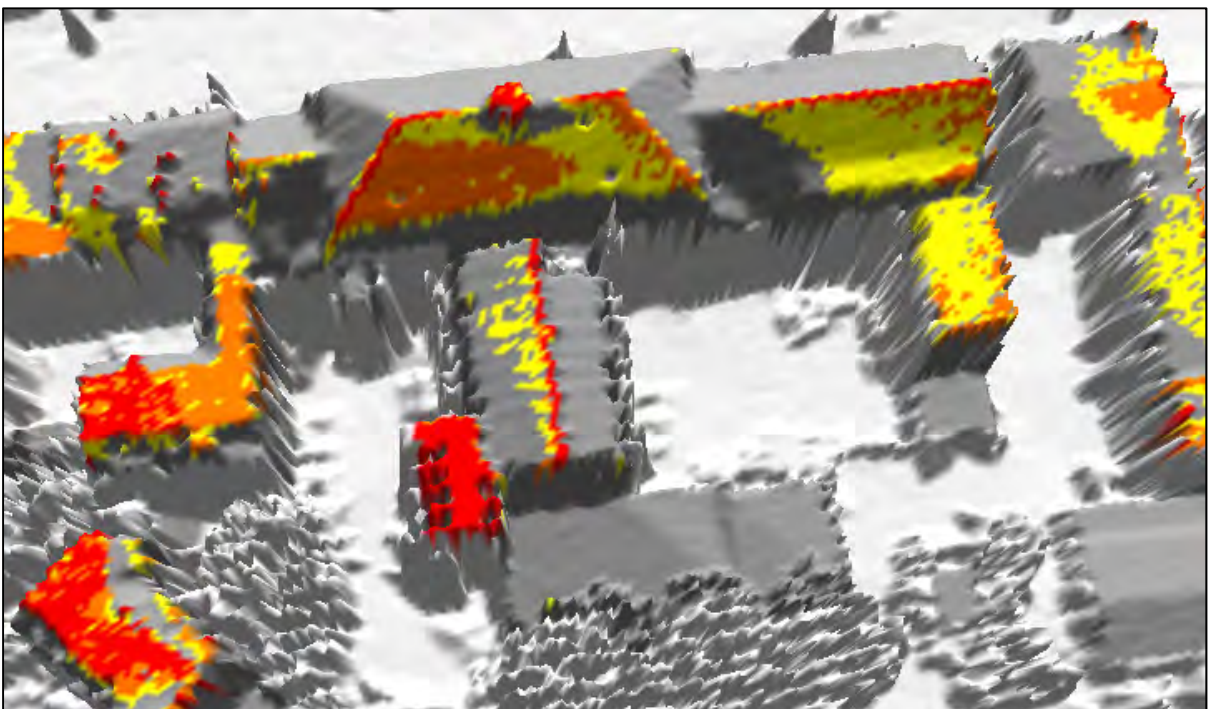


Abb. 5: Verschattungsgrad ohne Berücksichtigung der Einstrahlungsintensität. Das entspricht dem Anteil der Zeit im Schatten im Verhältnis zu der gesamten analysierten Zeitspanne (rot: <5%; orange: 5-10%; gelb: 10-15%; grau >15%).

Das Verfahren beruht auf der bildbasierten Analyse einer virtuellen 3D-Umgebung. Der Algorithmus wird größtenteils auf der GPU ausgeführt und kann so entsprechend effizient ausgeführt werden. Die Berechnungszeit ist nahezu unabhängig von der Anzahl der berücksichtigten Sonnenpositionen, was uns erlaubt, das Zeitintervall für die Diskretisierung des untersuchten Zeitraums zu reduzieren ohne die Berechnungszeit wesentlich zu erhöhen. Dadurch kann die Genauigkeit der Verschattungsberechnung erhöht werden, denn ein kürzeres Zeitintervall erhöht die Wahrscheinlichkeit, dass alle schattenwerfenden Merkmale der Umgebung berücksichtigt werden.

Bei dem bisherigen Verfahren wurde der Grad der Verschattung berechnet, also der Anteil der Zeit, in der ein Punkt verschattet ist, gemessen an dem gesamten untersuchten Zeitraum. Es wird jedoch nicht berücksichtigt, wann in diesem Zeitraum der Punkt verschattet ist. Der Zeitpunkt der Verschattung bestimmt aber maßgeblich, wie hoch die Reduktion der potenziell erzeugbaren Energiemenge ist (z.B. über den Einstrahlungswinkel). Wir haben das Verfahren so erweitert, dass die aus der Direktstrahlung potenziell erzeugbare Energiemenge für teilverschattete Flächen berechnet wird. Zusätzlich kann der prozentuale Anteil dieser Energiemenge an der maximal potenziell erzeugbaren Energiemenge der jeweiligen Dachfläche oder einer optimal ausgerichteten Dachfläche berechnet werden.

Ein weiterer Vorteil des vorgestellten Ansatzes besteht darin, dass weder eine Modellierung noch eine Rekonstruktion von 3D-Gebäuden, Dächern oder Vegetation aus den LiDAR-Daten für die Berechnungen notwendig sind. Der Algorithmus arbeitet ausschließlich auf dem digitalen Höhenmodell und kann für beliebige Flächen ausgeführt werden. Darüber hinaus ist es ohne Einschränkung möglich, explizite 3D-Modelle einzubinden, die z.B. lokal eine höhere Genauigkeit oder beliebige Topologie und Geometrie besitzen. Praktisch können insbesondere komplexe Gebäude, z. B. mit einem Gebäudevorsprung, berücksichtigt werden, die durch LiDAR-Daten nur unzureichend repräsentiert wären. Die Verschattungsberechnung selbst erlaubt es, alle Formen geometrischer Repräsentation von Umgebungsmodellen in beliebiger Kombination zu verarbeiten.

7 Danksagung

Dieses Forschungsprojekt wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert und ist Teil der InnoProfile Nachwuchsforschergruppe 3D-Geoinformationen (www.3dgi.de). Wir danken außerdem virtualcitySystems (VCS) für die freundliche Unterstützung und die Bereitstellung von Daten.

8 Literaturverzeichnis

- BARTZ D., MEIBNER M., HÜTTNER T. (1998): Extending graphics hardware for occlusion queries in OpenGL, in HWWS '98: Proceedings of the ACM SIGGRAPH/EuroGraphics workshop on Graphics Hardware, 97-104.
- BITTNER J., WIMMER M., PIRINGER H., PURGATHOFER W. (2004): Coherent hierarchical culling: Hardware occlusion queries made useful, in Proceedings EuroGraphics 2004, Volume 23, 615-624.

- BSW – BUNDESVERBAND SOLARWIRTSCHAFT (2009): BSW-Solar: Solarenergie ist Innovationsbeschleuniger der Bauwirtschaft, 12. Januar 2009.
- CARNEIRO C., MORELLO E., RATTI C., GOLAY F. (2008): Solar radiation over the urban texture: LiDAR data and image processing techniques for environmental analysis at city scale, 3d Geo-Information Sciences, 319-340.
- CARNEIRO C., KARZAND M., GOLAY F., LU Y., VETTERLI M. (2009): Assessing digital surface models by verifying shadows: a sensor network approach, in 6th International Symposium on Spatial Data Quality.
- ENGEL J., DÖLLNER J. (2009): Approaches Towards Visual 3D Analysis for Digital Landscapes and Its Applications, in Digital Landscape Architecture Proceedings 2009, pp. 33-41.
- ENGEL J., DÖLLNER J. (2010): Effiziente Verschattungsberechnung für die Solarpotenzialanalyse durch bildbasierte 3D-Analyse, in Proceedings of the GeoInformatik 2010.
- DÖLLNER J., KOLBE T. H., LIECKE F., SGOUROS T., TEICHMANN K. (2006): The Virtual 3D City Model of Berlin - Managing, Integrating, and Communicating Complex Urban Information, in UDMS.
- JOCHEM A., HÖFLE B., HOLLAUS M., RUTZINGER M. (2009): Object detection in airborne LiDAR data for improved solar radiation modeling in urban areas, in IAPRS.
- JOCHEM A., HÖFLE B., RUTZINGER M., PFEIFER N. (2009): Automatic roof plane detection and analysis in airborne LiDAR point clouds for solar potential assessment, in Sensors.
- KASSNER R., KOPPE W., SCHÜTTENBERG T., BARETH G. (2008): Analysis of the solar potential of roofs by using official LiDAR data, in ISPRS.
- KLÄRLE M., LUDWIG D., LANIG S. (2009): SUN-AREA – Ein Beitrag der Fernerkundung gegen den Klimawandel, in ZfV, 71-78.
- KOLBE T. H. (2009): Representing and Exchanging 3D City Models with CityGML, in 3D Geo-Information Sciences
- LINDHOLM E., KLIGARD M. J., MORETON H. (2001): A user-programmable vertex engine, in Proceedings of the 28th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, p.149-158.
- LUDWIG D., LANIG S., KLÄRLE M. (2009): Towards location-based analysis for solar panels by high resolution remote sensors (laser scanner), in 24th International Cartography Conference.
- RATTI C., RICHENS P. (2004): Raster analysis of urban form, in Environment and Planning B: Planning and Design, Volume 31, 297-309.
- RITZENHOFF P. (1992): Erstellung eines Modells zur Simulation der Solarstrahlung auf beliebig orientierte Flächen und deren Trennung in Diffus- und Direktanteil, in Bericht 2600 des Forschungszentrums Jülich.
- PAGE J. K. (ED) (1986): Prediction of Solar Radiation on Inclined Surfaces, in Solar Energy R&D in the European Community, Series F: Solar Radiation Data, Vol. 3.
- ŠÚRI M., HOFIERKA J. (2004): A new GIS-based solar radiation model and its application to photovoltaic assessments, in Transactions in GIS, Vol. 8.
- WOYTE A., NIJS J., BELMANS R. (2003): Partial shadowing of photovoltaic arrays with different system configurations: literature review and field test results, In Solar Energy, 217-233.

OPALS (Orientation and Processing of Airborne Laser Scanning data) – Konzept und Anwendungsbeispiele einer wissenschaftlichen Laserscanning Software

GOTTFRIED MANDLBURGER¹, JOHANNES OTEPKA¹, WILLI KAREL¹, BRUNO WÖHRER²,
WOLFGANG WAGNER¹ & NORBERT PFEIFER²

Zusammenfassung: In diesem Beitrag wird die neue Laserscanning Software OPALS vorgestellt. OPALS ist ein modulares Programmsystem zur automatischen Prozessierung großer Datenmengen, bestehend aus einzelnen Komponenten mit klar abgegrenzter Funktionalität. Ein schlankes Software Framework sorgt dafür, dass jedes Modul als ausführbares Kommandozeilenprogramm, als Python Modul und als C++ Klasse über DLL Zugriff zur Verfügung steht. Komplexe Prozessierungsabläufe werden durch Scripts realisiert. Zur Verwaltung großer Datenmengen wurde der OPALS Datenmanager entwickelt, welcher einerseits einen effizienten räumlichen Datenzugriff ermöglicht und andererseits ein System zur Verwaltung beliebiger punkbezogener Attribute zur Verfügung stellt. Neben dem Grundkonzept werden anhand eines Pakets zur Qualitätskontrolle erste konkrete Ergebnisse präsentiert.

1 Einleitung

Seit über einem Jahrzehnt ist flugzeuggetragenes Laserscanning (Airborne Laser Scanning, ALS) einer der Forschungsschwerpunkte am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung (I.P.F.) der TU Wien. Die wissenschaftlichen Beiträge zu diesem Gebiet umfassen Filterung von ALS-Punktwolken (KRAUS UND PFEIFER, 1998), Ableitung von Digitalen Geländemodellen (PFEIFER ET AL., 2001), Detektion und Modellierung von Geländekanten (BRIESE, 2004), Georeferenzierung von Flugstreifen (KAGER, 2004), Qualitätskontrolle und –dokumentation (RESSL ET AL., 2008) und zahlreiche Anwendungsgebiete, wie Gebäudemodellierung (ROTTENSTEINER UND BRIESE, 2002), (DORNINGER UND PFEIFER, 2008), ALS als Datengrundlage für hydrologische und hydraulische Modellierung (MANDLBURGER, 2006), Forstanwendungen (HOLLAUS ET AL., 2007) sowie Geomorphologie (SZEKELY ET AL., 2008). In jüngster Vergangenheit haben sich die Forschungen auf Sensoren, welche die gesamte Wellenform (Full Waveform) des rückgestreuten Lasersignals aufzeichnen (WAGNER ET AL., 2004), konzentriert. Die diesbezüglichen Fragestellungen beinhalten die Dekomposition (WAGNER ET AL., 2006) und radiometrische Kalibrierung der Laser-Echos sowie die Verbesserung von Digitalen Geländemodellen (DGM) auf Basis zusätzlicher, aus der Wellenform abgeleiteter Attribute (DONEUS UND BRIESE, 2006), (MANDLBURGER ET AL., 2007).

Ein wesentliches Paradigma der Arbeitsweise am I.P.F. ist seit jeher, die Ergebnisse wissenschaftlicher Forschung nicht nur in Form von Diplomarbeiten, Dissertationen, Konferenzbeiträ-

¹ Gottfried Mandlbürger, Johannes Otepka, Wilfried Karel & Wolfgang Wagner, Christian Doppler Labor „Räumliche Daten aus Laserscanning und Fernerkundung“ am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, TU Wien, Gusshausstr. 27-29, A-1040 Wien, E-Mail: gm{jo,wk,ww}@ipf.tuwien.ac.at

² Bruno Wöhrer & Norbert Pfeifer, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, TU Wien, Gusshausstr. 27-29, A-1040 Wien, E-Mail: bw{np}@ipf.tuwien.ac.at

gen und Artikeln in Fachzeitschriften zu veröffentlichen, sondern im gleichen Zuge auch praxistaugliche Umsetzungen zu erarbeiten. Diesem Grundgedanken folgend hat sich eine Tradition der Softwareentwicklung etabliert, wofür vor allem die beiden Programmsysteme SCOP++ (Interpolation, Visualisierung und Anwendung von DGMen) und ORIENT (simultaner Ausgleich von Messaufnahmen aus Photogrammetrie, Satellitenfernerkundung und Laserscanning) Beispiele sind. Die Motivation ist dabei stets die Schaffung einer Softwarebasis für nachhaltiges wissenschaftliches Arbeiten und nur in zweiter Hinsicht deren kommerzielle Verwertung. Dieses System hat sich bewährt.

Die ALS-Prozessierungskette beginnt bei der Dekomposition und direkten Georeferenzierung der digitalisierten Laserechos und reicht dann über Qualitätskontrolle der Punktwolke, ggf. Fein-Georeferenzierung der Flugstreifen und Klassifizierung der Echos bis hin zur DGM-Ableitung. Für einige der genannten Teilschritte lagen in Form der oben erwähnten Programme Teillösungen vor, für andere wurden diese im Zuge des Christian Doppler Labors „Räumliche Daten aus Laserscanning und Fernerkundung“ erarbeitet. Es mangelte allerdings an einer durchgehenden Prozessierungskette und an einer hinreichenden Ausrichtung der Programme auf die spezifischen Anforderungen des Laserscannings hinsichtlich der Datenmengen und -strukturen.

Im vorliegenden Beitrag stellen wir daher das Grundkonzept von OPALS, einer neuen, wissenschaftlichen Laserscanning Software, vor. Abschnitt 2 beschreibt eine bewährte Prozessierungskette zur Bearbeitung von ALS Projekten als Basis für OPALS. In Abschnitt 3 wird das Grundkonzept von OPALS vorgestellt, das im Abschnitt 4 anhand eines konkreten Moduls detaillierter erläutert wird. Auf den gegenwärtigen Stand wird in Abschnitt 5 eingegangen und der abschließende Abschnitt 6 enthält eine Zusammenfassung sowie einen Ausblick auf künftige Arbeiten.

2 ALS Datenprozessierung

In Abb. 1 ist eine vorgeschlagene Prozessierungskette, basierend auf Full Waveform (FWF) ALS Daten dargestellt. Der erste Abschnitt behandelt dabei die Ableitung der 3D-Punktwolke, ausgehend von den ursprünglichen Sensordaten. Dieser Prozess besteht einerseits aus der Analyse der Echo-Wellenform, wobei für jedes Echo Distanz, Amplitude (Signalstärke) und Echoweite (Signalaufweitung) bestimmt werden. Zusammen mit dem Flugpfad und dem Auslenkwinkel werden die 3D-Koordinaten der Objektpunkte durch polares Anhängen berechnet. Anschließend kann für jedes Laserecho durch radiometrische Kalibrierung der sogenannte Streuquerschnitt (Cross Section) ermittelt werden. An dieser Stelle wird erstmals eine Verwaltung der Punktdaten erforderlich, da nachfolgende Qualitätsprüfungen einen effizienten Zugriff auf die (streifenweise organisierten) Punktdaten erfordern. Geprüft werden dabei die Vollständigkeit der Punktabdeckung durch Punktdichtekarten sowie die relative und absolute Orientierung der Flugstreifen, z.B. durch farbkodierte (vertikale) Streifendifferenzen. Letzteres setzt streifenweise Digitale Oberflächenmodelle (DOM) sowie die Liste aller überlappenden Streifenpaare voraus, deren Bestimmung wiederum eine streifenweise Organisation der ALS-Punkte nahelegt. Zeigen die Ergebnisse der Qualitätskontrolle ein Verbesserungspotential auf, so ist anschließend eine Kalibrierung des Messsystems und/oder eine Streifenausgleichung durchzuführen, wodurch eine neue 3D-Punktwolke entsteht. Der Zyklus von Qualitätskontrolle und -verbesserung ist dabei so lange zu wiederholen, bis die gewünschten Kriterien eingehalten sind.

OPALS

Orientierung und Prozessierung von Airborne Laserscanning Daten

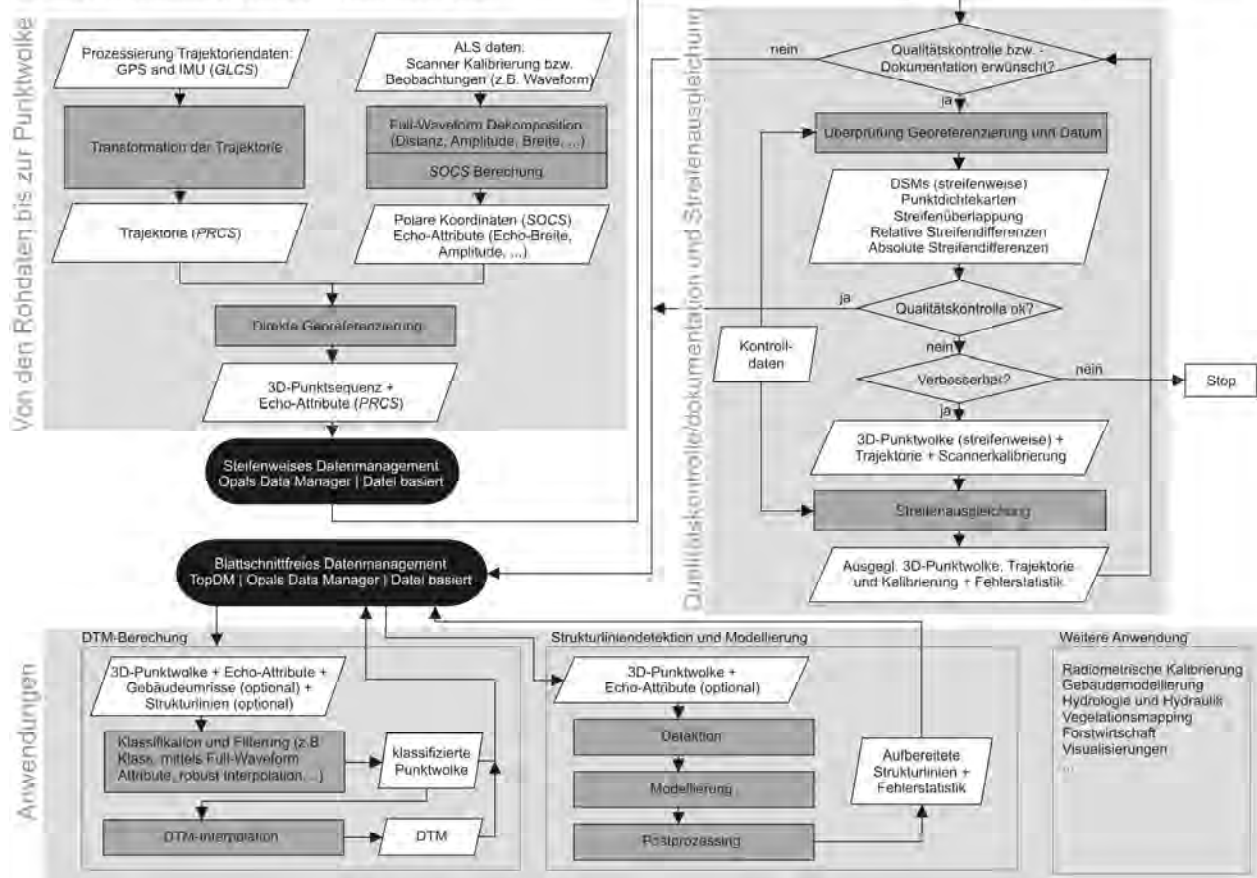


Abb. 1: Prozessierungskette zur Bearbeitung von ALS-Projekten

Sobald die endgültige 3D-Punktwolke vorliegt, ersetzt eine kachelweise oder blattschnittfreie Datenverwaltung die zuvor streifenweise Organisation. Die nächsten wesentlichen Schritte in der Prozessierungskette sind die Klassifizierung aller Echos in Boden- und (verschiedene Klassen von) Nicht-Bodenpunkte(n) sowie die Ableitung von natürlichen und künstlichen Strukturlinien (Geländekanten, Gerippelinien, etc.). Diese Prozesse bauen im Wesentlichen auf geometrischen Kriterien auf (Verteilung der Punkthöhen, Schnittwinkel zwischen Flächen-Patches, etc.), aber darüber hinaus können auch die FWF Echoattribute zur Verbesserung der Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Ergebnisse beitragen. Die zugrunde liegende Datenverwaltung muss daher sowohl einen schnellen räumlichen Datenzugriff als auch ein flexibles Schema zur Vorhaltung beliebiger Punktattribute zur Verfügung stellen. Die Berechnung des DGM bzw. DOM erfolgt schließlich entweder als regelmäßiges Gitter, als hybrides Gitter mit eingebetteten Strukturlinien oder als unregelmäßiges Dreiecksnetz (Triangular Irregular Network, TIN). Diese beiden Hauptprodukte jedes ALS-Projektes stellen einen Basisdatensatz für anschließende, fachspezifische Anwendungen dar, wie Gebäudemodellierung, Vegetationskartierung, hydraulische Modellierung zur Simulation von Überschwemmungsgrenzen und andere mehr.

Die ALS Software muss heute in der Lage sein, Milliarden von Messpunkten innerhalb eines einzigen ALS-Projektes zu verarbeiten. Ein leistungsstarkes Datenmanagement ist dafür die

Grundvoraussetzung. Dateibasierte Datenorganisation, selbst auf der Basis von binären Formaten wie LAS (ASPRS, 2010) oder ESRI Shapefile (ESRI, 1998), ermöglichen nur teilweise die Verwaltung von beliebigen Punktattributen und stellen darüber hinaus nicht die für einen effizienten räumlichen Zugriff erforderlichen geometrischen Indizes zur Verfügung. Geodatenbanken wie PostgreSQL/PostGIS (REFRACTION RESEARCH, 2010) oder Oracle Spatial (ORACLE, 2010) bieten diese Möglichkeiten zwar sowohl hinsichtlich der Geometrie als auch der Attribute, die Stärken dieser Systeme liegen aber eher im Bereich der Langzeit-Speicherung und Archivierung denn im Beinahe-Echtzeit Datenzugriff, wie er für ALS Projekte notwendig ist.

3 Software Konzept

Als wesentliche Ziele von OPALS können folgende Punkte festgehalten werden:

- Vollständige Prozessierungskette von den ursprünglichen Sensordaten bis hin zum DGM und darüber hinausgehenden Produkten
- Automatischer Arbeitsablauf für sehr große Datenmengen
- Rasche Verfügbarkeit von Forschungsergebnissen in Form von Software-Modulen
- Plattform für nachhaltige wissenschaftliche Entwicklung über die Dauer einer Dissertation hinaus

Um dies zu erreichen, sieht das OPALS Basiskonzept folgende Kernpunkte vor:

- Modularer Aufbau bestehend aus kleinen Komponenten (Modulen)
- Verfügbarkeit der Module als Kommandozeilenprogramme, Python Module und als C++ Klassen
- Individuelle Prozesssteuerung durch Scripts
- Datenverwaltung, basierend auf dem OPALS Datenmanager (ODM)
- Schnittstellen für effizienten Datenaustausch mit DGM-, GIS- und Grafikprogrammen
- Weitgehender Verzicht auf Interaktivität

OPALS ist hauptsächlich auf automatisierte Datenverarbeitung ausgelegt. Bewusst wird daher auf eine raffinierte graphische Benutzeroberfläche und auf interaktive Editierschritte verzichtet. Dies mag auf den ersten Blick nachteilig wirken. Andererseits ist die Funktionalität von OPALS in kleine, wohl definierte und frei kombinierbare Module aufgeteilt, die, angepasst an die jeweiligen Problemstellungen, flexibel zu Prozessierungsketten zusammengestellt werden können. Zum Beispiel wird die Erstellung einer farbkodierten Höhenstufenkarte durch die Aneinanderreihung von drei Modulen erreicht: dem Datenimport, der DGM-Interpolation und der eigentlichen Ableitung der farbkodierten Darstellung. Dieses Konzept erleichtert die Wiederverwendbarkeit der einzelnen Komponenten in unterschiedlichen Anwendungsbereichen. OPALS Module können darüber hinaus in verschiedene Produktionsumgebungen eingebettet werden, da jedes Modul in drei Ausprägungen vorliegt und daher folgendermaßen angesprochen werden kann: (i) von der Kommandozeile als ausführbares Programm, (ii) in Python als plattformunabhängiger Python Code und (iii) innerhalb von C++ Programmen über eine DLL Schnittstelle. Letzteres erlaubt erfahrenen Benutzern, OPALS Komponenten in die eigene C++ Programmierumgebung einzubinden. Im Gegensatz dazu ermöglichen die beiden erstgenannten Varianten (stand-alone Programm und Python Modul) eine Integration in Shell oder Python

Scripts. Scripts stellen dabei ein mächtiges Werkzeug dar, da sie die Zusammenstellung komplexer Prozessabläufe durch beliebige Kombination von OPALS Modulen erlauben.

Wie bereits erwähnt, ist ein effizientes Datenmanagement von höchster Wichtigkeit. Aus diesem Grund wurde zur Verwaltung von aus ALS gewonnenen Daten der OPALS Datenmanager (ODM) entwickelt. Dieser gewährleistet einen schnellen räumlichen Zugriff auf Punkt- und Liniendaten selbst für sehr große Projektgebiete. Der ODM operiert als räumlicher Zwischenspeicher und verbindet die Einfachheit und Effizienz einer dateibasierten Prozessierung mit der Flexibilität und Erweiterbarkeit von Datenbanksystemen (siehe Abschnitt 3.2). Zum Einlesen der Daten aus unterschiedlichen Datenformaten oder aus Geo-Datenbanken sowie zum Aufbau der ODM Datenstruktur ist ein eigenes Modul vorgesehen. Nachfolgende Anwendungsmodule verwenden den ODM als Input und haben über das interne ODM-Interface Zugriff auf die Punktkoordinaten und -attribute. Analog dazu sorgt ein Export Modul dafür, dass der Inhalt des ODM wieder in eine Reihe von unterstützten Datenformaten bzw. Datenbanken ausgegeben werden kann. Wegen des Verzichts auf interaktive Komponenten ist ein effizienter Datenaustausch zu externen Tools wie DGM-, GIS-, Editier- und Visualisierungsprogrammen umso wichtiger. Dabei nutzt OPALS zahlreiche Open Source Lösungen, wie etwa die Geospatial Data Abstraction Library GDAL (GDAL, 2010) für den Zugriff auf Gitterdaten und die OGR Simple Feature Library (Untermenge von GDAL) zum Austausch von Vektordaten.

Neben der durchgängigen Prozessierungskette und der Handhabung großer Datenmengen, ist die Beschleunigung der Umsetzung von Forschungskonzepten zu Softwaremodulen ein weiteres Ziel. Das wird im Wesentlichen durch den Einsatz eines schlanken Frameworks erreicht. Wissenschaftler mit geringen IT-Kenntnissen können sich daher stärker auf ihre eigentliche Forschungsarbeit konzentrieren, da das Framework viele allgemeine Aufgaben wie Einlesen und Überprüfen der Benutzereingaben, Fehlerbehandlung und Logging übernimmt. In den folgenden Unterabschnitten werden das OPALS Framework und das Grundkonzept des OPALS Datenmanagers näher vorgestellt. Alternative Softwarekonzepte sind z.B. in (DAVID ET AL., 2008) beschrieben.

3.1 OPALS Framework

Jedes OPALS Modul ist so angelegt, dass es gewisse Eingabedaten übernimmt, darauf unter Berücksichtigung bestimmter Berechnungsparameter Algorithmen anwendet und schließlich einen Output erzeugt. Dieser generelle Ablauf beinhaltet eine Reihe gleichartiger, immer wiederkehrender Aufgaben, wie die Festlegung der Modul-Schnittstelle, Überprüfung von Benutzereingaben, Fehlerbehandlung, Fortschrittskontrolle, Lizenzabfrage und dergleichen. Bei der Verwendung von technisch orientierten Programmiersprachen wie C++ ist die Umsetzung dieser Aufgaben aufwändig, während die Implementierung des eigentlichen Algorithmus nur einen kleinen Teil des Programmcodes ausmacht. Das OPALS Framework nimmt hier dem Programmierer diese allgemeinen organisatorischen Aufgaben ab.

Einerseits ermöglicht dies eine schnellere öffentliche Verfügbarkeit und Anwendbarkeit von Forschungsergebnissen, andererseits sorgt der Rahmen auch für die Einhaltung gewisser Namenskonventionen, für eine einheitliche Ausprägung von Logdateien und für ein konsistentes Verhalten und Erscheinungsbild der individuellen Module. Dies wiederum ist eine wesentliche

Voraussetzung für die reibungslose Interoperabilität der Module sowie für möglichst kurze Einarbeitungszeiten der Endanwender.

Wie bereits erwähnt, stellen die Definition des Modul-Interfaces und die Überprüfung von Benutzereingaben zentrale Merkmale des Frameworks dar. Vom Modulprogrammierer müssen dabei für jede Option (Parameter) lediglich ein Optionsname, der entsprechende Datentyp, ein Optionalitäts-Indikator sowie ein Beschreibungstext definiert werden. Der Name einer Eingabedatei mag als repräsentatives Beispiel dienen:

```
(inputfile, std::string, OPALS_MANDATORY, "input file name")
```

Diese Option wird festgelegt durch einen intuitiven Namen (*inputfile*), akzeptiert Werte vom Typ String (C++ Standard template library string, *std::string*), die Angabe dieser Option ist zwingend, was durch den Optionalitäts-Indikator *OPALS_MANDATORY* angezeigt ist, und die Bedeutung ist im Hilfetext erläutert. Auf dieser generischen Beschreibung aufbauend, führt das Framework eine Reihe von einheitlichen Operationen durch. Zunächst werden für jede Option set-, get- und isSet- Funktionen zum Setzen und Abfragen von Optionswerten erzeugt, wobei die Optionsnamen und -typen Berücksichtigung finden. Durch den Einsatz von Präprozessor Makros wird automatisch folgender Code generiert:

```
std::string get_inputfile() const;
void set_inputfile ( const std::string &infile );
bool isSet_inputfile() const;
```

Darüber hinaus erfolgt, wiederum auf Basis von Makros, die automatische Umsetzung als ausführbares Programm, Python Modul und Shared Library mit C++ Interface. Schließlich stellt das Framework einheitliche Funktionen zum Schreiben von Logdateien in einer wohldefinierten XML Struktur und ein System zur Fehlerbehandlung, basierend auf Ausnahmen (exceptions), zur Verfügung. Für eine detailliertere Besprechung eines Beispielmoduls sei auf den Abschnitt 4 verwiesen.

3.2 OPALS Datenmanger

Im Vergleich zur Flexibilität und Allgemeinheit von räumlichen Datenbanken benötigen Anwendungen im Bereich von OPALS nur eine eingeschränkte Menge räumlicher Operationen auf Basis der originalen Punktwolke. Die Abfrage von Nächsten-Nachbarn-Punkten bzw. eines gewissen Datenfensters ist von zentraler Bedeutung für DGM-Interpolation, Abschätzung von Flächennormalen, Segmentierung und ähnliche Aufgaben. Unter Berücksichtigung der Eigenschaften der Originaldaten und der erforderlichen Abfragen wurde der OPALS Datenmanger (ODM) dabei mit Hinblick auf maximale Performance implementiert. Der ODM arbeitet als räumlicher Zwischenspeicher, aufbauend entweder auf einer low-level dateibasierten Verwaltung oder einer im Hintergrund laufenden Geo-Datenbank.

Der ODM speichert Punktdaten in einem K-d-Baum, einer Verallgemeinerung eines binären Suchbaumes (BENTLEY, 1975), und komplexere Geometrien in einem R*-Baum (BECKMANN ET AL., 1990). Der K-d-Baum ist eine äußerst schnelle räumliche Indizierungsmethode. Es handelt sich dabei um einen statischen Index, der zwar lediglich auf Punkte angewendet werden kann, dessen herausragende Performance aber die Aufteilung in zwei getrennte Indizes rechtfertigt. Beide sind derart im ODM verpackt, als wären alle Geometrien in einem einzigen räumlichen Index zusammengefasst. Ferner müssen beide Indizes „multithread safe“ sein, da moderne

Computer über mehrere Rechenkerne (CPUs) verfügen und die Prozessierung daher parallelisiert erfolgen kann, wodurch in der Regel von mehreren Threads aus simultan auf den ODM zugegriffen wird. Große ALS-Projekte können heute leicht die Grenzen des verfügbaren RAM Speichers übersteigen. Daher war es notwendig, einen erweiterten K-d-Baum zu entwickeln, welcher die gerade nicht benötigten Daten in effizienter Weise auf Festplatte auslagert. Dazu wird der gesamte Datenbereich in Kacheln (Tiles) aufgeteilt und die Punkte jeder Teilkachel in einem separaten K-d-Baum indiziert. Ein intelligentes Stapelsystem sorgt dafür, dass die Auslagerung von Kacheln auf ein notwendiges Minimum reduziert wird. Weitere Details zur Punktdatenverwaltung mittels mehrfacher K-d-Bäume sind in (OTEPKA ET AL., 2006) beschrieben.

Abgesehen von schnellen räumlichen Abfragen, stellt der ODM auch ein Verwaltungsschema zur Speicherung von Punktattributen beliebiger Anzahl und beliebigen Datentyps zur Verfügung. Diese zusätzlichen Attribute stammen entweder aus einer vorangegangenen Analyse der Signal-Wellenform (Amplitude, Echoweite...), oder sie können von OPALS Modulen berechnet worden sein. Die drei Komponenten des Flächennormalenvektors (n_x , n_y , n_z) z.B. können in jedem ALS Punkt berechnet und als zusätzliches Attribut im ODM gespeichert werden, wodurch diese Information nachfolgenden Modulen (zB. Segmentierung) als Input zur Verfügung steht. Der ODM dient daher auch als Medium zum Austausch von Informationen zwischen den einzelnen Modulen.

4 Modul Beispiel

In diesem Abschnitt wird das OPALS Basiskonzept anhand des `opalsGrid` Moduls näher erläutert. Die Aufgabe von `opalsGrid` ist es, aus der ALS-Punktswolke (in Form des ODM) ein regelmäßiges Gitter zu interpolieren und in einem von GDAL unterstützten Datenformat abzuspeichern. Dabei kommen einfache Interpolatoren wie gleitende Mittel oder Schrägebenen auf der Basis der n nächsten Nachbarn zum Einsatz. Um der besseren Klarheit Willen werden in diesem Beispiel nur die fünf wichtigsten Optionen angeführt, während das tatsächliche `opalsGrid` Modul eine detailliertere Parametrisierung erlaubt.

Wie bereits im Abschnitt 3.1. erwähnt, muss der Modulprogrammierer im Wesentlichen die generische Parameterbeschreibung und den eigentlichen Algorithmus bereitstellen. In unserem Beispiel wird die folgende Optionsliste verwendet:

```
(( inFile,          Path,          OPALS_MANDATORY, "input ODM file name"      )) \
(( outFile,        vector<Path>, OPALS_ESTIMABLE, "output gridfile name"    )) \
(( gridSize,       float,         OPALS_OPTIONAL,  "model grid width"        )) \
(( interpolation,  IplMethod,     OPALS_OPTIONAL,  "interpolation method"    )) \
(( neighbours,    int,           OPALS_OPTIONAL,  "nr of nearest neighbours")) \
```

Das OPALS Framework generiert daraus automatisch den C++ Code für die Ausprägung als ausführbares Programm sowie als Python/C++ API. Der folgende Bildschirminhalt erscheint beispielsweise, wenn `opalsGrid` ohne weitere Option in der Kommandozeile eingegeben wird:

```
Usage opalsGrid:
--inFile arg input ODM file name
--outFile arg (=estim) output gridfile name
--gridSize arg (=1) model grid width
--interpolation arg (=p) interpolation method
--neighbours arg (=8) nr of nearest neighbours
```

Für jede Option wird eine Zeile ausgegeben, welche mit dem Optionsnamen beginnt, gefolgt von dem Schlüsselwort 'arg', im Falle dass für diese Option ein Wert definiert werden kann. Optionen, deren Werte geschätzt werden können, sind durch '(=estim)' kenntlich gemacht, während sonst die konstanten Defaultwerte in runden Klammern angegeben sind. Für zwingend anzugebende Optionen fehlt diese Angabe. Am Zeilenende befindet sich ein beschreibender Text. OPALS nutzt die Open Source C++ Bibliothek Boost (BOOST, 2010), welche die C++ Standardbibliothek um viele nützliche und effizient implementierte Komponenten erweitert. Im folgenden Codebeispiel, welches die Deklaration der C++ Klasse *ModuleGrid* zeigt, wird boost::filesystem als Datentyp für Input- und Outputdateien verwendet (wie auch bereits in der generischen Parameterbeschreibung zuvor):

```
class ModuleGrid : virtual public ModuleBase
{
    typedef boost::filesystem::path Path;
    typedef opals::GridInterpolator IplMethod;
public:
    // Constructors and Destructor
    ModuleGrid();
    ModuleGrid(const ModuleGrid &ref);
    virtual ~ModuleGrid() {};
    // set parameters
    void set_inFile ( const Path &inFile );
    void set_outFile ( const std::vector<Path> &outFile );
    void set_gridSize ( const float &gridSize );
    void set_interpolation ( const IplMethod &interpol );
    void set_neighbours ( const int &neighbours );
    // query if parameters are set
    bool isSet_inFile() const;
    bool isSet_outFile() const;
    ...
    // get parameter value functions
    Path get_inFile() const;
    ...
    int get_neighbours() const;
protected:
    virtual void finalizeModuleInput();
    virtual void runModule();
    void estimate_outFile();
};
```

Diese Klassendeklaration stellt die Basis für das C++ DLL- und das Python Interface dar, wobei die Python Module mittels der boost::python Bibliothek automatisch generiert werden. Der Programmierer muss darüber hinaus lediglich die finalizeModuleInput() Funktion zur Überprüfung der Querabhängigkeiten von Parametern und die eigentliche runModule() Funktion implementieren. In der Klassendeklaration scheint auch eine estimate_outFile() Funktion auf: Diese wird vom Framework automatisch aufgrund des entsprechenden Optionalitäts-Indikators erzeugt und ist ebenfalls geeignet zu implementieren. Im konkreten Fall kann Name der Outputdatei in Abhängigkeit des Namens der Eingabedatei festgelegt werden). Das abschließende Codebeispiel zeigt, wie opalsGrid in ein Python Script integriert werden kann:

```
#Simple opalsGrid Python Example
#+++++
from opalsGrid import *
mygrid = Grid()
print "Running opalsGrid..."
mygrid.set_inFile('stripl.odm')
mygrid.set_outFile('stripl-dtm.tif')
mygrid.set_gridSize(.05)
mygrid.run()
print "Done!"
```

Im konkreten Fall wird ein regelmäßiges 0.5m Gittermodell im GeoTiff Format (kenntlich durch die Endung *.tif*) erzeugt. Für die nicht angegebenen Optionen werden die entsprechenden Defaultwerte verwendet (*interpolation*: movingPlanes, *neighbours*: 8).

5 Erste Ergebnisse

Als erstes Paket ist opalsQuality bereits als Betaversion verfügbar. Es handelt sich dabei um eine Sammlung von Modulen zur Qualitätskontrolle von ALS Punktwolken. Das Ziel ist dabei, einen schnellen Überblick über die erfassten Daten, deren Vollständigkeit sowie Passgenauigkeit zu bekommen. Die relevanten Produkte dabei sind: Oberflächenmodelle, Punktdichtekarten, 3D-Streifendifferenzmaße und dergleichen. Diese bilden eine fundierte Basis für die Entscheidung, ob weitere Vorverarbeitungsschritte, wie etwa Streifenausgleichung, erforderlich sind. Die Tabelle 1 gibt einen Überblick über die Module, welche innerhalb von opalsQuality zum Einsatz kommen.

Tab. 1: Liste der Module im opalsQuality Paket

Modul	Beschreibung
opalsImport	Einlesen der ALS Punktwolke in den ODM
opalsExport	Ausgabe der ALS Punktwolke aus dem ODM
opalsGrid	Einfache und schnelle Gitter-Interpolation auf Basis der Punktwolke
opalsCell	Ableitung von Rastermodellen via Aggregierung von Punkt-/Attributdaten
opalsBounds	Ableitung von Streifenbegrenzungs-Polygonen auf Basis des ODM
opalsOverlap	Bestimmung der Liste aller überlappenden Streifenpaare
opalsDiff	Berechnung von Differenzmodellen (Gitter)
opalsAlgebra	Algebraische Verknüpfung mehrerer Gittermodelle (zB. Mosaike, Masken...)
opalsShade	Ableitung von Schummerungen (Rasterkarten)
opalsZColor	Ableitung von farbkodierten Rasterkarten
opalsLSM	Berechnung von 3D-Transformationen überlappender Streifen via Least Squares Matching (LSM)
opalsHisto	Berechnung von Histogrammen und statistischen Kenngrößen

Abgesehen von den aufgelisteten Modulen, enthält opalsQuality auch eine Reihe von Python Scripts, z.B. für die automatische Ableitung von farbkodierten Streifendifferenzen oder von Punktdichtekarten. Abb. 2 oben zeigt ein Mosaik von farbkodierten Höhendifferenzen zweier Streifenpaare (21-22 und 22-23), in deren Ableitung folgende Module involviert waren: opals-Import zum Einlesen der Daten, opalsGrid zur Berechnung der streifenweisen Oberflächenmodelle aus den letzten Echos, opalsBounds zur Ableitung der Streifenumrandung und opalsOverlap zur Bestimmung der überlappenden Paare, opalsDiff zur Berechnung der Differenzmodelle und schließlich opalsZColor zur Ableitung der farbkodierten Rasterkarten sowie opalsAlgebra für deren Mosaikierung. Anschließend wurden mit opalsLSM paarweise die relativen 3D-Verschiebungen der beiden Streifenpaare ermittelt. Der verbesserte Zustand, welcher das Potential bei Anwendung einer Streifenausgleichung wiedergibt, ist in Abb 2 unten dargestellt.

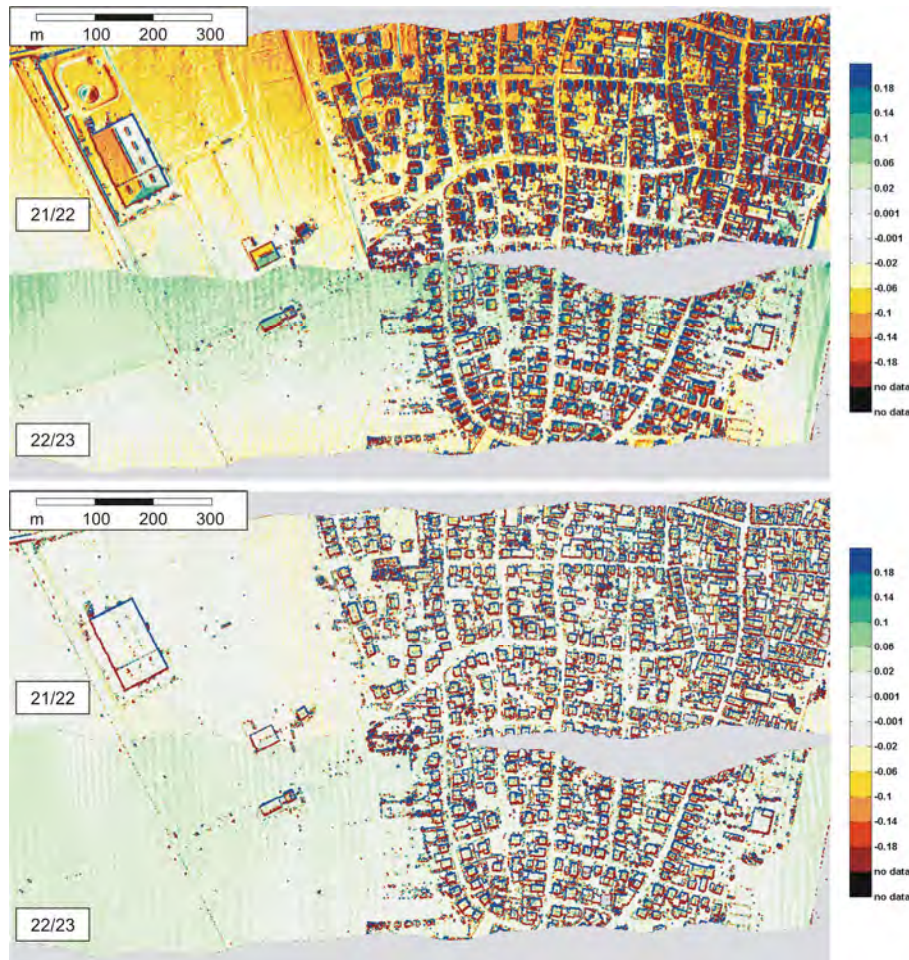


Abb.2: Farbkodierte Höhendifferenzen zweier Streifenpaare, oben: Ausgangszustand, unten: Verbesserter Zustand nach Anbringung einer mittels LSM bestimmten 3D-Verschiebung pro Streifenpaar, Daten: Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz

6 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Artikel wurden das Basiskonzept und erste Anwendungen der neuen wissenschaftlichen ALS Software OPALS vorgestellt. OPALS ist ein modulares Programmsystem, welches sich vor allem auf automatische Prozessierung großer Datenmengen konzentriert, wofür ein effizientes Management der ALS Punkte Grundvoraussetzung ist. Der OPALS Datenmanager, welcher einen raschen räumlichen Zugriff auf Milliarden von ALS Punkten erlaubt und zusätzlich ein flexibles Verwaltungsschema für beliebige Punktattribute bietet, wurde vorgestellt. Darüber hinaus ermöglicht ein schlankes Software-Framework, dass sich Wissenschaftler auf die Lösung ihrer Forschungsprobleme konzentrieren können, indem es zahlreiche zentrale Aufgaben übernimmt. Dadurch profitiert die gesamte wissenschaftliche Gemeinschaft, da Forschungskonzepte rascher umgesetzt werden können. OPALS ist bis zu einer maximalen Anzahl von 1 Mio. Punkten kostenlos verfügbar und kann von der Homepage des I.P.F. heruntergeladen werden (<http://www.ipf.tuwien.ac.at/opals>). Für den unlimitierten Einsatz von OPALS, in einem kommerziellen oder universitären Umfeld, wird eine moderate Preispolitik angestrebt. In diesem

Sinne versteht sich OPALS als Initiative zum wissenschaftlichen Fortschritt im Bereich des Laserscannings.

Erste Erfahrungen mit einem Paket zur Qualitätskontrolle der ALS Punktwolke wurden bereits gesammelt und die Ergebnisse in diesem Beitrag vorgestellt. Derzeit sind weitere Pakete für die Analyse und Kalibrierung der Signalform sowie zur Georeferenzierung von Flugstreifen in Arbeit. Um eine durchgehende Prozessierungskette von den ursprünglichen Sensordaten bis hin zu einem genauen und zuverlässigen DGM zu erreichen, liegen noch viele Schritte vor uns, welchen wir mit Zuversicht entgegensehen, da die ersten Erfahrungen mit OPALS Anlass für Optimismus geben.

7 Danksagung

Unser Dank gilt dem Christian Doppler Labor für "Räumliche Daten aus Laserscanning und Fernerkundung" und den beteiligten Firmenpartnern für deren Beitrag zur Entwicklung von OPALS.

8 Literaturverzeichnis

- ASPRS, 2010: URL: http://www.asprs.org/society/committees/lidar/lidar_format.html.
Homepage des ASPRS LAS File Formats, [Stand:2010-06-02].
- BECKMANN, N., KRIEGEL, H.-P., SCHNEIDER, R. & SEEGER, B., 1990: The r*-tree: An efficient and robust access method for points and rectangles. In: H. Garcia-Molina and H. V. Jagadish (eds), Proceedings of the 1990 ACM SIGMOD International Conference on Management of Data, Atlantic City, NJ, May 23-25, 1990, ACM Press, S. 322–331.
- BENTLEY, J. L., 1975: Multidimensional binary search trees used for associative searching. Communications of the ACM **18** (9), S. 509–517.
- BOOST, 2010: URL: <http://www.boost.org/>. Homepage der Boost C++ Bibliotheken, [Stand:2010-06-02].
- BRIESE, C., 2004: Three-dimensional modelling of breaklines from airborne laser scanner data. In: IAPRS, Vol. XXXV, B3, Istanbul, Turkey.
- DAVID, N., MALLET, C. & BRETAR, F., 2008: Library concept and design for lidar data processing. In: GEOgraphic Object Based Image Analysis (GEOBIA) Conference, Calgary, Canada.
- DONEUS, M. & BRIESE, C., 2006: Digital terrain modeling for archaeological interpretation within forested areas using fullwaveform laserscanning. In: The 7th International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage VAST, Cyprus.
- DORNINGER, P. & PFEIFER, N., 2008: A comprehensive automated 3d approach for building extraction, reconstruction, and regularization from airborne laser scanning point clouds. Sensors **8** (11), S. 7323–7343.
- ESRI, 1998: URL: <http://www.esri.com/library/whitepapers/pdfs/shapefile.pdf>. ESRI Shapefile Technical Description, [Stand:2010-06-02].
- GDAL, 2010: URL: <http://www.gdal.org/>. Homepage der Geospatial Data Abstraction Library, [Stand:2010-06-02].
- GRASS GIS, 2010: URL: <http://grass.osgeo.org/>. Homepage von Grass GIS, [Stand:2010-06-02].

- HOLLAUS, M., WAGNER, W., MAIER, B. & SCHADAUER, K., 2007: Airborne laser scanning of forest stem volume in a mountainous environment. *Sensors* **7** (8), S. 1559–1577.
- KAGER, H., 2004: Discrepancies between overlapping laser scanning strips - simultaneous fitting of aerial laser scanner strips. In: IAPRS, XXXV, B/1, Istanbul, Turkey, S. 555–560.
- KRAUS, K. & PFEIFER, N., 1998: Determination of terrain models in wooded areas with airborne laser scanner data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* **53**, S. 193–203.
- KRAUS, K. & PFEIFER, N., 2001: Advanced DTM generation from LIDAR data. In: IAPRS, XXXIV, 3/W4, Annapolis, MD, USA, S. 23–30.
- MANDLBURGER, G., BRIESE, C. AND PFEIFER, N., 2007: Progress in LiDAR sensor technology - chance and challenge for DTM generation and data administration. In: Proceedings of the 51th Photogrammetric Week, D. Fritsch (ed.), Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg, Germany, S. 159–169.
- MANDLBURGER, G., HAUER, C., HÖFLE, B., HABERSACK, H. & PFEIFER, N., 2009: Optimisation of lidar derived terrain models for river flow modelling. *Hydrology and Earth System Sciences*, **13** (2009), S. 1453 - 1466.
- OGC, 2010: URL: <http://www.opengeospatial.org/>. Homepage des Open Geospatial Consortium, [Stand:2010-06-02].
- ORACLE, 2010: URL: <http://www.oracle.com/technology/products/spatial/>. Oracle Spatial Homepage, [Stand:2010-06-02].
- OTEPKA, J., BRIESE, C. & NOTHEGGER, C., 2006: First steps to a topographic information system of the next generation. In: Symposium of ISPRS Commission IV - Geo Spatial Databases for Sustainable Development, Goa, India.
- PFEIFER, N., STADLER, P. & BRIESE, C., 2001: Derivation of digital terrain models in the SCOP++ environment. In: Proceedings of OEEPE Workshop on Airborne Laserscanning and Interferometric SAR for Detailed Digital Terrain Models, Stockholm, Sweden.
- REFRACTION RESEARCH, 2010: URL: <http://postgis.refractions.net/>. PostGIS Homepage, [Stand:2010-06-02].
- RESSL, C., KAGER, H. & MANDLBURGER, G., 2008. Quality checking of ALS projects using statistics of strip differences. In: IAPRS, XXXVII, S. 253 – 260.
- ROTTENSTEINER, F. & BRIESE, C., 2002: A new method for building extraction in urban areas from high-resolution LIDAR data. In: IAPRS, XXXIV, 3A, Graz, Austria, S. 295 – 301.
- SZEKELY, B., HOLLAUS, M., ZAMOLYI, A., DRAGANITS, E., RONCAT, A. & PFEIFER, N., 2008: Some geoscientific applications of airborne laser scanning dtms in austria. *Journal of Alpine Geology* **49**, S. 109–110.
- WAGNER, W., ULLRICH, A., MELZER, T., BRIESE, C. & KRAUS, K., 2004; From single-pulse to full-waveform airborne laser scanners: potential and practical challenges. In: IAPRS, XXXV, Istanbul, Turkey
- WAGNER, W., ULLRICH, A., DUCIC, V., MELZER, T. & STUDNICKA, N., 2006: Gaussian decomposition and calibration of a novel smallfootprint full-waveform digitising airborne laser scanner. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* **60** (2), S. 100– 112.

Die flächendeckende ALS-Datenerfassung des Bundeslandes Steiermark

zur DGPF - Jahrestagung

RUDOLF L. HÜTTER¹ & OSWALD MÖRTH²

Zusammenfassung: Für das Bundesland Steiermark werden im Zeitraum 2008-2012 Airborne Laserscanner (ALS) Daten erhoben und über das GIS-Steiermark bereitgestellt. Projektorganisation und Folgeauswertungen der ALS-Daten werden durch vollständige GIS-Integration unterstützt. Die technische Umsetzung in der Verwaltung und vor allem der Einsatz einer speziellen ArcGIS-Extension zur Laserdatenbearbeitung (QCoherent/LP360) werden dargestellt.

1 Motivation

Im Rahmen der Arbeiten, die innerhalb einer Landesverwaltung durchzuführen sind, hat sich der Einsatz von GIS-Systemen seit über zwei Jahrzehnten durchgesetzt. Auf diese Weise können die Grundlageninformationen immer genauer und vor allem schneller bereitgestellt und somit die Effizienz und Effektivität der Verwaltung wesentlich gesteigert werden. Unter der Fülle von Datenebenen, die – jede auf ihre Art – wichtig sind, treten Grundlageninformationen wie Höhen- und Bilddaten in besonderem Maß hervor.

So werden vor allem Hochwasserabflussmodellierungen in den letzten Jahren immer öfter als sogenannte 2D-Berechnungen durchgeführt. Darunter wird die Verwendung hochgenauer Geländemodelle verstanden, welche die Querprofile der bisher durchgeführten 1D-Berechnungen ersetzen.

Diese Geländemodelle wurden bisher projektweise durch ALS³-Erfassung entlang der Flussschläuche erzeugt. Das führte zu einer Vielzahl heterogener, nur bedingt miteinander verknüpfbarer Datensätze, deren Langzeitspeicherung aufwendig und deren Weiterverwendbarkeit daher nur eingeschränkt möglich ist.

Aber eben diese Weiterverwendung der ALS-Daten ist der eigentliche Mehrwert, der aus der doch recht kostspieligen Erzeugung gewonnen werden kann. Denn ein Punkt hat sich schon bei den ersten Datensätzen klar herauskristallisiert: In den Daten steckt mehr Information als für eine Abflussberechnung benötigt wird und diese kann den unterschiedlichsten Fachgebieten – quasi als Nebenprodukt – zur Verfügung gestellt werden.

¹ Referent f. Fernerkundung, Amt der Steiermärkischen Landesregierung, LBD-Stabsstelle Geoinformation, Stempfergasse 7, 8010, Graz, Österreich; E-Mail: <mailto:rudolf.huetter@stmk.gv.at>

² Leiter der Stabsstelle Geoinformation, Amt der Steiermärkischen Landesregierung, LBD-Stabsstelle Geoinformation, Stempfergasse 7, 8010, Graz, Österreich; E-Mail: <mailto:oswald.moerth@stmk.gv.at>

³ Airborne Laser Scanner = engl. LIDAR (Light Detection And Ranging)

Vor allem durch die rasante technische Entwicklung der LIDAR-Systeme eröffnet sich eine Fülle von Einsatzgebieten, die bisher mangels Informationen noch nicht bearbeitet werden können (z.B. Rutschungserfassung, Lawinensimulationen, flächendeckende archäologische Prospektion, Forstanwendungen, Objekterkennung).

2 Vorbereitung und Ausschreibung

Als Grundlage für die landesweite Erfassung von ALS-Daten wurde eine Bedarfsabschätzung in den Abteilungen des Amts der Landesregierung durchgeführt. Dabei wurden nicht nur jene Abteilungen einbezogen, in denen bisher schon projektweise ALS-Daten Verwendung fanden, sondern auch alle anderen potentiellen Nutzer derartiger Daten.

Mit diesen Informationen wurde über die Landesamtsdirektion ein Beteiligungsschlüssel unter jenen Abteilungen erarbeitet, die sich zur Kooperation bereit erklärt hatten.

So konnte, neben dem erforderlichen Regierungssitzungsbeschluss (LBD-GIS-71.04-2/2008-15), auch eine Vorlage für einen Antrag an den Steiermärkischen Landtag erarbeitet werden (Beschluss Nr. 1082 aus der 37. Sitzung der XV. Gesetzgebungsperiode, 0.06.2008).

Auf Basis dieses Regierungs- und Landtagsbeschlusses wurden die Arbeiten zur EU-weiten Ausschreibung der Leistungen in Angriff genommen (Büro Terzaki, Wien). Dafür wurden ein offenes Verfahren im Oberschwellenbereich BVergG 2006 gewählt: „Airborne Laserscanner (ALS) Daten für Teilgebiete der Steiermark (L-420278-8523)“. Den Zuschlag erhielt die Bietergemeinschaft „Vermessung AVT ZT GmbH - Dipl.-Ing. Peter Schmid - Milan Geoservice GmbH“, Eichenweg 42, A-6460 Imst.

Darüber hinaus konnte mit der Wildbach- und Lawinenverbauung ein externer Projektpartner gewonnen werden, der wichtige Schutzprojekte in der Steiermark damit abwickelt.

3 Rahmenbedingungen

Die Steiermark, das zweitgrößte und waldreichste Bundesland Österreichs, erstreckt sich über 16.392 [km²] vom Hohen Dachstein mit einer Seehöhe (über Adria) von 2995 [m] bis an die Grenze von Slowenien südöstlich von Radkersburg mit einer Seehöhe von knapp 200 [m].

Dem moderat strukturierten Beck- und Hügelland im Südosten stehen die schroffen Ausläufer des Alpenhauptkammes im Nordosten gegenüber. Hier liegt die besondere Herausforderung für die Planung der Erfassungsparameter, die durch Erfahrungen aus anderen Bundesländern untermauert werden konnte.

Neben den fachlichen Vorgaben, wie Lage- und Höhengenaugigkeit (Hochwasserabflussmodellierung: technische Projekte), Punktdichte (Gebäudeauswertungen: Raumordnung, Umgebungslärmrichtlinie) und Punktklassifikation (Naturschutz, Land- und Forstwirtschaft) war die generelle Prämisse, dass alle Arbeiten (Planung, begleitende Projektkontrolle, Aufbereitung und Analyse der Ergebnisse) über das Geographische Informationssystem des Landes Steiermark abzuwickeln sind. Damit ist ein möglichst reibungsfreier Zugriff aller Anwender auf die Datenbestände möglich und die Bereitstellung der Daten für externe Anwender (im Rahmen von Landesaufträgen und kommerziell) kann effizient durchgeführt werden.

Die Technische Begleitung des Projektes (Ausschreibung, Ergebniskontrolle) erfolgt vom Joanneum Research/ Institut für Digitale Bildverarbeitung, Graz.

4 Technische Parameter

Detaillierte Informationen sind dem technischen Leistungsverzeichnis der Ausschreibung zu entnehmen (LBD-GIS 71.04-2/2008-22). Die wichtigsten Inhalte seien hier dennoch angeführt:

4.1 Punktdichte

Für Bereiche unter 2000 [m] Seehöhe ist der Flug mit einer mittleren Punktdichte von mindestens 4 [ALSP⁴/m²] durchzuführen. Für alle höheren Bereiche mit einer mittleren Punktdichte von mindestens 2 [ALSP/m²] durchzuführen. Die Ergebnisse werden jeweils für einen Flugblock kontrolliert. Dafür wird ein Raster mit 10x10 [m²] Maschenweite verwendet. Für jede dieser Rasterzellen wird die Anzahl der Punkte ermittelt und dieses Ergebnis wird wiederum mit einem MW⁵ von 1x1 [km²] überprüft. Die statistische Auswertung dieser Überprüfung wird wie folgt durchgeführt:

95 [%] aller Testzellen müssen die jeweils geforderte mittlere Punktdichte (200 bzw. 400 Punkte pro 100 [m²]) erreichen. Weitere 4 [%] aller Testzellen, welche die zuvor genannten Kriterien nicht erreichen, müssen mindestens 1 Punkt pro 100 [m²] aufweisen.

Physikalisch kritische Bereiche wie Gewässer, Metall- oder Glasdächer etc. werden für die Kontrolle berücksichtigt. Darüber hinaus wird der gesamte Datensatz mit einem MW von 2x2 [m²] auf Löcher untersucht. Diese Vorgangsweise sichert eine möglichst flächendeckende Datenerfassung.

4.2 Punktdichte

Die Geocodierung muss eine absolute Genauigkeit von $\sigma \pm 40$ [cm] in der Lage und von $\sigma \pm 15$ [cm] in der Höhe – auf ebener, befestigter Fläche – erreichen.

Die Standardabweichung der relativen Lage- und Höhengenaugkeit in den Überlappungsbereichen der Streifen dürfen für die Lage ± 20 [cm] und für die Höhe ± 10 [cm] betragen. Etwaige periodische Muster in glatten Flächenelementen dürfen maximal eine Amplitude von 10 [cm] aufweisen. Die Verifikation erfolgt anhand unabhängiger Kontrollflächen, die über das Projektgebiet verteilt sind. Diese Kontrollflächen müssen vom Auftragnehmer als ESRI-Shapefiles⁶ bekannt gegeben werden. Die Kontrollstelle führt ihre Kontrollen an davon abweichenden Orten durch, die ebenfalls über Shapefiles verortet werden.

4.3 Klassifikation

Die Lieferungen der Punktwolke sollen in Flugstreifen erfolgen. Wobei die Streifen Daten zusätzlich einer halbautomatischen Klassifikation unterzogen werden müssen. Die Einteilung

⁴ ALS-Punkte

⁵ **M**oving **W**indow

⁶ **E**nvironmental **S**ystems **R**esearch **I**nstitute – GIS-Provider; Vektordatenformat

greift hier die Vorgaben aus der ASPRS⁷-Formatspezifikation für LAS⁸ 1.1 auf, eingeschränkt auf folgende Klassen:

Tab. 1: LAS-Klassen der ALS-Punktwolke

Klasse	Inhalt
1	Mehrfachechos und Ausreißer
2	Bodenpunkte
3	Vegetation (>0,5 [m] bis 3,0 [m])
4	Vegetation (höher als 3,0 [m])
6	Gebäude, Brücken, etc.
7	Nicht zuordenbare Punkte, Leitungen etc.
9	Wasser

4.4 Raster

Neben den streifenweisen, klassifizierten Punktwolken sind zusätzlich noch aufbereitete Rasterdaten mit einer Maschenweite von 1x1 [m²] gefordert.

Diese sind das gefilterte DGM⁹, welches nur die Erdoberfläche – also „last pulse¹⁰“ – widerspiegelt und das DOM¹¹, welches alle Gebäude, Bäume, Brücken, Leitungen etc. – also „first pulse¹²“ – enthält. Das DOM entspricht den Höhenmodellen, die über Autokorrelation in der Photogrammetrie erzeugt werden.

4.5 Koordinatensysteme

Die Integration aller Ergebnisse in die Datenbanken des GIS-Steiermark führt vor allem in der Geocodierung der ALS-Daten zur einer geänderten Vorgangsweise:

In der Steiermark werden alle digitalen Geodaten bereits im System UTM-33N vorgehalten. Das hat den Vorteil, dass die Datenverwaltung nicht vom sonst üblichen Gauß-Krüger-Meridianstreifensystem beeinflusst wird, in welchem die Steiermark in die beiden Streifen M31 und M34 (bezogen auf Ferro) zerfällt.

Um einen optimalen Übergang zwischen den beiden Bezugssystemen zur ermöglichen, wird im GIS-Steiermark eine spezielle 7-Parameter-Transformation verwendet, die alle derzeit verfügbaren Bestimmungspunkte (Identpunkte) für die Steiermark berücksichtigt.

Um den Aufwand für die GIS-Einarbeitung zu minimieren, müssen die Ergebnisdaten in zwei Systemen geliefert werden:

- UTM-33N Koordinaten bezogen auf ETRS89 für die Speicherung im ArcSDE.

⁷ American Society for Photogrammetry and Remote Sensing

⁸ LASer File Format – definiert durch ASPRS

⁹ Digitales GeländeModell

¹⁰ Reflexion entlang eines Laserstrahles mit der längsten Laufzeit

¹¹ Digitales OberflächenModell

¹² Reflexion entlang eines Laserstrahles mit der kürzesten Laufzeit

Auf diese Daten greifen interne GIS-Nutzer zu, sie sind jedoch auch die Basis aller Web-Dienste.

- BMN-M31/BMN-M34 bezogen auf Bessel-MGI.
Für die Datenweitergabe im Gauß-Krüger-Landeskoordinatensystem (GK) bzw. im österreichischen Bundesmeldenetz-Koordinatensystem (BMN) werden diese Daten herangezogen, da hier Verwendung eine Transformation aus dem UTM-System, die bei Rasterdaten unvermeidlich Artefakte erzeugt, vermieden werden kann.

4.6 Höhensysteme

Da zum Projektstart gerade die Bearbeitungen des neuen Geoids des Bundesamts für Eich- und Vermessungswesen in Fertigstellung begriffen waren und das Institut für Navigation und Satellitengeodäsie der Technischen Universität Graz an dieser Neuberechnung federführend mitgewirkt hatte (PAIL; KÜHTREIBER; WIESENHOFER; HOFMANN-WELLENHOF; OF; STEINBACH; HÖGGERL; IMREK; RUESS; ULLRICH), war es nur naheliegend, dass diese Expertisen im Rahmen einer wissenschaftlichen Begleitung dieses Projektteiles integriert worden ist.

Es wurde vorerst die vorhandene 7-Parameter-Transformation anhand der aktuell vorhandenen Messungen verifiziert, sodann das neue Geoid für seinen Einsatz im Projekt aufbereitet und zusätzlich ein Korrekturraster für den Übergang zwischen UELN → Gebrauchshöhen für den aktuellen Wissensstand errechnet.

In der Zukunft kann dieser letzte Schritt, je nach Verfügbarkeit neuer Identpunkte aus der Bundevermessung, individuell angepasst werden. Auf diese Weise können die einmal erfassten ALS-Daten mit relativ wenig Aufwand in das jeweils aktuelle Gebrauchshöhensystem transformiert werden.

Je nach Projektphase liegen unterschiedliche Höhenbezugssysteme vor.

- ellipsoidische Höhen (ETRS89):
Diese werden durch die GPS-Positionserfassung während der Aufnahme vorgegeben. Alle geometrischen Kontrollen werden in diesem System durchgeführt, da hier sichergestellt ist, dass etwaige Netzspannungen im Landeskoordinatensystem keinen Einfluss auf die Ergebnisse haben, sondern nur etwaige Messfehler der Aufnahme und der Geocodierung.
- orthometrische Höhen (Bessel-MGI) im System UELN¹³:
Die Verwendung der Passpunkte aus der Neuberechnung des Geoids für Österreich liefert den Bezug auf den Pegel Amsterdam. Auch dieser Höhenbezug ist noch frei von den Netzspannungen der österreichischen Gebrauchshöhen und somit längerfristig relevant.
- Orthometrische Höhen (Bessel-MGI) im System der Österreichischen Gebrauchshöhen¹⁴:
Über eine Modellrechnung wurde ein Korrekturraster zwischen UELN und Gebrauchshöhen ermittelt, der für jeweils eine 1x1 [km²]-Zelle einen Korrekturwert – auf [cm] gerundet – liefert. Dieser wird je gelieferter 1x1 [km²]-Raster-Kachel (1x1

¹³ **U**nited **E**uropean **L**evelling **N**etwork – für ganz Europa einheitliches Höhensystem, Bezugsellipsoid ETRS89, Pegel Amsterdam)

¹⁴ Österreich übliches Gebrauchshöhensystem (Bezugsellipsoid Bessel, Pegel Triest)

[m²]-Rasterzellengröße) an den UELN-Höhen angebracht, was bei den geforderten Genauigkeiten zu vernachlässigbaren Abweichungen führt.

Diese Vorgangsweise erlaubt somit, alle Befliegungen aus allen Projektjahren gleich zu behandeln und auf der Ebene UTM-33N/orthometrische Höhen (UELN) spannungsfrei vorzuhalten. Auch zukünftige Revisionen sind leicht über diese Vorgangsweise zu integrieren.

4.7 Metainformationen für das GIS

Für die Verwendung im GIS, aber auch schon für die Abwicklung des Projektes, das sich ja über mindestens drei Jahre (je nach Flugwetter) erstrecken wird, ist die Verfügbarkeit von Metainformationen unerlässlich. Nur so kann das Projekt vom Auftraggeber hinreichend auf seinen Umsetzungsstand kontrolliert werden. Darüber hinaus ist für spätere Verwendung der Daten der direkte Zugriff auf jeden Bereich gewährleistet. Für diese Metainformationen wurden vom Auftraggeber strenge Vorgaben – bis hin zur Attributierung – gemacht, da nur auf diesem Weg eine einfache Einarbeitung in die GIS-Datenbestände möglich ist.

Diese Metainformationen enthalten im Datensatz der Trajektorien zusätzlich noch Informationen, die einen Rückschluss auf die Erfassungsumstände und somit auf die Qualität der Daten erlauben.

5 Datenerfassung

5.1 Flugwetter

Wie bei allen Datenerfassungen, die von einem Flugzeug oder Hubschrauber durchgeführt werden, ist die große Unbekannte das Flugwetter. Gerade die Steiermark ist, wie vergangene Jahre gezeigt haben, ein nicht unproblematisches, weil heterogenes Gebiet.

Südlich der Mur/Mürz-Furche im Grazer Becken herrschen bessere Bedingungen, vor allem in Bezug auf Wolken. Im Rest des Landes, vor allem in den Gebirgstteilen, sind die Flugbedingungen jedoch sehr schwer zu planen und erfordern vom Auftragnehmer ein hohes Maß an Flexibilität.

5.2 Belaubung

Alle Flüge sind nach Möglichkeit vor Laubausbruch oder aber nach Laubfall durchzuführen. Das gilt für die Bereiche, in denen Laubwälder vorherrschen. Der zuvor genannte Südostbereich der Steiermark erlaubt hier oft schon ALS-Flüge im Spätwinter, allerdings hat sich diese vorteilhafte Situation seit Projektbeginn noch nicht ergeben. Durch die langen Winter 2008/2009 war der Aufnahmezeitraum bis zum Laubausbruch stark verkürzt.

In den höheren Lagen herrscht Nadelwald vor, sodass hier längere Flugfenster offen stehen. Allerdings kam es auch hier durch den frühen Wintereinbruch 2008 zu massiven Verzögerungen in der Datenerfassung.

5.3 Schnee, Feuchtigkeit

Die angesprochenen, langen Winter bringen für die Hochlagen vermehrt das Problem der Restschneefelder. Vor allem in zerklüfteten Talbereichen sind hier Schneefelder bis zum

Sommer die Regel. Generell haben starke Regenfälle negative Auswirkungen auf die Reflexionseigenschaften, es wurden in der bisherigen Projektphase jedoch auch Überflutungen erkennbar, die noch lange nach den Regenereignissen Bestand hatten.

6 Datenaufbereitung im GIS

Die gelieferten Datenbestände werden über die Datenbanken des GIS-Steiermark zugänglich gemacht. Dazu werden alle Streifen­daten auf dem Archivsystem filebasierend abgelegt und mit dem ArcGIS¹⁵-Extension LP360¹⁶ mit Pyramidenstrukturen versehen. Diese ermöglichen einen schnellen Datenzugriff und die Darstellung innerhalb der ArcMap-Umgebung.

6.1 ArcGIS-Extension LP360

Um die Integration der ALS-Daten möglichst optimal gestalten zu können, wird beim GIS-Steiermark das Produkt LP360 von QCoherent eingesetzt. Diese Software gestattet es dem GIS-Nutzer, innerhalb der ESRI-Umgebung volle Kontrolle über die ALS-Daten auszuüben. Das gilt für die Darstellung in Verbindung mit jeglichem anderen GIS-Inhalt genauso wie für die Spezialauswertungen der klassifizierten Punktwolke. Einige Highlights dieser Anwendungsmöglichkeiten sind auf dem Poster¹⁷ dargestellt.

Darüber hinaus eröffnet das Produkt auch die Transformation von Höhenrastern, da diese – als Punktwolke interpretiert – fehlerfrei in beliebige andere Koordinatensysteme umgerechnet werden können. Dabei ist durch die optimierte Datenspeicherung der Punktwolken im LAS-Format praktisch keine Obergrenze bei der Punktzahl gegeben.

6.2 Verfügbarkeit und Verbreitung der Daten

Alle GIS-Steiermark-Dateninhalte werden internen und externen Benutzern zugänglich gemacht. Interne Benutzer und Auftragnehmer des Landes Steiermark können für die Erledigung von Arbeiten alle Daten uneingeschränkt und kostenfrei verwenden.

Externe Benutzer sind den Vorgaben der Geodatenpolitik unterworfen, die über die Homepage des GIS-Steiermark¹⁸ ersichtlich sind.

Alle verfügbaren Datensätze können über das eGovernment-Formular digital abgewickelt werden. Dieses ist ebenfalls über die Homepage des GIS-Steiermark¹⁹ zugänglich. Eine erste Preisinformation ist in Tabelle 2 ersichtlich:

¹⁵ ArcGIS, AcrMAP: GIS-Produkte von ESRI

¹⁶ ArcGIS Extension von QCoherent Software LLC, Colorado Springs, CO www.qcoherent.com

¹⁷ 16:00-18:30 Poster-Session (TU-Hauptgebäude - Prechtlsaal)

¹⁸ Nähere Informationen unter www.gis.steiermark.at im Bereich Geo-Daten / Bestellung

¹⁹ Nähere Informationen unter www.gis.steiermark.at im Bereich Geo-Daten / Bestellung → [E-Government Bestellformular!](#)

7 Ausblick

Neben der performanten Datenhaltung im LAS-Format bietet die Extension LP360 auch eine mächtige Toolbox, die für die Definition spezieller Filter genutzt werden kann. So ist in der Extractor-Version der Software auch ein Modul zur Gebäudeextraktion enthalten. Alle Möglichkeiten dieser Extraktion werden derzeit an die Gegebenheiten in den ALS-Daten der Steiermark angepasst, wobei die ersten Extraktionsergebnisse vielversprechend sind. Es ist vorgesehen, dass diese Möglichkeiten zur flächendeckenden Ergänzung des Gebäudebestandes herangezogen werden, um hier in einer ersten Anwendung die Berechnungen der EU-Umgebungslärmrichtlinie zu unterstützen. Darüber hinaus sollen weitere Analysemöglichkeiten im Rahmen von Diplomarbeiten untersucht werden.

ALS-Daten bieten somit, vor allem im walddreichsten Bundesland Österreichs, eine unverzichtbare Datenquelle, da eine Höhenmodellextraktion aus photogrammetrischen Quellen den Boden unter der Vegetation nur schwer oder gar nicht ermitteln kann. In Zukunft sind allerdings vielversprechende Synergieeffekte aus der Kombination dieser beiden Methoden zu erwarten.

8 Literaturverzeichnis

MAUNE, D. F., EDITOR, 2007: Digital Elevation Model Technologies & Applications, 2nd Ed., ASPRS, ISBN 1-57083-082-7

PAIL, R., KÜHTREIBER N., WIESENHOFER B., HOFMANN-WELLENHOF B., OF G., STEINBACH, O., HÖGGERL, N., IMREK, E., RUESS, D., ULLRICH, C., 2008: The Austrian Geoid 2007, VGI - Österreichische Zeitschrift für Vermessung & Geoinformation n/a, **96**, S. 3-14.

SHAN, J. & TOTH, C. 2008: Topographic Laser Ranging & Scanning Principles & Process, CRC-Press, ISBN 9781420051421

Spectral method for separating the influence of heavy metal contamination in floodplain vegetation from other stress types

CHRISTIAN GÖTZE¹, ANDRÁS JUNG¹, INES MERBACH², RAINER WENNRICH³ & CORNELIA GLÄßER¹

*Zusammenfassung: Auenökosysteme werden durch anthropogene Aktivitäten beeinflusst. Ein bekanntes ökologisches Problem ist die erhöhte Schwermetallbelastung. Insbesondere der Transfer der Schadstoffe vom Boden über die Pflanzen in die menschliche Nahrungskette ist sehr relevant in der mittleren Elberegion. Ziel der Forschungsarbeit ist es, mit Hilfe von spektrometrischen Feld- und Labormessungen (ASD FieldSpecPro) den aktuellen Belastungszustand des Auenökosystems zu beurteilen. Dabei werden die ökotoxikologischen Effekte der Böden indirekt aus den spektralen Eigenschaften der Auenvegetation abgeleitet und Algorithmen zur Parametrisierung bzw. Trennung von Stressmerkmalen bei der Auenvegetation getestet. Ein standardisierter Gefäßversuch mit Auenvegetation (*Urtica dioica*, *Phalaris arundinacea* und *Alopecurus pratensis*) auf verschiedenen kontaminierten Aueböden dient als Basis der Messungen. Bei diesem Pflanzentyp wurden ebenso der relative Chlorophyllgehalt (SPAD) sowie der Blattschwermetallgehalt bestimmt und mit den Spektralanalysen verglichen.*

Die Ergebnisse zeigten die Continuum-Removal-Analyse im Bereich um 1725 nm (CR1725) als hochsignifikante Methoden zu den Schwermetallgehalten im Blatt. Mit Hilfe eines Proportionalitätsfaktors konnte die Trennung von Schwermetallstress von anderen Stressoren erfolgreich umgesetzt werden. Dieses Ergebnis muss durch weitere Analysen überprüft werden. Vor allem die Übertragung der Ergebnisse des standardisierten Gefäßversuchs auf Standorte an der Elbe könnten weiterführende Aussagen über die Wirksamkeit der Methoden geben.

1 Introduction

Floodplain ecosystems are affected by flood dynamics, nutrient supply in addition to anthropogenic activities. Especially heavy metal pollution poses a serious environmental challenge. Comprehensive studies of the material load of the water, the sediments and the soils in the catchment area of the Elbe already exist (FRIESE et al., 2000). As a result of extreme flooding the impact of pollution has become a topic of significant scientific and public interest. Pollution

¹ Christian Götze, András Jung, Cornelia Gläßer, Martin Luther University Halle-Wittenberg, Institute of Geosciences, Department of Remote Sensing and Cartography, Von-Seckendorff-Platz 4, D-06120 Halle (Saale), Germany, email: christian.goetze@geo.uni-halle.de

² Ines Merbach, Helmholtz-Centre of Environment Research Leipzig-Halle, Division Biodiversity and Terrestrial Ecosystems, Hallesche Straße 44 D-06246 Bad Lauchstädt, Germany

³ Rainer Wennrich, Helmholtz-Centre of Environment Research Leipzig-Halle, Division of Analytics and Ecotoxicology, Permoserstr. 15 D- 04318 Leipzig, Germany

transfer from the soil into the food chain, through the vegetation is still present in the central region of Elbe River, Germany (OVERESCH, 2000).

A number of studies have concluded that vegetation changes its spectral reflection by geochemical stress (HORLER et al., 1983; SINGHROY & KRUSE, 1991; SINGHROY et al., 1986; CURTISS & MAECHER, 1991; CLEVERS et al., 2004). Within the range of green reflection at 550 nm or the range of chlorophyll absorption near 670 nm physiological disturbances modify the spectral behavior. Similarly, the spectral increase between 670 nm and 750 nm as well as the position of the red edge showed up variations by geochemical stress. These shifts were minor both within longer and shorter wavelengths (HORLER et al., 1983; ROCK et al., 1988). The results of investigations into the effects in heavy metal-loaded plants differed depending on the region, plant type and method used (DUNAGAN et al., 2007; SCHELLEKENS et al., 2005). Few studies of spectral analysis of heavy metal-affected plants took place in floodplain ecosystems (CLEVERS et al., 2004; CLEVERS et al., 2003). However, no standard method for detection of heavy metal stress in plants was developed, because many environmental parameters interact and complicate the detection of the stress factors.

The goal of this study was to assess and separate the current heavy metal contamination of the floodplain ecosystem using spectrometric field and laboratory measurements. The toxicological effects of the soils were indirectly derived from the spectral characteristics of the floodplain vegetation (KUMAR et al., 2001). Methods for parameterization and/or separation from stress characteristics of the floodplain vegetation were developed. Using different vegetation indices and other spectral methods were used. The spectral curves of vegetation were normalized, in order to examine the potential of the methods for the detection of heavy metal stress. Also plant physiological properties by determination of the chlorophyll and heavy metal content could be parameterized.

2 Materials and methods

2.1 Pot experiment

A standardized pot experiment with floodplain vegetation in differently contaminated soils provided the basis for the measurements. Soil material of the three morphologic units of the floodplain was used and set in 10-litre pots. Stinging nettle (*Urtica dioica*), reed canary grass (*Phalaris arundinacea*) and meadow foxtail (*Alopecurus pratensis*) were selected as dominant plant types of the floodplains in this region. Standardized irrigation and nutrient supply were used to control for other natural factors that might influence the results, this allowed us to determine the correlations between the spectral behavior and the heavy metal contamination of the focal plants.

2.2 Biochemical analysis

For the sequential extraction of mobile, plant-available heavy metals ammonium nitrate was calculated (DIN standard 19730). The analyses determined the contents of cadmium, chromium, copper, manganese, nickel, lead, iron and zinc. The aqua regia dissolution determines the heavy metal total contamination of the soil (DIN standard 11466). The inductively coupled plasma mass spectrometry and an inductively coupled plasma optical emission spectrometry were used

for the analysis. The use of a pot experiment allowed the underlying stress factors to be excluded, so that only heavy metals could explain the variation between the plants.

The results shows the heavy metal contamination of soil type A (lower terrace, high contamination), of soil type B (plateau, low contamination) and of soil type C (depression, high contamination). Altogether in 2008 27 pots were set (3 species x 3 replicates x 3 soil types). Plant physiological parameters such as chlorophyll content (Minolta SPAD-502) were also measured.

2.3 Spectral measurements

Toxicological effects of the soil were indirectly investigated by the spectral responses of the plants. Field and laboratory spectrometric measurements were accomplished via an ASD FieldSpec Pro FR. Spectral sampling was taken from April to September 2008. Different development stages and influences in the spectral signal could be found. The investigation discovered that heavy metal stress could be detected and be parameterized during the season. Altogether approx. 400 spectra were measured, distributed in seven terms. At the beginning of each measurement an alignment with a reference standard (Spectralon) took place. All data measurements of the spectral reflection of an object were measured relative to the reference surface. The laboratory measurements served as a comparison for validation of the field surveys. The spectrometer laboratory of the Institute for Geosciences is a photographic darkroom with a pre-installed lighting source.

2.4 Spectral Methods

2.4.1 Selection of referred methods

The use of descriptive statistic for the selection of relevant subranges of the spectrum could determine five different local extrema. These local minima or maxima showed a high spectral variability between the plants in different contaminated soil types. The statistical parameters were the mean, standard deviation and the coefficient of variation (Cv). Subranges with high variability have been the highest potential to derived plant parameters like heavy metal contamination. In the investigation different forms of the standardization for spectral curves were used within the relevant subranges. The vegetation indices described different object characteristics such as vitality, biomass, content of chlorophyll, water, lignin, cellulose and protein (DUNAGAN et al., 2007; KUMAR et al., 2001; GÖTZE & GLÄBER, 2007; KANCHEVA et al., 2003). Variations in the spectral signal uncovered the content of the parameters and represented stress reaction. The Table 1 shows the used methods.

Tab. 1: Methods used in this study.

Method	Spectral Range	Parameter
Anthocyanin Content Index (ACI)	430-770	Anthocyanin
Anthocyanin reflectance index (ARI)	430-770	Anthocyanin
Carter Index 1 (Ctr1)	430-770	Chlorophyll
Carter Index 2 (Ctr2)	430-770	Chlorophyll
Cellulose Absorption Index (CAI)	2180-2300	Cellulose
Disease Water Stress Index 5 (DWSI-5)	1660-1950	Water
Edge-green first derivative normalized difference (EGFN)	430-770	Physiological state
Green-green first derivative normalized difference (GGFN)	430-770	Physiological state
Leaf Chlorophyll Index (LCI)	430-770	Chlorophyll
Lignin Cellulose Absorption Index (LCA)	2180-2300	Lignin, cellulose
Modified Chlorophyll Absorption in Reflectance Index (MCARI)	430-770	Chlorophyll
Modified Normalized difference index (mND705)	430-770	Chlorophyll
Moisture Stress Index (MSI)	1660-1950	Water
Normalized Difference Infrared Index (NDII)	1660-1950	Water
Normalized Difference Lignin Index (NDLI)	1660-1950	Lignin
Normalized Difference Moisture Index (NDMI)	1660-1950	Water
Normalized Difference Nitrogen Index (NDNI)	1660-1950	Nitrogen
Normalized Difference Pigment Index (NDPI)	430-770	Ratio carotenoids/ chlorophyll a
Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)	430-770	Vitality, biomass
Normalized Difference Water Index (NDWI)	1080-1200	Water
Normalized Phaeophytinization Index (NPQI)	430-770	Chlorophyll
Normalized Pigment Chlorophyll Index (NPCI)	430-770	Ratio total pigment/ chlorophyll
Photochemical Reflectance Index (PRI)	430-770	Light use efficiency
Pigment-specific Normalised Difference Index PSNDc	430-770	Carotenoids
Plant Senescence Reflectance Index (PSRI)	430-770	Ratio carotenoids/ chlorophyll
Ratio Vegetation Index (RVI)	430-770	Vitality, biomass
Red-edge Vegetation Stress Index (RVSI)	430-770	Red-Edge
Red-Edge-Position (1. Derivation)	430-770	Red-Edge-Position
Simple Ratio Pigment Index (SRPI)	430-770	Carotenoids
Structurally independent xanthophyll index (SIXI)	430-770	Xanthophyll
Structure Insensitive Pigment Index (SIPI)	430-770	Ratio carotenoids/ chlorophyll
Water Band Index (WBI)	910-1020	Water

2.4.2 Development of a new method

In part of vegetation analysis diversify methods exists. The aim of the paper was to develop a method they could detect heavy metal contamination directly or indirectly in the spectral signal. Within the five relevant subranges sensitive wavelengths could be identified. The equations 1-3 represent the developed methods of 2 Simple Ratios and 1 method of Continuum Removal.

$$\text{GRatio 1} = \mathbf{R1080/R750}$$

Eq. 1: Ratio of reflection value between 1080 and 750 nm (GRatio 1).

$$\text{GRatio 2} = \mathbf{R1130/R1170}$$

Eq. 2: Ratio of reflection value between 1130 and 1170 nm (GRatio 2).

$$\text{CR1725} = \mathbf{SCR1725=S/C}$$

Eq. 3: Band depth within the continuum removal range between 1690 und 1740 nm (CR1725).

SCR = continuum-removed spectrum, S = Original spectrum, C = Continuum curve

Important characteristics of a signature curve are their position, depth, expansion (FWHM), form, local minima and maxima as well as the main turning points. By standardization procedures like the continuum transformation the measured values were converted into a uniform scale level, so that a comparison of the spectral curves was possible (ERASMI, 2002). The division of the continuum ranges refers to the spectrum sections, in which local minima are present and conclusions on plant components are possible. The section of the continuum curve for 970 nm and 1725 nm was examined.

The quality assessment was determined within the correlation analysis. Afterwards the methods were compared with the plant parameters such as chlorophyll content and heavy metal content. The correlation coefficient determined the quality of the methods for heavy metal stress detection.

3 Results and discussion

3.1 Chlorophyll analysis

Chlorophyll content shows a comparable trend within the vegetation period with decrease of mean of 47.9 %. The deviation between the soil types gives not an exact result. The SPAD values of the high contaminated soil types A and C were approx. 5 % higher within the vegetation period than the lower contaminated soil type B. The variations could be caused by the nutrient content. Clevers et al. (2004) referred that natural grasslands with a better supply of nutrients also shows a higher heavy metal contamination.

3.2 Heavy metal analysis

The heavy metal content of plant leaves pointed out lower value as the soil. The leaves have often the lowest contamination within the plant. In all plants concentrations of As, Pb and Cd exceeded the precautionary values of the German Animal Feed Ordinance implying harmful impact of the animal and human being. This should result in practical management restrictions at the sites. The different contamination of soil types were also presented in the plants. The highest impact had the type C previous to A and B.

3.3 Correlation

The usability of the methods was tested by the correlation coefficient between the chlorophyll and the heavy metal content (Table 2). The methods were compared with the analytic investigations. These correlations offer the possibility of examining the methods on their quality. High correlations could be determined between the physiological condition and the spectral characteristics. The pigment indices (mND705, GGFN, Ctr1) showed high correlations to relative chlorophyll content during the period.

The heavy metal analyses showed dependence to many high-significantly tested methods like NDVI, PSRI and other pigment indices. Also the indices to determine the leaf water content shows significant correlations in a lower level. The new developed method CR1725 could rank into the top seven of correlation coefficient.

Tab. 2: Correlation coefficient between the method value and the heavy metal content of plants (above) and relative chlorophyll content (below).

Method	Correlation coefficient	Method	Correlation coefficient	Method	Correlation coefficient	Method	Correlation coefficient	Method	Correlation coefficient
NDVI	0,670	NPCI	0,640	NDMI	0,616	PRI	0,568	GRatio 2	0,487
PSRI	0,658	SRPI	0,632	mND705	0,609	SIXI	0,557	NDLI	0,361
ACI	0,656	GGFN	0,628	LCI	0,605	Ctr1	0,551	NPQI	0,233
NDPI	0,654	DSWI5	0,627	NDWI	0,594	GRatio 1	0,538	EGFN	0,143
SIP1	0,651	MSI	0,624	PSNDc	0,588	ARI	0,538	LCA	0,128
Ctr2	0,648	RVI	0,619	RVSI	0,576	REP (Deriv)	0,529	CAI	0,114
CR1725	0,644	NDII	0,616	WBI	0,571	NDNI	0,514	MCARI	0,010

Method	Correlation coefficient	Method	Correlation coefficient	Method	Correlation coefficient	Method	Correlation coefficient	Method	Correlation coefficient
mND705	0,858	REP (Deriv)	0,822	PRI	0,739	MSI	0,585	NDNI	0,480
GGFN	0,854	NDPI	0,822	ACI	0,698	PSRI	0,582	MCARI	0,469
Ctr1	0,848	Ctr2	0,814	SIP1	0,685	DSWI5	0,557	EGFN	0,460
PSNDc	0,848	ARI	0,813	NDWI	0,634	CAI	0,524	GRatio 1	0,320
SRPI	0,840	SIXI	0,793	WBI	0,626	RVSI	0,500	LCA	0,271
NPCI	0,826	RVI	0,753	NDII	0,597	NPQI	0,489	NDLI	0,228
LCI	0,823	NDVI	0,741	NDMI	0,589	CR1725	0,488	GRatio 2	0,194

Figure 1 shows the relationship between the band depth at CR 1725 nm and the heavy metal content (As, Cr, Cd, Pb). The band depth of the CR1725 is low with low content of heavy metal and rises potentially with the increase of the analysis values.

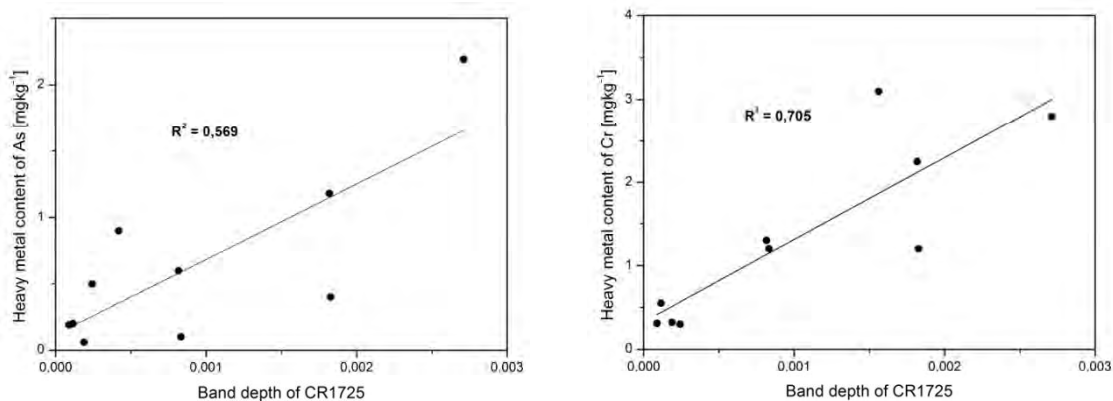


Fig. 1: Coefficient of determination between band depth of the developed continuum removal method CR1725 and the heavy metal content (As and Cr).

3.4 Stress separation

By removing chlorophyll content the stress factor heavy metal was the reason for the spectral changes in the pot experiment. In this way the proportionality factor of the correlations coefficient of index values and the biochemical analysis determined (Equation 4).

$$PHM = |XRH/XRC|$$

Eq. 4: Proportionality factor for heavy metal stress separation

XRH = Correlation coefficient between method values and heavy metal content

XRC = Correlation coefficient between method values and relative chlorophyll content

The proportionality factor of heavy metal (PHM) shows the highest values at the new developed methods (Table 5). It has to be considered that not every method had a high significant correlation to the heavy metal content. If only the methods above 0.6 correlation between heavy metal content and method value be used, then the CR1725 (PHM = 2.13) and the PSRI (PHM = 1.73) were the best way to detect heavy metal contamination of plants in floodplains.

Tab. 3: Proportionality factor of heavy metal

Method	P _{HM}	Method	P _{HM}	Method	P _{HM}	Method	P _{HM}	Method	P _{HM}
GRatio 1	2,26	MSI	1,17	NDWI	1,02	RVI	0,91	Ctrl1	0,80
CR1725	2,13	NDMI	1,13	NDLI	0,99	GGFN	0,88	SIXI	0,77
PSRI	1,73	NDII	1,12	NPCI	0,99	ARI	0,86	NPQI	0,71
GRatio 2	1,59	NDVI	1,10	PRI	0,98	PSNDc	0,84	REP (Deriv)	0,69
RVSI	1,38	SIPI	1,09	WBI	0,98	LCI	0,84	CAI	0,31
DSWI5	1,27	NDNI	1,06	Ctrl2	0,97	mND705	0,83	EGFN	0,29
ACI	1,24	NDPI	1,03	SRPI	0,94	LCA	0,80	MCARI	0,03

4 Conclusions

The results have shown the usability of different sensitivity methods. The standardized experimental set up showed that heavy metal stress in plants can be separated from water and nutrient stress. The CR1725 and PSRI proved to be sensitive for heavy metal stress. These methods had a lower correlation to stress-related physiological parameter chlorophyll.

The band depth of continuum removal in the part of spectrum near 1725 nm was determined as a potential indicator for heavy metal stress detection. The reason for the correlation could be the lignin or protein production in the plant metabolism influenced by stress (CURRAN et al., 2001). Further investigations are needed to explain plant physiological and spectral interactions.

5 References

- Clevers, J.P.G.W. & Kooistra, L. (2003). Assessment of heavy metal contamination in river floodplains by using the red-edge index. Proceeding of the 3rd EARSeL Workshop on Imaging Spectroscopy. Hersching.
- Clevers, J.P.G.W., Kooistra, L. & Salas, E.A.L. (2004). Study of heavy metal contamination in river floodplains using the red-edge position in spectroscopic data. *Int. J. Remote Sens.* 25 (19), 3883-3895.
- Curran, P.J., Dungan, J.L. & Peterson, D.L. (2001). Estimating the foliar biochemical concentration of leaves with reflectance spectrometry: testing the Kokaly and Clark methodologies. *Remote Sens. Environ.* 76, 349-359.

- Curtiss, B. & Maecher, A.G. (1991). Changes in Forest canopy reflectance associated with chronic exposure to high concentrations of soil trace metals. Proceedings of eighth Thematic Conference on Geologic Remote Sensing. Denver.
- Dunagan, S.C., Gilmore, M.S. & Varekamp, J.C. (2007). Effects of mercury on visible/near-infrared reflectance spectra of mustard spinach plants (*Brassica rapa* P.). *Environ. Pollut.* 148 (1), 301-311.
- Erasmí, S. (2002). Analyse spektroradiometrischer in situ Messungen als Datenquelle für die teilflächenspezifische Zustandsbeschreibung von Winterweizenbeständen. PhD thesis. Göttingen.
- Friese, K., Witter, B., Miehlich, G. & Rode, M., 2000: Stoffhaushalt von Auenökosystemen - Böden und Hydrologie, Schadstoffe, Bewertungen. Springer-Verlag. Berlin.
- Götze, C. & Gläßer, C. (2007) Detection of vegetation stress characteristics in the lignite open pit mining landscape Goitsche using Hyperspectral remote sensing data. Proceedings 5th EARSeL Workshop on Imaging Spectroscopy. Bruges.
- Horler, D.N.H., Dockray, M. & Barber, J., 1983: The red edge of plant leaf reflectance. *Int. J. Remote Sens.* 4 (2), 273-288.
- Kancheva, R., Borisova, D. & Georgiev, G. (2003). Informational potential of vegetation spectral reflectance in anthropogenic impact studies. *Annual of University of Mining and Geology. Sofia.* 46 (1), 355-359.
- Kumar, L., Schmidt, K.S., Dury, S. & Skidmore, A.K. (2001). Imaging spectrometry and vegetation science. In: Van der Meer, F.D. & De Jong, S.M. (Eds.). *Imaging spectrometry: Basic principles and prospective applications.* Springer.
- Overesch, M., 2002: Schwermetalle in Auenökosystemen. Bindungsformen in Böden und Gehalte in Pflanzen. Diploma thesis. Münster.
- Rock, B.N., Hoshizaki, T. & Miller, J.R. (1988). Comparison of in situ and airborne spectral measurements of the blue shift associated with forest decline. *Remote Sens. Environ.* 24, 109-127.
- Schellekens, J.H., Gilbes, F., Rivera, G.D., Ysa, Y.C., Chardón, S. & Fong, Y. (2005). Reflectance spectra of tropical vegetation as a response to metal enrichment in the substrate of West-central Puerto Rico. *Caribb. J. Earth Sci.* 39, 9-12.
- Singhroy, V. & Kruse, F., 1991: Detection of metal stress in Boreal Forest Species using the 0.67 μm chlorophyll absorption band. Proceedings of the eight Thematic conference on geologic remote sensing, exploration, engineering and environment. Denver, 361-372.
- Singhroy, V., Stanton-Gray, R. & Springer, J., 1986. Spectral geobotanical investigation of mineralized till sites. Proceedings of the Fifth Thematic Conference, Remote Sensing for Exploration Geology. Reno.

Flugzeuggetragene hyperspektrale Fernerkundung am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)

zur DGPF - Jahrestagung

SEBASTIAN WEIDE¹, PETER GEGE², CHRISTIAN SCHWARZ², MARTIN BACHMANN¹, STEFANIE HOLZWARTH¹, MARTIN HABERMEYER¹, ANDREAS MÜLLER¹, PETER HASCHBERGER², PAUL SCHÖTZ², KARIM LENHARD², ERICH BOGNER², THOMAS SCHWARZMAIER²

Zusammenfassung: Das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) betreibt und kalibriert seit 1995 flugzeuggetragene hyperspektrale Sensoren und entwickelt Software für die Vorprozessierung und die Qualitätsbewertung der Daten. Seit 2007 ist der Service OpAiRS (Optical Airborne Remote Sensing and Calibration Facility) ISO zertifiziert (ISO 9001:2008) und organisiert jährlich in ganz Europa Kampagnen mit eigenen und externen abbildenden Spektrometern. Die halbautomatische Prozessierkette führt sowohl Systemkorrekturen, Validierung und Kalibrierung, als auch Orthoreferenzierung, atmosphärische Korrekturen und Qualitätskontrolle der Bilddatensätze durch. Für die Kalibrierung der Sensoren steht ein europaweit einzigartiges optisches Labor für die radiometrische, geometrische und spektrale Charakterisierung von schweren Instrumenten zur Verfügung. Diese „Calibration Homebase“ (CHB) wurde teilweise durch die ESA finanziert und wird seit 2007 auch für externe Sensoren angeboten.

Der Service OpAiRS beinhaltet die volle Organisation der Kampagne, den Betrieb der Sensoren in DLR-eigenen Flugzeugen und die automatische Vorprozessierung der Datensätze. Damit übernimmt das DLR eine führende Rolle in Europa im Bereich der hyperspektralen Fernerkundung und liefert eine zuverlässige Datengrundlage für unterschiedliche Anwendungen.

1 Einleitung

Das Deutsche Fernerkundungsdatenzentrum (DFD) und das Institut für Methodik der Fernerkundung (IMF) zentralisierten und organisierten mit OpAiRS seit langem bestehende DLR Aktivitäten bezogen auf flugzeuggetragene, optische Systeme und Feldspektrometrie.

OpAiRS wurde im November 2007 ISO zertifiziert (ISO 9001:2000) und koordiniert die Datenbeschaffung, -prozessierung und Kalibrierung der Sensoren. Der Service ist für die Betreuung aller internen und externen Kunden und für die Bereitstellung geeigneter Flugzeuge und Instrumente verantwortlich. Des Weiteren verfügt OpAiRS über die Expertise verschiedenster Sensoren in Fluggeräten fachgerecht zu installieren und zu betreiben.

1) Deutsches Fernerkundungsdatenzentrum, Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR)
Münchner Straße 20, 82234 Weßling, Germany

2) Institut für Methodik der Fernerkundung, Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR)
Münchner Straße 20, 82234 Weßling, Germany

Das Management koordiniert die Ressourcen, die für die Kampagne nötig sind, übernimmt das Kosten- und Zeitmanagement und das Marketing. Ferner wird sehr viel Wert auf die Qualität der Endprodukte gelegt. Die Betriebsprozesse sind für die technischen Checks und die Durchführung der Flugkampagne zuständig. Die ISO-Zertifizierung stellt ein standardisiertes Protokoll sicher - vom Auftrag des Users bis hin zur Auslieferung der Daten. (Abb. 1).

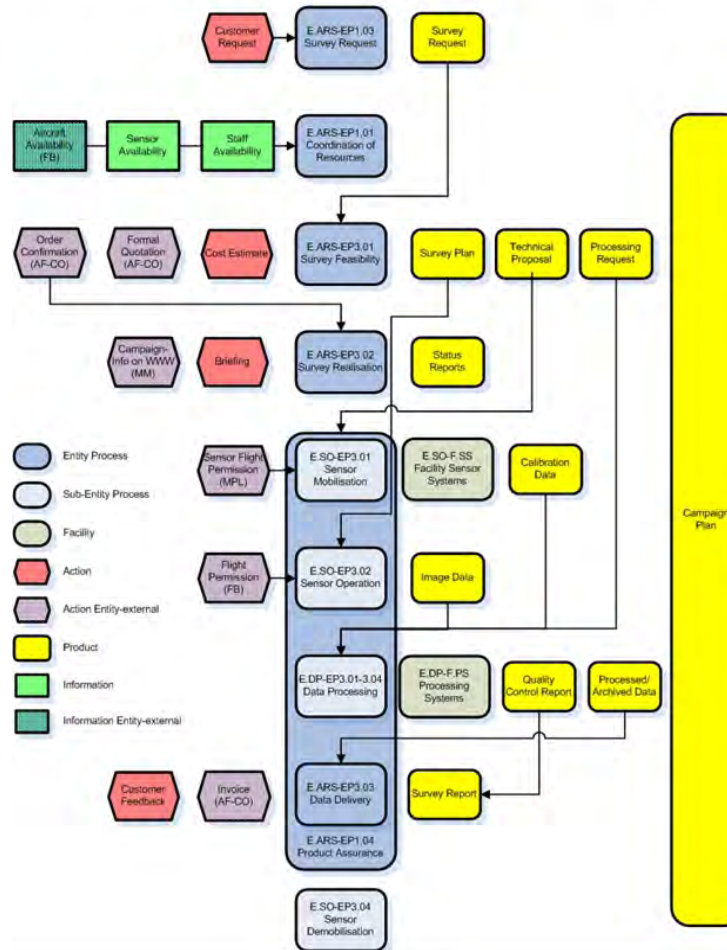


Abb. 1: Von der Kundenanfrage (Customer Request) zur Auslieferung (Data Delivery)

Im Jahr 2009 fand eine der umfangreichsten HyMap-Kampagnen in Europa statt. Von Mitte Juli bis Anfang September wurden 31 Testgebiete in 5 europäischen Ländern befliegen. Mit 85 Datensätzen und einer Durchführungsquote von über 95 % war es auch eine der erfolgreichsten Kampagnen der letzten Jahre.

Auch im Sommer 2010 wird wieder eine hyperspektrale Flugmission stattfinden. OpAiRS betreibt den HyMap-Sensor vom Flugplatz Oberpfaffenhofen bei München aus – strategisch

günstig in der Mitte Europas gelegen. Informationen zur Kampagne, einschließlich der Testgebiete und Informationen rund um den Service OpAiRS können auf der Website www.opairs.aero abgerufen werden.

2 Flugzeuggetragene Sensoren

2.1 ROSIS

Das kompakte abbildende Spektrometer ROSIS (Reflective Optics System Imaging Spectrometer ROSIS, siehe Abb. 2) wurde für die Detektion spektraler Feinstrukturen in Küsten- und Binnengewässern entwickelt, insbesondere für die Klassifikation des Phytoplanktons und die Analyse der Chlorophyll-Fluoreszenz bei 685 nm (DOERFFER ET AL.). Dieses Ziel bestimmte die Sensorspezifikationen bezüglich Spektralbereich, spektrale Auflösung, Anzahl der Kanäle und radiometrische Auflösung (KUNKEL ET AL.). Außerdem wurde ein Kippspiegel eingebaut, um das typische Problem der Gewässerfernerkundung zu reduzieren, die direkte Reflexion von Sonnenstrahlen an der Wasseroberfläche. ROSIS kann jedoch nicht nur für Gewässer eingesetzt werden, sondern ebenfalls für die Spektroskopie von Landoberflächen und atmosphärischen Komponenten (THIEMANN ET AL.). ROSIS ist ein sog. Pushbroom-Sensor und deckt den Spektralbereich von 430 bis 860 nm ab. Die Spezifikationen sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Tabelle 1: Spezifikationen von ROSIS-03

Prinzip	Pushbroom
Radiometrische Quantisierung	14 bit
Gesichtsfeld (FOV)	16°
Blickwinkel eines Pixels (IFOV)	0.56 mrad
Pixelgröße bei minimaler Flughöhe (1.9 km)	1.0 m
Änderung des Blickwinkels in Flugrichtung	± 20°
Spektralbereich	430 - 860 nm
Spektrales Abtastintervall	4 nm
Anzahl Spektralkanäle gesamt / nutzbar	115 / 100
Anzahl Pixel pro Scanzeile	512

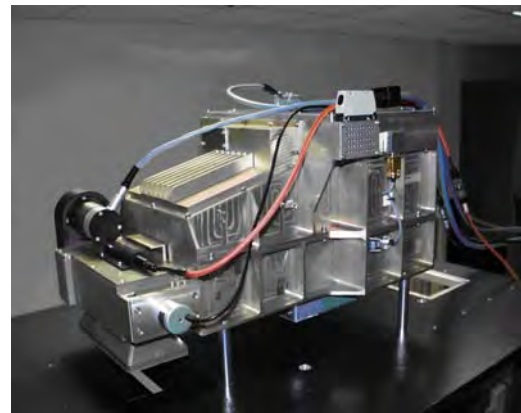


Abb. 2 Der Rosis-Sensor

2.2 HyMap

HyMap (Hyperspectral Mapper, siehe Abb. 3) ist ein flugzeuggetragener Hyperspektralsensor, der von der australischen Firma Integrated Spectronics Ltd. entwickelt wurde (COCKS ET AL.). Er wird von der australischen Firma HyVista weltweit eingesetzt und wird bei den Nutzern seit vielen Jahren für seine hohe Zuverlässigkeit und gute Datenqualität geschätzt. In Europa führt

das DLR seit 12 Jahren die Befliegungen in enger Zusammenarbeit mit HyVista durch. Das DLR hat hierzu viele nationale und internationale Kampagnen organisiert und dabei mehr als 700 Flugstreifen aufgezeichnet und prozessiert. Tabelle 2 gibt einen Überblick über die Sensorspezifikationen.

Tabelle 2: Spezifikationen von HyMap

Prinzip	Whiskbroom
Radiometrische Quantisierung	12 – 14 bit
Gesichtsfeld	61.3°
Blickwinkel eines Pixels (IFOV) in Flugrichtung	2.5 mrad
quer zur Flugrichtung	2.0 mrad
Pixelgröße bei minimaler Flughöhe (2.0 km)	5.0 m
Spektralbereich	400-2500 nm
Spektrales Abtastintervall	~16 nm
Anzahl Spektralkanäle	128
Anzahl Pixel pro Scanzeile	512



Abb. 3 Der HyMap-Sensor

2.2.1 Feldinstrumente

OpAiRS betreibt eine Reihe von Feldspektrometern und Radiometern für die Validierung und sog. "vicarious" Kalibrierung von Fernerkundungsdaten sowie für die Durchführung von Spektralmessungen für diverse Anwendungen. Tabelle 3 gibt einen Überblick.

Tabelle 3: Feld- Spectrometer und Radiometer

Instrument	Spektralbereich oder Kanäle	Abtast- intervall
ASD FieldSpec® Pro	350–2500 nm	1.4–2.0 nm
SVC HR-1024	350–2500 nm	1.5–3.8 nm
D&P Model 102	2–16 μm	3 cm^{-1}
Trios RAMSES ARC-VIS	350–950 nm	3.3 nm
Solar Light Microtops II Ozonometer	305, 312, 320, 936, 1020 nm	2.4 und 10 nm
Solar Light Microtops II Sun photometer	380, 440, 500, 678, 870 nm	10 nm

Für die Messung von Reflexionsspektren im Wellenlängenbereich 350–2500 stehen zwei ASD-Spektrometer (ASD) und ein SVC-Instrument (SVC) zur Verfügung, für das thermische Infrarot ein Fourierspektrometer der Firma D&P (KORB ET AL.). Letzteres soll vor allem für die Messung von Emissionsspektren bei Feldkampagnen eingesetzt werden. Das Trios-System besteht aus 3 Sensoren, welche gleichzeitig aufwärts- und abwärtsgerichtete Bestrahlungsstärke sowie aufwärtsgerichtete Strahldichte messen (TRIOS). Sie sind wasserdicht und werden meist als Unterwassergeräte für spektrale Messungen in Gewässern eingesetzt. Die beiden Microtops II Radiometer (SOLAR LIGHT) dienen zur Bestimmung atmosphärischer Parameter, die für die Atmosphärenkorrektur von Flugzeug- und Satellitendaten relevant sind. Insbesondere sind dies der Säulengehalt von Ozon und Wasserdampf sowie die optische Dicke von Aerosol.

Die Felddausrüstung wird komplettiert durch eine transportable Wetterstation (KRONEIS). Diese besitzt Sensoren für Regen, Wind (Geschwindigkeit und Richtung), Druck, Luftfeuchte und Temperatur. Außerdem enthält sie ein Pyranometer, ein Pyrgeometer und ein Nettoradiometer zur breitbandigen Bestimmung der solaren Bestrahlungsstärke und Nettostrahldichte. Die Stromversorgung erfolgt über Sonnenkollektoren.

3 Die Calibration Homebase (CHB)

Die Calibration Home Base (CHB) ist ein optisches Labor zur Charakterisierung und Kalibrierung von flugzeuggetragenen abbildenden Spektrometern und tragbaren Spektroradiometern. Es wurde zum Teil durch die ESA (European Space Agency) finanziert und ist seit 2007 in Betrieb.



Abb. 4 Die Calibration Homebase

Komponenten der CHB:

- 1 = Schwingungsgedämpfte optische Bank
- 2 = Kippspiegel
- 3 = große Ulbrichtkugel
- 4 = kleine Ulbrichtkugel
- 5 = Netzteile für 18 Lampen von Nr. 3
- 6 = Steuerungselektronik für Nr. 2
- 7 = Monochromator
- 8 = Adapter
- 9 = Sensor (ROSI)

Die drei grundlegenden Charakterisierungen, die in der CHB durchgeführt werden können, sind die radiometrische, geometrische und spektrale Charakterisierung, sowohl für Instrumente von mehreren hundert Kilogramm als auch von tragbaren Geräten. Dabei kann der spektrale Bereich von 380 nm bis zu 14 μm abgedeckt werden. Das Labor ist durch ein geeignetes Fundament schwingungsgedämpft, klimatisiert und kann leicht über das DLR Flugfeld in Oberpfaffenhofen (Bayern, Deutschland) erreicht werden. Weitere Details zum Labor sind veröffentlicht (GEGE ET AL. 2009).

Derzeit basiert die radiometrische Kalibrierung auf einer 0,5 m großen Ulbrichtkugel, die durch die Physikalisch - Technische Bundesanstalt (PTB) kalibriert wurde. Um eine bessere Langzeitstabilität zu erreichen, ist geplant ein Transferradiometer, bestehend aus 5 Filtradiometern, einzusetzen (GEGE ET AL. 2010).

Die spektrale Kalibrierung nutzt zurzeit eine QTH Lampe mit anschließendem Monochromator. In weiterer Planung ist, diesen Aufbau durch eine durchstimmbare Laserquelle zu ergänzen, um eine schnellere Charakterisierung und Kalibrierung mehrerer Pixel gleichzeitig zu erreichen (SCHWARZ ET AL.).

Die CHB ist offen für Nutzer aus aller Welt. Darüber hinaus wird derzeit die Nutzung der CHB für satellitenbasierte abbildende Spektrometer erwogen.

4 Automatische Bildprozessierung und Archivierung

Die quantitative Analyse der Daten von abbildenden Spektrometern erfordert eine aufwendige Vorprozessierung. Am DLR wurden Softwarepakete entwickelt, die die Anforderungen an eine operationelle und halbautomatische Bearbeitung der Bilddatensätze von HyMap und ROSIS erfüllen. Für den zukünftigen ARES Sensor wird eine vollautomatische Prozessierungskette zur Verfügung stehen. Details hierzu befinden sich in (HABERMEYER ET AL.) und (BACHMANN ET AL. 2007).

Der erste Teil des generischen Prozessiersystems beinhaltet die Umwandlung der Rohdaten in ein standardisiertes Datenformat (DN), welche als L0-Daten archiviert werden. Im Anschluss werden die Daten zu sog. „at-sensor radiance“-Daten (L1), basierend auf einer Laborkalibrierung weiterverarbeitet. Die Validierung und – soweit benötigt – Feinjustierung der Sensorkalibrierung erfolgt mittels einer Kalibrierung durch Testflüge und zeitgleiche Referenzmessungen am Boden.

Um L2-Produkte zu erstellen wird eine parametrische Geokorrektur und/oder eine Korrektur von atmosphärischen Störungen durchgeführt. Die Softwarepakete welche hierfür zur Verfügung stehen sind ORTHO (MÜLLER ET AL.) für die Orthorektifizierung und ATCOR (RICHTER ET AL.) (SCHLÄPFER ET AL.) für die atmosphärische und topografische Korrektur.

Beide Programme wurden am DLR entwickelt um große Datenmenge vollautomatisch zu verarbeiten. Das für die Prozessierung benötigte Digitale Geländemodell wird automatisch von der DEM-Datenbank W42 des DLR bezogen (ROTH ET AL.).

Bei der L2-Prozessierung können kundenspezifische Anforderungen, wie z. B. die Interpolationsmethode, die Reihenfolge der Prozessierschritte, atmosphärische Parameter usw. berücksichtigt werden.

Um zuverlässige Daten zu erhalten, werden während dieser Schritte Maßnahmen zur Qualitätskontrolle durchgeführt (BACHMANN ET AL. 2007). Daher werden Qualitätsindikatoren bezüglich der Sensorperformance während der Befliegung, aber auch sensorspezifische Indikatoren die zum längerfristigen Sensormonitoring dienen, berechnet und archiviert. Die L2-Daten werden ebenfalls mit einem umfangreichen Report zu Qualität, der Details zur Prozessierung und Charakterisierung der Datensätze enthält, ausgeliefert. Derzeit wird die Qualitätskontrolle erweitert (BACHMANN ET AL. 2010).

Die gesamte Prozessierkette ist im 'Data Information and Management System' (DIMS) des DLR eingebettet (MIKUSCH ET AL.). Diese automatische Prozessier- und Archivierungsumgebung wurde für Satellitendaten entwickelt und steht auch für die zuverlässig Weiterverarbeitung und sichere Bereitstellung von Flugzeugdaten zur Verfügung.

5 Literaturverzeichnis

ASD, 2010: <http://www.asdi.com/products/instrumentation/portable>

BACHMANN, M., HABERMEYER, M., HOLZWARTH, S., RICHTER, R. & MÜLLER, A., 2007: Including Quality Measures in an Automated Processing Chain for Airborne Hyperspectral Data. In Proceedings of the 5th EARSeL Workshop on Imaging Spectroscopy, Bruges.

BACHMANN, M., HABERMEYER, M., MÜLLER, A., MÜLLER, R., SCHNEIDER, M. & STORCH, T., 2010: Operational data quality control for hyperspectral data. In Proceedings of ESA Hyperspectral workshop, Frascati, Italy.

DOERFFER, R., GRABL, H., KUNKEL, B. & VAN DER PIEPEN, H., 1989: ROSIS - an advanced imaging spectrometer for the monitoring of water colour and chlorophyll fluorescence. In Proceedings of Intern. Congress on Optical Sciences & Engineering. Conference 1129: Advanced Optical Instrumentation for Remote Sensing of the Earth's Surface from Space. Paris, April 24-28, 1989, S. 117-121.

GEGE, P., FRIES, J., HASCHBERGER, P., SCHÖTZ, P., SCHWARZER, H., STROBL, P., SUHR, B., ULBRICH, G. & VREELING, J., 2009: Calibration facility for airborne imaging spectrometers. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 64, S. 387-397.

GEGE, P., FRIES, J., HASCHBERGER, P., LENHARD, K., SCHÖTZ, P., SCHWARZ, CH. J. & SCHWARZMAIER 2010: Concept for improved radiometric calibration of imaging spectrometers at the CHB facility. In Proceedings of ESA Hyperspectral Workshop Frascati, Italy.

- HABERMEYER, M., MÜLLER, A., HOLZWARTH, S., RICHTER, R., MÜLLER, R., BACHMANN, M., SEITZ, K.-H., SEIFERT, P. & STROBL, P., 2005: Implementation of the Automatic Processing Chain for ARES. In Proceedings of the 4th EARSeL Workshop on Imaging Spectroscopy. Warsaw.
- KORB, A. R., DYBWAD, P., WADSWORTH, W. & SALIS-BURY, J. W., 1996: Portable Fourier transform infrared spectroradiometer for field measurements of radiance and emissivity. Applied Optics 35(10), S. 1679-1692.
- KRONEIS, 2010: <http://www.kroneis.at/>
- KUNKEL, B., BLECHINGER, F., VIEHMANN, D., VAN DER PIEPEN, H. & DOERFFER, R., 1991: ROSIS imaging spectrometer and its potential for ocean parameter measurements (airborne and spaceborn). International Journal of Remote Sensing 12, S. 753-761.
- MIKUSCH, E., DIEDRICH, E., GÖHMANN, M., KIEMLE, S., RECK, C., REIßIG, R., SCHMIDT, K., WILDEGGER, W. & WOLFMÜLLER, M., 2000: Data and information management system for the production, archiving and distribution of Earth observation products. Data Systems in Aerospace 2000, ESA Publications Division, SP-457, Noordwijk, The Netherlands.
- MÜLLER, R., HOLZWARTH, S., HABERMEYER, M. & MÜLLER, A., 2005: Ortho Image Production within an Automatic Processing Chain for Hyperspectral Airborne Scanner ARES. In Proceedings of EARSeL Workshop 3D-Remote Sensing, Porto.
- RICHTER, R. & SCHLÄPFER, D., 2002: Geo- Atmospheric Processing of Airborne Imaging Spectrometry Data, Part 2: Atmospheric / Topographic Correction. International Journal of Remote Sensing 23(13), S. 2631-2649.
- ROTH, A., KNÖPFLE, W., STRUNZ, G., LEHNER, M. & REINARTZ, P., 2002: Towards a Global Elevation Product: Combination of Multi- Source Digital Elevation Models. In Proceedings of the Joint International Symposium on Geospatial Theory, Processing and Applications, Ottawa.
- SCHLÄPFER, D. & RICHTER, R., 2002: Geo- atmospheric Processing of Airborne Imaging Spectrometry Data Part 1: Parametric Orthorectification. International Journal of Remote Sensing, 23(13), S. 2609-2630.
- SCHWARZ, CH. J., LENHARD, K., & GEGER, P., 2010: Concept for effective spectral calibration of imaging spectrometer using a tunable laser in the range of 405 – 2550 nm. In Proceedings of ESA Hyperspectral Workshop 2010, Frascati, Italy.
- SOLAR LIGHT, 2010: <http://www.solarlight.com/products/mtops.html>
- SVC, 2010: <http://www.spectravista.com/HR1024.html>
- THIEMANN, S., STROBL, P., GEGER, P., STAHL, N., MOOSHUBER, W. & VAN DER PIEPEN, H., 2001:

Das abbildende Spektrometer ROSIS. In: Seyfert, E. (Hrsg.): Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung, Vorträge 21. Wiss.- Techn. Jahrestagung der DGPF und 18. DFD-Nutzerseminar des DLR, Band 10, 4.-7. September 2001, Konstanz.

TRIOS, 2010: www.trios.de

WILSON, I. J. & COCKS, T. D., 2003: Development of the Airborne Reflective Emissive Spectrometer (ARES) – A Progress Report. In Proceedings of 3rd EARSeL Workshop on Imaging Spectroscopy, 13-16 May, Herrsching, Germany, S. 50-55.

Brandgutdifferenzierung in einem Wildland-Urban Interface mit Hilfe von Laser Scanning und Bildspektrometrie

CHRISTOPH FRISCHKNECHT¹, MATHIAS KNEUBÜHLER¹ & FELIX MORSDORF¹

Zusammenfassung: Im Bereich von Waldbränden stellt die Kartierung von Brandgut zur Minderung von Risiken eine große Herausforderung dar. Besonders schwierig gestaltet sich das Unterfangen, wenn anthropogene und natürliche Strukturen aufeinander treffen und ein sogenanntes Wildland-Urban Interface bilden. Ein support vector machines-Algorithmus wird trainiert, um eine Landbedeckungskartierung aus einem kombinierten LiDAR- und Bildspektrometerdatensatz vorzunehmen. Es werden 18 Klassen unterschieden, wobei die Vegetation in sechs Brandguttypen eingeteilt wird. Sechs Prozessierungsketten mit unterschiedlichen Hierarchien und Fusionszeitpunkten werden untersucht. Die erreichten Gesamtgenauigkeiten liegen zwischen 53.07% und 70.69%, bzw. 0.48 und 0.68 Kappa. Diese Ergebnisse werden den Klassifikationen der einzelnen Sensorquellen gegenüber gestellt. Die maximal erreichte Verbesserung durch die Fusion beträgt 18.96% bzw. 0.19 Kappa.

1 Einführung

Jährlich brechen in den mediterranen Regionen Europas über 45 000 Wald- und Buschbrände aus und zerstören dabei rund 2.6 Millionen Hektar Land (FAO, 2001). Es ist zu erwarten, dass das Feuerrisiko, die Länge der Feuersaison sowie die Feuerhäufigkeit im mediterranen Raum aufgrund des Klimawandels zunehmen werden (ALCAMO et al., 2007). Gleichzeitig vergrößert sich das Schadenspotenzial, da die Feuer immer öfter bewohntes Gebiet erreichen. Wo sich Busch- und Waldland mit von Menschen genutztem Land treffen und ineinandergreifen spricht man von einem *wildland-urban interface* (WUI) (VINCE et al., 2005). In dieser heterogenen Umgebung stellt die Kartierung von Brandgut zur Minderung von Risiken eine grosse Herausforderung dar. Potentiell Abhilfe können moderne Methoden der Fernerkundung schaffen, wobei sich Laserscanner- und Bildspektrometerdaten zur Klassifizierung optimal ergänzen sollten, da sie komplementäre spektrale und strukturelle Informationen liefern (KOETZ et al., 2008). Die hohe spektrale Auflösung des Bildspektrometers erlaubt die Unterscheidung von Pflanzengesellschaften und verschiedenen urbanen Klassen (HEROLD et al., 2003, USTIN et al., 2004). Für eine umfassende Brandgutkartierung ist jedoch auch die vertikale Struktur der aufgenommenen Vegetation von zentraler Bedeutung. Diese Informationen können aus den Laserscanner-Aufnahmen gewonnen werden. Erst die Synergie der beiden Systeme erlaubt eine präzise Beschreibung der vorhandenen Brandguttypen (KOETZ et al., 2008). Die Leistungsfähigkeit der üblicherweise zur Klassifizierung von Landbedeckung verwendeten Algorithmen (z.B. *maximum likelihood*) ist bei einem hohen Grad an Dimensionalität stark vermindert (BENEDIKSSON et al., 1990). In den letzten Jahren sind verschiedene nicht-parametrische Algorithmen erprobt worden, welche kein a priori Wissen über die statistische Verteilung der Daten verlangen. Die *support vector machines* haben sich als besonders geeignet zur Klassifikation von hoch dimensionalen Daten aus unterschiedlichen Quellen erwiesen

¹ Remote Sensing Laboratories, Geographisches Institut, Universität Zürich, Winterthurerstr. 190, 8057 Zürich, Schweiz, Rückfragen an: felix.morsdorf@geo.uzh.ch

(WASKE UND BENEDIKTSSON, 2007; WASKE UND VAN DER LINDEN, 2008), ebenso wie bei Klassen mit multimodaler Verteilung im Merkmalsraum (VAN DER LINDEN et al., 2007). Die vorliegende Studie ist fokussiert auf Klassifizierung der Landbedeckung in einem Gebiet, welches als repräsentativ für das WUI im mediterranen Raum angesehen werden kann. Das Ziel ist es, das Potenzial von Multi-Sensor-Daten zur Beschreibung der komplexen anthropogenen und natürlichen Brandguttypen aufzuzeigen. Ebenso wird aufgezeigt, wie sich unterschiedliche Ansätze bei der Prozessierungskette auf die Güte der Klassifikation auswirkt.

2 Untersuchungsgebiet und Daten

Die verwendeten Daten stammen von einer Feldkampagne, welche im Rahmen des EU-Projektes FIREPARADOX anfangs Oktober 2006 in Frankreich stattfand. Bei einer Befliegung der *Bois-des-Roussettes/Montaignet*-Region südlich von *Aix-en-Provence* (05°28'37"E, 43°29'44"N) wurden auf einem Gebiet von rund 13.5km x 3.5km simultan ein LiDAR und ein Bildspektrometer-Datensatz akquiriert, sowie, zur späteren Validierung, Orthofotos des gesamten Gebiets aufgenommen. Beim Untersuchungsgebiet handelt es sich um ein repräsentatives mediterranes WUI, wo natürliche und antropogene Strukturen aufeinandertreffen. Die Vegetation besteht aus weit verbreiteten Pflanzenvergesellschaftungen (KOETZ et al., 2008): (1.) Eher feuerresistente Hartlaubvegetation, die sogenannte *Garrigue*, dominiert von Spezies wie *Ulex spp.* und *Quercus coccifera*. (2.) Feueranfällige Kiefernwälder (*Pinus halepensis*) und (3.) eher feuerresistente Eichenwälder, (*Quercus illex* und *Quercus pubescens*). Allen Vergesellschaftungen gemeinsam ist die Tatsache, dass sie immergrün sind und das Blattwerk während der Trockenperiode von Juli bis August die geringste Dichte aufweist (HUC UND SIMONI, 2009).

2.1 LiDAR

Zur Aufnahme der LiDAR-Daten kam ein Optech ALTM3100 Laser-Scanner zum Einsatz. Das System arbeitet mit einer Wellenlänge von 1064 nm und kann bis zu vier Echos pro Pulsabgabe aufzeichnen (MALLET UND BRETAR, 2009). Die Flughöhe betrug 800 Meter über Grund. Die erreichte Punktdichte beträgt durchschnittlich 3.7 Punkte pro Quadratmeter.

Aus den Rohdaten wurden verschiedene Produkte abgeleitet, welche sowohl die horizontalen, wie auch die vertikalen Eigenschaften der abgetasteten Oberfläche wiedergeben. Zur Charakterisierung der vertikalen Struktur der Bodenbedeckung wurde in einem 2m x 2m Fenster die relative Punktdichte in sechs verschiedenen Höhenstufen berechnet. Aus der Differenz von DSM und DTM ergibt sich ein *canopy height model*. Zudem wurden auch die Intensitäts-Daten berücksichtigt. Alle LiDAR-Produkte wurden bezüglich ihres Maximalwerts normalisiert, um die SVM-Klassifizierung zu erleichtern.

2.2 Bildspektrometer

Die Bildspektrometer-Daten wurden mit einem AISA EAGLE Sensor erhoben. Insgesamt wurden 97 Bänder zwischen 453 nm und 923 nm mit einer spektralen Bandbreite von 4.6 nm aufgenommen (KOETZ et al., 2008). Die geometrische und radiometrische Korrektur erfolgte mit dem PARGE-Ansatz sowie der ATCOR4 Software (SCHLÄPFER UND RICHTER 2002).

Verbleibende geometrische Ungenauigkeiten wurden mittels direkter Koregistrierung mit den LiDAR-Daten behoben. Die Bodenauflösung nach der Korrektur beträgt 1 m.

3 Methoden

Die Heterogenität eines *wildland-urban interface* und die Tatsache, dass Daten aus unterschiedlichen Quellen verwendet werden, stellen zwei spezifische Anforderungen an den verwendeten Klassifikations-Algorithmus: (1.) Der Algorithmus muss in der Lage sein, mit multimodalen Klassen umzugehen, die keiner bestimmten statistischen Verteilung folgen. (2.) Bedingt durch die hohe Anzahl Klassen (vgl. 4.1) ist mit einer Vielzahl von Mischpixeln zu rechnen. Erschwerend kommt hinzu, dass die Klasseninformation zum Teil mehrdeutig ist. Aus diesen Gründen ist es besonders wichtig, dass die Übergangszonen sauber klassifiziert werden können (KOETZ ET AL., 2008). In verschiedenen vergleichenden Studien zeigt sich, dass hinsichtlich der oben genannten Anforderungen die Leistungsfähigkeit der *support vector machines* (SVM) diejenige anderer nicht-parametrischer Ansätze übertrifft (PAL UND MATHER, 2006). Konsequenterweise wird ein SVM-Algorithmus für die vorliegende Klassifikation gewählt.

3.1 Klassifikationssystem

Basierend auf der Definition für Brandguttypen aus dem PROMETHEUS-Projekt der EU (RIAÑO et al., 2002, PROMETHEUS 1996) und Erfahrungen in der Klassifizierung von urbanen Regionen (ROESSNER et al., 2001; HEROLD et al., 2003, 2004) wird ein Klassifikationssystem abgeleitet, welches speziell auf die Charakteristika des vorliegenden WUI angepasst ist. Das Klassifikationsschema umfasst 18 Klassen. Um das System besser auf die Feuerthematik anzupassen werden einige Klassen nach der Differenzierung wieder zusammengefasst. Danach umfasst das System noch 14 Klassen (Tabelle 1).

Kl.Nr.	Klasse	Nach Zusammenfassung	Kl.Nr.	Klasse	Nach Zusammenfassung
1	Brandguttypus 1		10	Asphaltierte Strasse	Feuerbarrieren
2	Brandguttypus 2		11	Kiesstrasse	
3	Brandguttypus 3		12	Tennisplätze	
4	Brandguttypus 4		13	Abgedeckte Felder	
5	Brandguttypus 5		14	Erde	
6	Brandguttypen 6 & 7		15	Fels	Feuerbarrieren
7	Ziegeldächer	Wohnbauten	16	Brandflächen	
8	Metalldächer	Gewerbebauten	17	Schwimmbecken	Wasser
9	Übrige Dachmaterialien		18	Natürliche Wasserkörper	

Tab. 1: Klassifikationssystem für das *wildland-urban interface*

3.2 Support vector machines

SVMs trennen zwei Klassen durch das Einpassen einer optimal separierenden Hyperebene im n -dimensionalen Merkmalsraum (VAPNIK 1998). Eine Hyperebene ist optimal, wenn sie: (1.) die

Distanz zwischen der Grenze und den nächst gelegenen Stichprobenpunkten maximiert und (2.) den Fehler bei nicht-trennbaren Stichprobenpunkten minimiert (BRUZZONE UND CARLIN 2006). Für linear nicht-trennbare Fälle werden die Datenpunkte mit Hilfe einer Kern-Funktion (z.B. *gaussian radial basis function*) in einen Raum höherer Dimension projiziert. Eine detaillierte Beschreibung der SVM-Funktionsweise findet man in der Arbeit von BURGESS 1998.

Um das Mehrklassenproblem mit den ursprünglich binären SVM zu lösen, wird eine *one-against-all*-Strategie (OAA) gewählt (FOODY UND MATHUR 2004). Für das Training und die Klassifizierung kommt eine IDL-Implementierung (JANZ et al., 2007) von LIBSVM (CHANG UND LIN, 2001) zum Einsatz.

3.3 Hierarchien

Da mit dem *one-against-all*-Ansatz gearbeitet wird, schneidet beim Training immer diejenige Parametrisierung am besten ab, welche über alle Klassen hinweg die beste Generalisierung ermöglicht. Eine Parameter-Kombination, welche für die Unterscheidung von Strassen und Häusern ideal ist, kann für die Differenzierung von unterschiedlichen Brandgut-Klassen suboptimal sein. Es liegt also nahe, die Klassen in Gruppen einzuteilen und für jede dieser Gruppen eine eigene SVM zu trainieren. Vier verschiedene Arten der Gruppenbildung werden untersucht: (1.) keine Gruppierung, (2.) die Trennung nach Höhenstufen, (3.) die Trennung von Vegetation und Nicht-Vegetation und (4.) die Kombination der Gruppierungen (2.) & (3.).

3.3.1 Höhenstufenhierarchie

Die Grenzen für die vier gewählten Höhenstufen orientieren sich dabei an der Unterscheidung der Brandguttypen, da aufgrund ihrer Ähnlichkeit bei der Differenzierung dieser Klassen die größten Schwierigkeiten zu erwarten sind. Die Höhenstufen werden wie folgt definiert: (1.) 0 m – 0.5 m, (2.) 0.5 m – 2 m, (3.) 2 m – 4 m, (4.) über 4 m. Aus dem CHM wird für jede dieser Höhenstufen eine Maske gebildet. Für alle Pixel unter der jeweiligen Maske wird eine eigene SVM mit den dazugehörigen Klassen trainiert. Die Resultate der einzelnen Höhenstufen werden anschließend zusammengefügt.

3.3.2 Vegetationshierarchie

Die Unterscheidung zwischen Vegetation und Nicht-Vegetation erfolgt mit Hilfe des *normalized difference vegetation index* (NDVI). Die Ableitung des NDVI erfolgt über sechzehn Kanäle, um zufällige Effekte (z.B. durch Rauschen) zu vermeiden. Die NDVI-Daten werden mit den LiDAR-Messungen ergänzt. Eine SVM unterscheidet dann zwischen Vegetation und Nicht-Vegetation. Analog zum Vorgehen bei der Höhenhierarchie wird für die Pixel unter den Masken eine SVM nur mit den jeweiligen Klassen trainiert.

3.3.3 Kombinierte Hierarchie

Die kombinierte Hierarchie ist die Synthese der Höhenstufen- und der Vegetationshierarchie. Damit entstehen sowohl für Vegetation als auch für Nicht-Vegetation Klassengruppen, welche nach der Höhe eingeteilt sind.

3.4 Datenfusion

Bei der Arbeit mit Datensätzen verschiedener Quellen ist es wichtig, der Frage nachzugehen, zu welchem Zeitpunkt innerhalb der Prozessierungskette die Daten fusioniert werden sollen (POHL UND VAN GENDEREN, 1998). Um den Einfluss des Fusionszeitpunktes festzustellen, werden die Klassifizierungen ohne Hierarchie und diejenigen mit der kombinierten Hierarchie zwei mal durchgeführt. Für die erste Klassifikation werden die Daten vorher zusammengefügt, für die zweite werden die Datensätze einzeln bearbeitet und die Ergebnisse fusioniert.

3.5 Validierung

Zur Beurteilung der Klassifikationsgüte werden in einem geschichteten Zufallsverfahren 1500 Stichprobenpunkte ausgewählt und deren Klassenzugehörigkeit anhand der Orthofotos bestimmt. Dies entspricht rund 83 Punkten pro Klasse. Mit Hilfe dieser Daten werden Konfusionsmatrizen erstellt aus welchen *user*, *producer* und *overall accuracy* (UA, PA, OA) sowie Cohen's Kappa-Koeffizient berechnet werden (CONGALTON, 1991).

4 Resultate und Diskussion

Tabelle 2 zeigt die *overall accuracy* sowie die Kappa-Koeffizienten der Einzelklassifikation von LiDAR- und Bildspektrometer-Daten, sowie diejenigen des vorgängig fusionierten Datensatzes ohne Hierarchie. In Abbildung 1 sind die *user accuracies* für alle Klassen der jeweiligen Datensätze dargestellt. Die LiDAR-Klassifikation weist deutlich tiefere Genauigkeiten auf als die anderen Klassifikationen. Allerdings gelingt die Differenzierung der Brandgut-Klassen außer für Klasse 1 mit den LiDAR-Daten deutlich besser als mit den spektralen Daten allein (Abbildung 2). Durch die Fusion erhöht sich die OA gegenüber den Spektraldaten / LiDAR-Daten um 18,96% / 30,24%, der Kappa-Koeffizient um 0,20 / 0,32 Kappa.

Datensatz	OA [%]	Kappa
Bildspektrometer	40.52	0.38
LiDAR	29.24	0.24
Fusioniert	59.48	0.57

Tab. 2: *Overall accuracies* und Kappa von Einzel- und Multi-Sensor-Daten

4.1 Datenfusion

Unabhängig davon, welcher Prozessierungsablauf gewählt wird, führt die Fusion der beiden Datensätze immer zu einem markanten Anstieg der Klassifikationsgüte. Sowohl die *overall accuracy* als auch der Kappa-Koeffizient steigen stark. Der hohe Anstieg von Kappa um 0,2 zwischen den fusionierten Daten und der Klassifikation der Bildspektrometer-Daten allein deutet auf eine besser ausgewogene Leistung des Algorithmus über alle Klassen hinweg gesehen hin. Der Anstieg kann vor allem durch die bessere Differenzierbarkeit von Klassen mit ähnlichen spektralen, aber unterschiedlichen geometrischen Eigenschaften erklärt werden. Ein grosser Anteil der Verbesserung geht auf die wesentlich genauere Differenzierung der verschiedenen Brandgutklassen im fusionierten Datensatz zurück. Die durchschnittliche *user accuracy* der

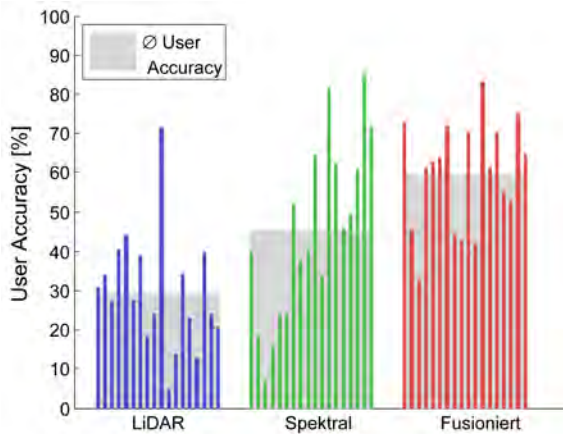


Abbildung 1: *User accuracies* von LiDAR-, Bildspektrometer- und fusionierten Daten. Die grau hinterlegte Fläche visualisiert die Durchschnittsgenauigkeit über alle Klassen. Die Balken repräsentieren die 18 Klassen aus Tabelle 1 (von links nach rechts).

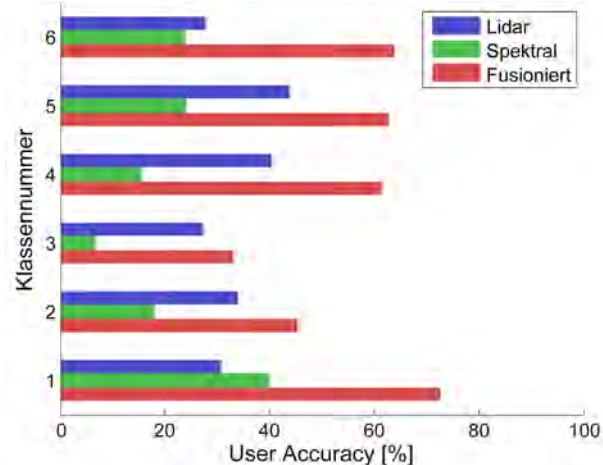


Abbildung 2: *User accuracies* der sechs Brandgut-Klassen von fusionierten und nicht fusionierten Daten. Die Klassennummern entsprechen denjenigen aus Tabelle 1.

Vegetationsklassen konnte um 36 % gesteigert werden. Die Genauigkeit über die restlichen Klassen hinweg wird um durchschnittlich 4 % erhöht.

Der Zeitpunkt der Datenfusion beeinflusst das Ergebnis erheblich (Tabelle 3). Klassengruppierungen reduzieren den Einfluss jedoch stark. Ohne Hierarchien beträgt die Differenz der OA 12.82 % bzw. 0.15 Kappa (nach der Klassenzusammenfassung). Betrachtet man nur die durchschnittliche *user* und *producer accuracy* für die Vegetationsklassen, so fällt die Differenz noch größer aus, nämlich 16 % (*user*) bzw. 21 % (*producer*). Bei der kombinierten Hierarchie betragen die Unterschiede zwischen 0.7%-1.26 % OA bzw. 0.01-0.02 Kappa und liegen damit eine Größenordnung tiefer. Die Fusion nach der Klassifikation führt zu einer deutlichen Verschlechterung der Genauigkeit. Besonders stark beeinträchtigt wird die Differenzierung der Brandguttypen. Probleme treten vor allem seitens der LiDAR-Daten auf. Die Trennung verschiedener Oberflächen ist schwierig, da dazu nur die Intensitätswerte zur Verfügung stehen. Klassen mit ähnlichen vertikalen Eigenschaften werden oft verwechselt. Das schlechte Ergebnis der LiDAR-Klassifikation (vgl. oben) wirkt sich stark auf das Endergebnis aus.

4.2 Hierarchien

Die Bildung von Klassengruppen wirkt sich immer positiv auf die Güte der Klassifikation aus. Der Effekt von Höhenstufen und die Unterscheidung zwischen Vegetation und Nicht-Vegetation ist ungefähr gleich groß (Tabelle 3). Allerdings wirken sich die Gruppierungen auf unterschiedliche Klassen aus. So hat die Einteilung in Höhenstufen einen deutlich positiven Effekt auf die Differenzierung von Straßen und Dächern. Allerdings kommt es zum Beispiel oft zu Verwechslungen zwischen „Brandguttypus 1“ und „Erde“, welche sich nicht in der Höhe unterscheiden. In der Vegetationshierarchie ist dies kaum mehr der Fall, dafür ist die Unterscheidung von Straßen und Dächer schwierig. Da sich die zwei Gruppierungen auf

unterschiedliche Aspekte der Klassendifferenzierung auswirken, ist klar, dass eine Verbindung der beiden die positive Wirkung noch verstärkt. Durch die Kombination der beiden Hierarchien wird eine Steigerung der OA um 4.8 % und 0.04 Kappa gegenüber der Variante ohne Hierarchie erreicht (Tabelle 3). In Abbildung 3 ist ein Ausschnitt der Klassifikationsergebnisse räumlich dargestellt.

Fusion	OA [%]		Kappa	
	vorher	nachher	vorher	nachher
Keine Hierarchie	65.89	53.07	0.63	0.48
Höhenstufenhierarchie	67.09	-	0.64	-.2
Vegetationshierarchie	66.76	-.2	0.63	-.2
Kombination	70.69	69.43	0.68	0.66

Tab. 3: *Overall accuracies* und Kappa aller Varianten nach der Klassenzusammenfassung



Abbildung 3: Klassifikation mit kombinierter Hierarchie und Fusion vor der Klassifizierung (Ausschnitt).

5 Schlussfolgerungen

Die erreichte maximale *overall accuracy* von 70.69 % bei einem Kappa-Koeffizienten von 0.68 ist unter Berücksichtigung der hohen Klassenzahl ein gutes Ergebnis. Dies zeigt, dass der gewählte SVM-Algorithmus eine gute Generalisierung ermöglicht. Der Einbezug von mehr als einer Datenquelle verbessert die Klassifikationsgüte erheblich. Die dreidimensionale Information der LiDAR-Daten ergänzt die spektrale Information der Bildspektrometer-Daten. Dies führt zu einem signifikanten Anstieg der Klassifikationsgenauigkeit. Die *overall accuracy* kann mit dem fusionierten Datensatz um rund 19 % gesteigert werden. Insbesondere die Differenzierung der verschiedenen Brandguttypen profitiert von der Fusion. Die Prozessierungskette hat einen erheblichen Einfluss auf die Güte der Klassifikation. Eine hierarchische Vorgehensweise bringt eine klare Verbesserung der erreichbaren Klassifikationsgenauigkeit. Sowohl die Einteilung in Höhenstufen als auch diejenige in „Vegetation“ und „Nicht-Vegetation“ führen zu besseren Differenzierungen. Die Kombination der beiden Hierarchien bringt eine Verbesserung von 4.8% OA gegenüber der Klassifikation ohne Hierarchie. Der Unterschied zwischen der schlechtesten

und der besten Variante beträgt rund 17 % OA. Damit ist die Verbesserung fast so hoch, wie diejenige, welche durch den Einbezug der zweiten Datenquelle erreicht wird. Die höhere Genauigkeit rechtfertigt also den zusätzlichen Arbeitsaufwand durch eine komplexere Prozesskette. Die Frage nach dem günstigsten Fusionszeitpunkt kann nicht abschließend geklärt werden. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass die Daten besser vor der Klassifizierung fusioniert werden sollen. Die Befunde sind allerdings nicht eindeutig. Nach der Einführung von Hierarchien zur Klassengruppierung sind die Unterschiede nur noch minimal. Der präsentierte Klassifikationsansatz mittels SVM erlaubt eine genauere Kartierung von heterogenen Gebieten, wie sie das *wildland-urban interface* darstellt. Das Wissen über die Position von Gebäuden relativ zum Brandgut erlaubt zudem eine präzisere Planung und Überwachung von Feuermanagement zur Vermeidung von Brandschäden an der Infrastruktur.

6 Danksagung

Wir möchten uns bei Britta Allgöwer (Universität Zürich) für die Bereitstellung der FireParadox-Daten, Andreas Janz (Humboldt Universität zu Berlin) für die Bereitstellung und den Support seiner imageSVM-Software, Benjamin Koetz (ESA) und Sebastian van der Linden (Humboldt Universität zu Berlin) für zahlreiche Inputs und Tipps zum Umgang mit support vector machines bedanken.

7 Literaturverzeichnis

- ALCAMO, J., MORENO, J.M., NOVÁKY, B., BINDI, M., COROBOV, R., DEVOY, R. J.N., GIANNAKOPOULOS, C., MARTIN, E., OLESEN, J.E. & SHVIDENKO, A., 2007: Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. M. L. PARRY, J. P. PALUTIKOF P. J. VAN DER LINDEN C. E. HANSON, O .F. CANZIANI (Eds.), Fourth Assessment Report. IPCC Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- BENEDIKTSSON, J.A., SWAIN, P.H. & ERSOY, O.K., 1990: Neural network approaches versus statistical-methods in classification of multisource remote-sensing data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **28** (4), S. 540–552.
- BRUZZONE, L. & CARLIN, L., 2006: A multilevel context-based system for classification of very high spatial resolution images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **44** (9), S. 2587-2600.
- CHANG, C.-C. & LIN, C.-J., 2006: LIBSVM: a Library for Support Vector Machines. Implementation manual.
- CONGALTON, R.G., 1991: A Review of Assessing the Accuracy of Classifications of Remotely Sensed Data. *Remote Sensing of Environment*, **37**, S. 35-46.
- FAO, 2001: Global Forest Ressources Assessment 2000 – Main report. http://www.fao.org/forestry/fo/fra/docs/Wp55_eng.pdf, Zugriff: 11.10.09.
- FOODY, G.M. & MATHUR, A., 2004: A Relative Evaluation of Multiclass Image Classification by Support Vector Machines. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **42** (6), S. 1335-1343.
- HEROLD, M., GARDNER, M.E. & ROBERTS, D.A., 2003: Spectral Resolution Requirements for

- Mapping Urban Areas. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **41** (9), S. 1907-1919.
- HEROLD, M., ROBERTS, D.A., GARDNER, M.E. & DENNISON, P.E., 2004: Spectrometry for urban area remote sensing – Development and analysis of a spectral library from 350 to 2400 nm. *Remote Sensing of Environment*, **91**, S. 304-319.
- HUC, R. & SIMONI, G., 2009: Persönliche Kommunikation.
- JANZ, A., SCHIEFER, S., WASKE, B. & HOSTERT, P., 2007: imageSVM – A user-oriented tool for advanced classification of hyperspectral data using support vector machines. Proceedings of the 5th EARSeL Workshop on Imaging Spectroscopy.
- KOETZ, B., MORSDORF, F., VAN DER LINDEN, S., CURT, T. & ALLGÖWER, B., 2008: Multi-source land cover classification for forest fire management based on imaging spectrometry and LiDAR data. *Forest Ecology and Management*, **256**, S. 263-271.
- MALLET, C. & BRETAR, F., 2009: Full-waveform topographic lidar: State-of-the-art. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, **64** (1), S. 1-16.
- PAL, M. & MATHER, P.M., 2006: Some issues in the classification of DAIS hyperspectral data. *International Journal of Remote Sensing*, **27** (14), S. 2895-2916.
- POHL, C. & VAN GENDEREN, J.L., 1998: Multisensor image fusion in remote sensing: concepts, methods and applications. *International Journal of Remote Sensing*, **19** (5), S. 823-854.
- PROMETHEUS, 1996: PROMETHEUS S.V. (project management techniques for optimization of suppression and minimization of wildfire effects). European Commission (Ed.).
- RIAÑO, D., CHUVIECO, E., SALAS, J., PALACIOS-ORUETA, A. & BASTARRIKA, A., 2002: Generation of fuel type maps from Landsat TM images and ancillary data in Mediterranean ecosystems. *Canadian Journal of Forest Research*, **32**, S. 1301-1315.
- ROESSNER, S., SEGL, K., HEIDEN, U. & KAUFMANN, H., 2001: Automated Differentiation of Urban Surfaces Based on Airborne Hyperspectral Imagery. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **39** (7), S. 1525-1532.
- SCHLÄPFER, D. & RICHTER, R., 2002: Geo-atmospheric processing of airborne imaging spectrometry data. Part 1. Parametric orthorectification. *International Journal of Remote Sensing*, **23** (13), S. 2609-2630.
- USTIN, S.L., ROBERTS, D.A., GAMON, J.A., ASNER, G.P. & GREEN, R.O., 2004: Using imaging spectroscopy to study ecosystem processes and properties. *Bioscience*, **54**, S. 523–534.
- VAN DER LINDEN, S., JANZ, A., WASKE, B., EIDEN, M. & HOSTERT, P., 2007: Classifying segmented hyperspectral data from a heterogeneous urban environment using support vector machines. *Journal of Applied Remote Sensing*, **1**, S. 1-17.
- VAPNIK, V.N., 1998: *Statistical Learning Theory*. Wiley, New York.
- VINCE, S.W., DURYEA, M.L., MACIE, E.A. & HERMANSEN, L.A., 2005: *Forests at the Wildland-Urban Interface: Conservation and Management*. CRC Press LLC, Boca Raton, USA.
- WASKE, B. & BENEDIKTSSON, J.A., 2007: Fusion of support vector machines for classification of multisensor data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **45** (12), S. 3858-3866.
- WASKE, B. & VAN DER LINDEN, S., 2008: Classifying Multilevel Imagery From SAR and Optical Sensors by Decision Fusion. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **46** (5), S. 1457-1466.

Entwicklung, Kalibrierung und Erprobung eines neuen kosteneffizienten abbildenden Spektrometers für umweltrelevante Forschungsanwendungen

TOBIAS HANK¹, WOLFRAM MAUSER¹ & TIMO GEBHARDT¹

Zusammenfassung: Ungeachtet der vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten für abbildende Spektrometer ist die Verfügbarkeit solcher Aufnahmesysteme stark begrenzt, was zu einer geringen Aufnahmedichte führt. Anhand multisaisonalen Erdbeobachtung besteht aber erst die Möglichkeit das volle Potenzial hyperspektraler Auswertetechniken auszuschöpfen. Um eine kosteneffiziente, kontinuierliche Beobachtung der Landoberfläche zu ermöglichen, wurde an der LMU München eine Reihe abbildender Spektrometer unter dem Titel „Airborne Visible and near infrared Imaging Spectrometer (AVIS) entwickelt. Nun steht mit AVIS-3 die dritte Generation der Baureihe zur Verfügung, die sich neben zahlreichen technischen Verbesserungen vor allem durch eine Erweiterung des Spektralbereiches auszeichnet. Dieser Beitrag stellt die Entwicklung, Kalibrierung und eine erste Erprobung des neuen Systems vor und zeigt verschiedene Möglichkeiten der Anwendung auf.

1 Einleitung – Hyperspektrale Erdbeobachtung im Kontext aktueller Umweltfragestellungen

Vor dem Hintergrund globaler landschaftlicher Veränderungen, wie z.B. der zunehmenden Versiegelung und Zersiedelung der Landschaft, der fortschreitenden Bodenerosion oder der Anpassung von Nutzungsstrategien landwirtschaftlicher Flächen, ist die Beobachtung bzw. das Monitoring von Umweltökosystemen von besonders hoher Relevanz. Speziell hyperspektrale Fernerkundungstechniken zeigen ein großes Potenzial für die Ableitung komplexer Landoberflächenparameter, die als Umweltindikatoren herangezogen werden können.

Eine Folge davon ist, dass das Interesse an hyperspektralen Anwendungen und damit an hyperspektralen Datensätzen in den letzten Jahren stark angestiegen ist. Die Verfügbarkeit spektroskopischer Aufnahmesysteme ist jedoch stark eingeschränkt. Nur wenige Systeme, wie z.B. der Australische Sensor HyMap (COCKS ET AL. 1998), sind kommerziell verfügbar, was zu einer geringen Aufnahmedichte führt. Auch kommerzielle Datenkunden erkennen zunehmend das Potenzial hyperspektraler Aufnahmesysteme, was die Verfügbarkeit von Daten für wissenschaftliche Zwecke zusätzlich erschwert. Speziell eine multisaisonale, die jahreszeitliche Entwicklung der Vegetation begleitende, Erdbeobachtung aber kann erst das volle Potenzial hyperspektraler Auswertetechniken ausschöpfen. Das liegt vor allem in der Tatsache begründet, dass Fernerkundungsdaten stets nur eine Momentaufnahme der Landoberfläche liefern können, wobei beachtet werden muss, dass tatsächlich dynamisch ablaufende Prozesse observiert werden. Die photosynthetische Aktivität eines sich entwickelnden Pflanzenbestandes beispielsweise ist einer starken zeitlichen Dynamik unterworfen.

1) Tobias Hank, Wolfram Mauser und Timo Gebhardt, Department für Geographie der LUDWIG-MAXIMILIANS-UNIVERSITÄT München, Luisenstraße 37, 80333 München; E-Mail: t.hank@iggf.geo.uni-muenchen.de, w.mauser@lmu.de, t.gebhardt@iggf.geo.uni-muenchen.de

Eine solche Dynamik lässt sich aus monotemporalen Aufnahmen nicht erschließen und muss daher geschätzt werden, was z.B. mit Hilfe von prozessbasierten Landoberflächenmodellen möglich ist. Die Genauigkeit solcher Modelle wiederum kann durch die Zuhilfenahme von Fernerkundungsinformation verbessert werden, indem die zeitliche Dynamik der Modelle mit der räumlichen Dynamik der Erdbeobachtungsdaten verknüpft wird. Das kann z.B. durch die Assimilation von Erdbeobachtungsdaten während der Laufzeit des Modells geschehen, wobei die flugzeug- oder satellitengestützten Aufnahmen als Stützstellen dienen (SCHNEIDER 2003). Auf diese Weise können die jeweiligen Vorteile beider Techniken kombiniert werden, sodass sich die Genauigkeit der abgeleiteten bio- und geophysikalischen Variablen erhöht. Die für den erfolgreichen Einsatz einer solchen Assimilationstechnik notwendige Anzahl an Stützstellen während einer Beobachtungsperiode ist von der jeweiligen Fragestellung abhängig. Für die Beschreibung eines Wachstumszyklus landwirtschaftlicher Bestände beispielsweise haben sich drei bis vier Stützstellen während der Vegetationsperiode als sinnvolle Minimalabdeckung erwiesen (OPPELT & HANK 2009). Bei unvorhergesehenen Ereignissen, wie z.B. Windwurf- oder Hagelschäden, wäre eine höhere Dichte an Stützstellen nötig, um das tatsächliche Wachstumsverhalten hinreichend genau im Modell abzubilden. Ein solch hochfrequentes Monitoring einzelner Bestände ist mit herkömmlichen bzw. kommerziell erhältlichen abbildenden Spektrometern aus terminlichen und pekuniären Gründen nicht möglich.

2 Das Abbildende Spektrometer AVIS-3

Um eine kosteneffiziente, wachstumsbegleitende Beobachtung vor allem landwirtschaftlicher Bestände zu ermöglichen, wurde an der LMU München eine Reihe abbildender Spektrometer unter dem Titel „Airborne Visible and near infrared Imaging Spectrometer (AVIS)“ entwickelt.

2.1 Die AVIS Sensorenfamilie

Bereits im Jahr 1997 konnte die erste Generation des AVIS erfolgreich erprobt werden (MAUSER & OPPELT 2000). In den folgenden Jahren wurde das System weiterentwickelt, sodass seit dem Jahr 2001 AVIS-2 operationell eingesetzt werden kann (OPPELT & MAUSER 2007). Nun steht mit AVIS-3 die dritte Generation der Baureihe zur Verfügung, die sich neben zahlreichen technischen Verbesserungen, wie z.B. einer konsequent fortgesetzten Gewichtsreduktion oder einer verbesserten Aufzeichnung der Lagegeometrie, vor allem durch eine Erweiterung des Spektralbereiches Dank der Verwendung eines sekundären NIR Spektrometers auszeichnet.

2.2 Entwicklung und Bau

Bei der Planung der Baureihe wurde ausschließlich auf kommerziell erhältliche Komponenten zurückgegriffen. Die Entwicklungsarbeit konzentrierte sich demnach vornehmlich auf die raum- und gewichtseffiziente Kombination und Installation der Sensorelemente, die Konstruktion von Gehäuse und Plattformadaptern sowie auf die Erstellung der notwendigen Betriebs- und Aufnahmesoftware.

2.2.1 Technische Komponenten

AVIS-3 ist ein Erdbeobachtungsgerät, das drei verschiedene Sensoren in einem kompakten System vereint (siehe Tab. 1). In seiner Funktion als abbildendes Spektrometer zeichnet AVIS-3 die Landoberfläche mit Hilfe eines Silizium-basierten Detektors in einem Wellenlängenbereich von 400 bis 1000 nm auf. Zusätzlich erfasst ein auf Indium-Gallium-Arsenid-Basis arbeitender NIR-Detektor den Wellenlängenbereich von 900 bis 1700 nm. Das von der Erdoberfläche reflektierte Sonnenlicht erreicht dabei die Detektoren, indem es über einen schwenkbaren Spiegel in die Spektrographen umgeleitet wird (Abb. 1 und 2). Diese Konstruktion ermöglicht ein schnelles und präzises (0.18° pro 20 ms) Schwenken des Aufnahmewinkels in Flugrichtung (along track) für die Aufnahme multiangulärer Bilddaten.

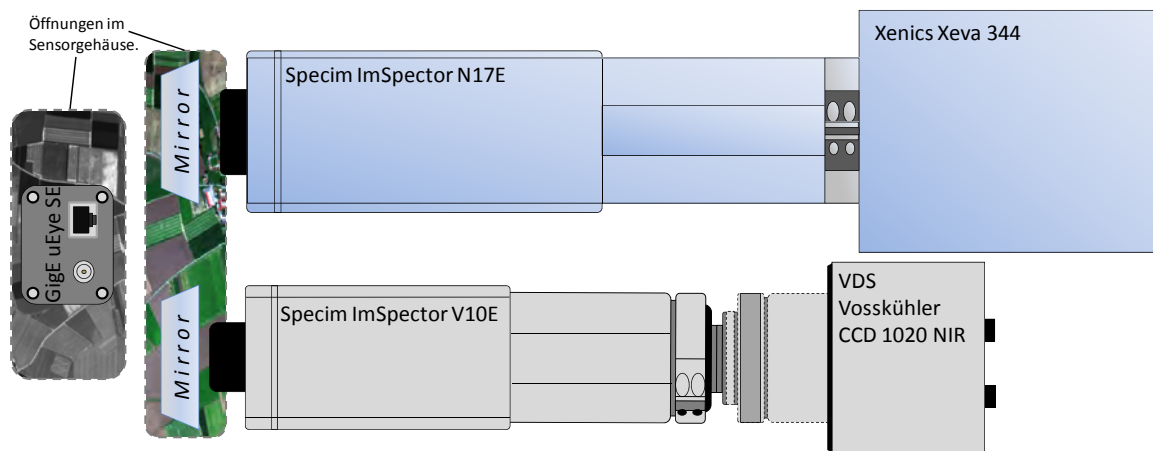


Abb. 1: Innerer Aufbau des AVIS-3 Sensors in der Draufsicht, inklusive der VNIR (unten) und NIR (oben) Spektrographen mit den zugehörigen Kameras sowie der panchromatischen Luftbildkamera (links). Die Sensoren beobachten die Landoberfläche durch unterseitige Öffnungen im Gehäuse. Im Fall der Spektrometer wird die horizontale Sichtachse durch Spiegel nach Unten gelenkt (siehe auch Abb. 2).

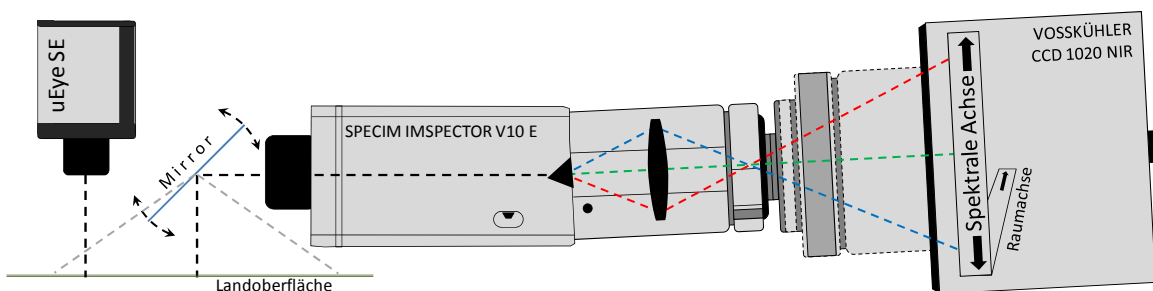


Abb. 2: Seitenansicht des inneren Aufbaus des AVIS-3-Sensors. Zu erkennen sind die unterschiedlichen Sichtachsen der Spektrometer und der PAN-Kamera, der schwenkbare Spiegel zur Aufnahme unterschiedlicher Beobachtungswinkel und die senkrecht stehende Achse der spektralen Dimension auf dem CCD (Charge Coupled Device).

Die Spektrographen sind fest mit lichtempfindlichen NIR-Kameras verbunden. Zusätzlich ist eine hochauflösende panchromatische CMOS-Kamera an Bord (siehe Abb. 1 und 2, links, CMOS = Complementary Metal Oxide Semiconductor), die es erlaubt während der schrittweisen Abtastung der Landoberfläche durch die beiden Spektrometer hochauflösende Monochrom-Luftbilder des überflogenen Gebietes aufzunehmen, welche bei einer späteren Interpretation der Hyperspektralaufnahmen hilfreich sein können (z.B. Erstellung eines hochauflösenden DGMS aus Stereopaaren, Identifikation sehr kleiner Objekte, etc.). Alle optischen Komponenten sind mit Linsen/Filter-Systemen der Firma Schneider-Optik Kreuznach ausgestattet. Im Falle des VNIR-Spektrometers kann die Optik auf Basis der aktuellen Flughöhe über Grund automatisch durch den Operator fokussiert werden. Alternativ zur NIR Aufnahme durch das sekundäre Spektrometer kann AVIS-3 mit einer Breitband-Thermalkamera vom Typ OPGAL EYE R321 B ausgestattet werden, die in einem Wellenlängenbereich von 8-14 μm die Wärmeemission der Erdoberfläche abbildet. Die Signale der Kameras werden mit Hilfe von zwei PLEORA iPORTs vom Typ PT100-LV via IP über eine schnelle Netzwerkverbindung an den PC übertragen. Aufgrund der starken Erschütterungen, denen das System während des Fluges ausgesetzt ist, verfügt der kompakte Industrie-PC zusätzlich über solid state Datenspeicher, die auch unter rauen Flugbedingungen ein konstantes Schreiben der aufgenommenen Daten garantieren.

Tab. 1: Technische Komponenten des AVIS-3 Systems.

VNIR-Spektrograph:	SpecIm IMSPECTOR V10E
VNIR-Kamera:	VDS Vosskühler CCD 1020 NIR
NIR- Spektrograph:	SpecIm IMSPECTOR N17 E
NIR-Kamera:	XenICs XEVA 1.7-LVDS
PAN-Kamera:	GigE uEye UI5480SE C
Lagebestimmung:	Inertiales Navigationssystem: IMAR INAV-FMS, Messfrequenz 100 Hz, Position direkt am Sensor.
Positionsbestimmung:	Integriertes DGPS GARMIN 18, Messfrequenz 5 Hz (400 Hz durch Extrapolation der INS-Information).
Flugrechner:	INONET Conception bX Embedded PC
Speicherkapazität:	40 GB S-ATA + 40 GB Solid State
Gewicht:	30-42 kg
Stromversorgung:	12 V \pm , 120 W (80 - 90 W Standby)

2.2.2 Kalibrierung des Systems

Um aus den gerätespezifischen Grauwerten (DN) die spektrale Strahldichte und letztendlich den Reflexionsgrad der Landoberfläche ableiten zu können, müssen die Signale zunächst mit der aufgenommenen Strahlungsenergie in Beziehung gesetzt werden. Da die Sensitivität der Detektoren für verschiedene Wellenlängen unterschiedlich hoch ist, ergibt sich für jede Wellenlänge eine Beziehung zwischen den Grauwerten des Aufnahmesystems und der tatsächlich erfassten Strahldichte (gain). Diese Beziehung kann durch eine Labormessung abgeleitet werden, wobei mit Hilfe von speziellen Halogen Kalibrierlampen, deren

Emissionsspektrum bekannt ist, Licht einer genau regulierten Beleuchtungsstärke in das Aufnahmesystem geleitet wird. Eine Ulbricht-Kugel sorgt während dieser Messung für eine gleichmäßig diffuse Beleuchtungsstärke auf der gesamten Oberfläche des Detektors.

2.2.3 Radiometrische Eigenschaften und Korrektur

Aus den technischen Spezifikationen der Komponenten ergibt sich für das VNIR-Spektrometer eine spektrale Abdeckung von 400 bis 1000 nm, die durch maximal 400 Kanäle mit einer theoretischen Bandbreite von 1.7 nm aufgezeichnet wird (siehe Tab. 2). Zur Verbesserung des Signal-Rausch-Verhältnisses wird diese Kanalzahl während der Datenvorprozessierung auf 200 reduziert, wodurch eine spektrale Abtastbreite von 3.7 nm erreicht wird. Diese Abtastbreite liegt sehr nahe an der tatsächlichen spektralen Auflösung der Systemkomponenten von 2.8 nm und erlaubt so eine wesentliche Verringerung des Datenvolumens, während die spektrale Information weitgehend erhalten bleibt. Im Falle des NIR-Spektrometers wird der Wellenlängenbereich von 900 bis 1700 nm durch maximal 256 Kanäle aufgezeichnet. Auch hier erfolgt aus o.g. Gründen eine Reduktion der Kanalzahl (Tab. 2).

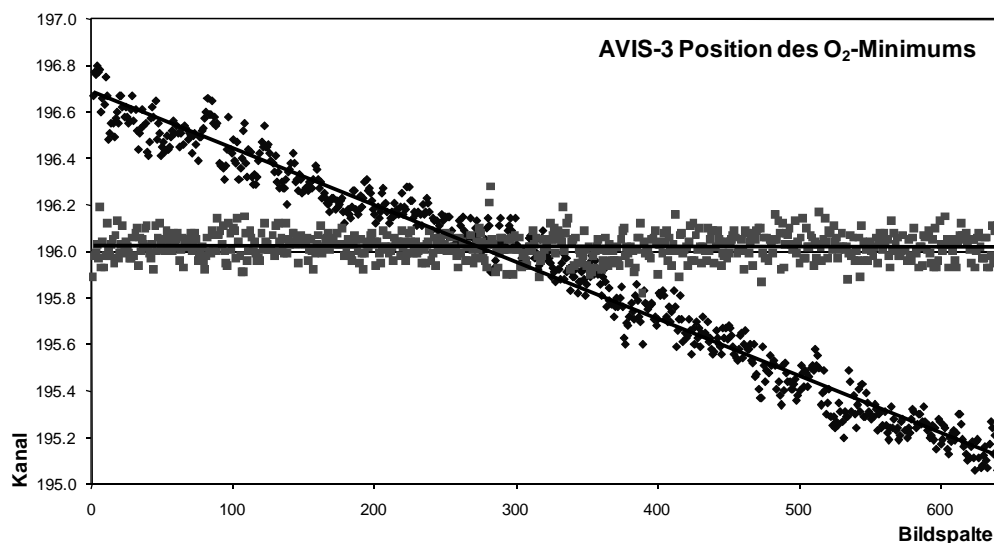


Abb. 3: Lage der Sauerstoff-Absorption bei ~760 nm in den verschiedenen Spalten einer unkorrigierten (schwarz) und einer korrigierten (grau) Bildzeile, relativ zu den Kanälen des VNIR CCDs von AVIS-3.

Da bei Aufnahmesystem der sog. Push-Broom Bauart eine komplette Bildzeile zeitgleich aufgenommen wird, ist für die spektrale Achse jedes Bildelements dieser Zeile ein eigener Bereich des CCDs vorgesehen. Durch geringe Lageungenauigkeiten zwischen Spektrograph und CCD kann der Effekt auftreten, dass Strahlung gleicher Wellenlänge nicht für alle Bildpunkte auf die gleiche Zeile des CCDs gelenkt und damit von verschiedenen Kanälen aufgenommen wird („smile“ bzw. „frown“ Effekt). Dieser Fehler macht sich optisch als Streifenmuster in den Bilddaten bemerkbar, kann aber während der Datenvorprozessierung korrigiert werden, indem die Lage eines schmalbandigen Absorptionsmusters in den verschiedenen Kanälen des CCDs analysiert und ggf. angepasst wird. Abbildung 3 zeigt beispielsweise die Lage der Sauerstoff-

Absorption bei ~ 760 nm in den verschiedenen Spalten einer unkorrigierten (schwarz) und einer korrigierten (grau) Bildzeile, relativ zu den Kanälen des CCDs.

Aus der Kalibriermessung ergeben sich zudem Ungleichmäßigkeiten der Empfindlichkeit der Detektoren in den verschiedenen Bereichen des jeweiligen CCDs. Die Ungleichmäßigkeiten würden in einer späteren Aufnahme ebenfalls als Bildstreifen erkennbar sein, können aber, dadurch dass die sog. Flat-Field Inhomogenität bekannt ist, während der Datenvorprozessierung korrigiert werden.

Tab. 2: Radiometrische Eigenschaften des AVIS-3 Systems.

VNIR-Spektrometer	
Anzahl der Spektralkanäle:	200 nominal, 400 max.
Spektralbereich:	400 – 1000 nm
Spektrale Abtastung:	3.4 nm, max. 1.7 nm
Spektrale Auflösung:	2.8 nm
Radiometrische Auflösung:	12-bit (4096:1)
NIR-Spektrometer	
Anzahl der Spektralkanäle:	128 nominal, 256 max.
Spektralbereich:	900 - 1700 nm
Spektrale Abtastung:	3.1 nm
Spektrale Auflösung:	5.0 nm
Radiometrische Auflösung:	12-bit (4096:1)
PAN-Kamera	
Anzahl der Spektralkanäle:	1
Spektralbereich:	400 – 800 nm
Radiometrische Auflösung:	12-bit (4096:1)

2.2.4 Geometrische Eigenschaften und Korrektur

Vor dem Hintergrund der eingeschränkten Lagestabilität von Flugzeugplattformen kommt der geometrischen Korrektur der Aufnahmen eine besondere Bedeutung zu. Da es sich bei AVIS um einen Sensor nach Push-Broom Bauweise handelt, bei der einzelne Bildzeilen bzw. Bildzeilenblöcke synchron aufgenommen werden, kann jedes Bildelement entlang einer Bildzeile mit einem bestimmten konstanten Aufnahmewinkel assoziiert werden. In Abhängigkeit der aktuellen Flughöhe, der Fluglage (roll, pitch und yaw) sowie der Geländehöhe ergibt sich für jeden Bildpunkt eine individuelle Target-Sensor-Distanz sowie ein nachvollziehbarer Aufnahmewinkel, auf dessen Basis die Lageverzerrung für jeden Bildpunkt berechnet und korrigiert werden kann. Entsprechend der geometrischen Eigenschaften der Komponenten (siehe Tab. 3), können mit AVIS verschiedene räumliche Auflösungen realisiert werden. Die across-track Auflösung wird durch die Flughöhe über Grund variiert, während die along-track Auflösung durch die Fluggeschwindigkeit bestimmt wird. Limitierend auf die geometrische Auflösung wirkt sich in across-track-Richtung die Anzahl der Bildspalten im CCD und in along-track-Richtung die Schreibgeschwindigkeit aus. Die letztendlich erzielte räumliche Auflösung

hängt damit vor allem von der Fragestellung und der dafür benötigten räumlichen Abdeckung ab. Ein sinnvoller Kompromiss zwischen geometrischer Auflösung und ausreichender räumlicher Abdeckung kann z.B. mit einer räumlichen Auflösung von ca. 4 m und einer Schwadbreite von ca. 1500 m realisiert werden.

Tab. 3: Geometrische Eigenschaften des AVIS-3 Spektrometers.

VNIR-Spektrometer	
Geometrische Auflösung:	1.1 mrad IFOV
Maximale Abtastrate:	18 Bilder / sek.
Schwadbreite:	40 Grad, 640 Spalten (1024 max.)
Along Track Schwenkbereich:	-55..55 Grad, 0.18° Inkrement
NIR-Spektrometer	
Geometrische Auflösung:	2.2 mrad IFOV
Maximale Abtastrate:	18 Bilder / sek.
Schwadbreite:	40 Grad, 320 Spalten
Along Track Schwenkbereich:	-55..55 Grad, 0.18° Inkrement
PAN-Kamera	
Geometrische Auflösung:	2560 x 1920, ~5 Megapixel
Maximale Abtastrate:	1 fps
Schwadbreite:	45°
Along Track Schwenkbereich:	Nadir

2.2.5 Mögliche Plattformen

Ebenso wie sein Vorgänger AVIS-2 ist AVIS-3 so konzipiert, dass er auf einer Vielzahl verschiedener Plattformen eingesetzt werden kann. Ein stabiles Aluminiumgestell verbindet die Sensoreinheit mit einem Standard-Luftbildschacht, wie er z.B. in Maschinen der staatlichen Landesvermessung zu finden ist.



Abb. 4: Der AVIS-3 Sensor wird mit Hilfe eines speziellen Rahmens in der DO-27 der Flugsportgruppe Fürstenfeldbruck installiert (links) und Betrieb des AVIS-3 an Bord des LMU eigenen Ultralight Fluggerätes D-MLMU (rechts).

In den vergangenen Jahren wurde AVIS mehrfach erfolgreich an Bord einer Dornier 27 aus dem Bestand der Bundeswehr Flugsportgruppe Fürstenfeldbruck installiert (Abb. 4, links). Die Stromversorgung von Kamera und Systemrechner erfolgt in diesem Fall plattformunabhängig über herkömmliche KFZ-Batterien. Alternativ kann AVIS dank konsequenten Leichtbaus an Bord des LMU eigenen Ultraleichtflugzeuges D-MLMU des Typs ENDURO BMW 1150 geflogen werden. Hier kommt ein speziell geformtes Karbongehäuse zum Einsatz, während die Stromversorgung über das Bordnetz des Flugzeugs gewährleistet wird (Abb. 4, rechts). Auf ideale Weise werden durch die Verwendung eines kleinen transportablen Fluggerätes die Probleme der Verfügbarkeit von Pilot und Flugzeug umgangen. Zusätzlich verfügt AVIS-3 über einen Einbaurahmen, der eine Installation in ein Flugzeug des Typs Dornier 228, wie es z.B. vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) eingesetzt wird, ermöglicht.

2.2.6 Erste Testaufnahmen

Nach der Fertigstellung der endgültigen Sensorversion im Winter 2010 verhinderte die langanhaltende Schlechtwetterperiode von April bis Ende Mai 2010 bisher die Aufnahme von Testdaten mit der aktuellen Konfiguration des Sensors. Allererste Tests wurden dafür bereits im Jahr 2005 mit einer Prototypversion von AVIS-3 aufgezeichnet (Abb. 5, rechts).

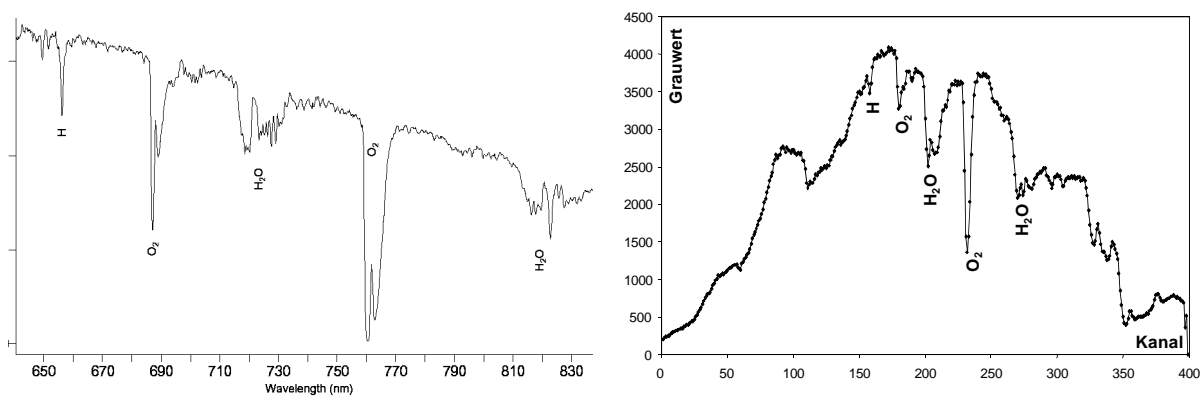


Abb. 5: Hochauflösendes Spektrum der einfallenden Sonnenstrahlung, aufgezeichnet mit einem Echelle Laborspektrometer mit 0.1 nm spektraler Auflösung (links) und Himmelspektrum aufgezeichnet mit dem VNIR-Spektrometer von AVIS-3 am 25.08.2005 (rechts).

Auf der Basis dieser Daten wird bereits das große Potenzial des neuen AVIS erkennbar, auch wenn lediglich Aufnahmen des Silizium-Spektrometers vorliegen, da NIR- und PAN-Kamera zum damaligen Zeitpunkt noch nicht endgültig installiert waren. Vor allem die hohe spektrale Auflösung des AVIS-3 von knapp 3 nm erlaubt die Analyse selbst schmalen Absorptionsbanden. Abbildung 5 zeigt ein Rohspektrum der einfallenden diffusen Himmelsstrahlung vom 25. August 2005 (Abb. 5, rechts) im Vergleich zu einem Spektrum des atmosphärenbeeinflussten Sonnenlichts, das mit Hilfe eines spektral sehr hoch auflösenden (0.1 nm spektrale Auflösung) Echelle-Laborspektrometers aufgezeichnet wurde (Abb. 5, links). Durch den Vergleich der beiden Spektren erkennt man, dass die schmalen Absorptionsbanden von Wasserstoff (H;

~656 nm), Wasserdampf (H₂O; ~725 nm und ~820 nm) und Sauerstoff (O₂; ~680 nm und ~760 nm) durch die spektrale Konfiguration von AVIS-3 ausreichend genau erfasst werden.

3 Anwendungsmöglichkeiten

Aus Sicht der Autoren ergibt sich für ein universell einsetzbares, mobiles abbildendes Spektrometer mit den Eigenschaften von AVIS-3 eine große Bandbreite von Einsatzmöglichkeiten. So ist z.B. der Vorgänger AVIS-2 bereits mehrfach für das Monitoring landwirtschaftlicher Kulturen eingesetzt worden. Im Vordergrund stehen dabei Anwendungen des Präzisionsackerbaus, wie z.B. die teilflächenspezifische Düngeplanung oder das Monitoring von Krankheits- und Schädlingsbefall (MIGDALL ET AL. 2009). Großes Potenzial hat AVIS dabei im Zusammenhang mit der Ableitung von Chlorophyll- und Stickstoffgehalten von Ackerpflanzen bewiesen (OPPELT & MAUSER 2003). Ähnliche Anwendungen ergeben sich sicherlich auch für die Forstwirtschaft, auch wenn durch den beschränkten Aufnahmewinkel des Systems die Abdeckung sehr großer Flächen erschwert ist. Ebenfalls erfolgreich eingesetzt wurde AVIS bereits für gewässerökologische Untersuchungen, wobei herausgefunden wurde, dass Hyperspektralaufnahmen der Art wie AVIS sie zu liefern imstande ist, einen wesentlichen Beitrag zur Abschätzung des Schwebstoff- und Chlorophyllgehaltes von Alt- und Brackwässern leisten können (FRIESE ET AL. 2010). Aber auch in extremeren Regionen kann das Instrument eingesetzt werden, wie z.B. bei der Untersuchung von Degradation und Salinität von Wüstenböden am Rande der Sahara (SCHEIBER ET AL. 2007; OPPELT & MAUSER 2007).

Es ist davon auszugehen, dass mit den technischen Verbesserungen, die mit der neuen Generation des AVIS einhergehen, diese Anwendungen erfolgreich fortgesetzt und verbessert werden können. Die genauere Lagebestimmung wird zunächst zu einer Verbesserung der geometrischen Qualität der Bilder beitragen, was vor allem für kleinräumige Analysen, bei denen eine hohe Lagegenauigkeit von besonderer Bedeutung ist (wie z.B. im Präzisionsackerbau), eine entscheidende Verbesserung verspricht. Durch die Erweiterung des Spektralbereichs können die in den Beständen ablaufenden Prozesse, wie z.B. die Gaswechselaktivität der Pflanzen, aus einer neuen Perspektive beobachtet werden. So ist mit AVIS-3 nun beispielsweise eine bessere Beobachtung des Pflanzenwassergehalts oder der Bestandestemperatur möglich, was für die Qualität der Analyse von Pflanzenstresszuständen von zentraler Bedeutung sein kann. Zudem eröffnet die erweiterte spektrale Abdeckung neue Anwendungsfelder im Bereich der urbanen Fernerkundung.

Mit AVIS-3 wurde eine erfolgreiche Reihe abbildender Spektrometer konsequent fortgesetzt. Dank seiner kompakten Bauweise ist AVIS auf vielfältigen Plattformen einsetzbar und steht für spektroskopische Flugzeugkampagnen zur Verfügung. Vor dem Hintergrund der Entwicklung satellitengestützter abbildender Spektrometer wie z.B. EnMAP (KAUFMANN ET AL. 2006) oder PRISMA (GALEAZZI ET AL. 2008), gewinnt die Methodenentwicklung zur wissenschaftlichen Vorbereitung dieser Missionen an Bedeutung. AVIS könnte aufgrund seiner technischen Konfiguration, seiner technischen Robustheit und der flexiblen Verfügbarkeit auf ideale Weise zu diesen Entwicklungen beitragen.

4 Literaturverzeichnis

- COCKS, T., JENSSEN, R., STEWART, A., WILSON, I. & SHIELDS, T., 1998: The HyMap airborne hyperspectral sensor: the system, calibration and performance. Proceedings of the 1st EARSEL Workshop on Imaging Spectroscopy, Zurich, October 1998.
- GALEAZZI, C., SACCHETTI, A., CISBANI, A. & BABINI, G., 2008: The PRISMA Program. Proceedings of IGARSS 2008 (IEEE International Geoscience & Remote Sensing Symposium), Boston, MA, USA, July 6-11, 2008.
- FRIESE, M., MIGDALL, S., HANK, T., BACH, H., KRÄTZ, D., BORCHARDT, D. & MAUSER, W., 2010: Water quality assessment using hyperspectral techniques for the inland waterway Main and its connected standing water bodies, *Hyperspectral Workshop 2010 – From CHRIS/Proba to PRISMA & EnMAP and beyond*. 17. – 19. März 2010, Frascati (Italy), in press.
- KAUFMANN, H., SEGL, K., CHABRILLAT, S., HOFER, S., STUFFLER, T., MÜLLER, A., RICHTER, R., SCHREIER, G., HAYDN, R. & BACH, H., 2006: A Hyperspectral Sensor for Environmental Mapping and Analysis (Invited paper), IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS 2006) & 27th Canadian Symposium on Remote Sensing, Denver, Colorado, USA, 2006.
- MAUSER, W. & OPPELT, N., 2000: AVIS - ein neuer Sensor für Umweltmonitoring und Precision Farming. In: Berichte der Gesellschaft für Informatik in der Land- und Forstwirtschaft, Band 13, S.274-277.
- MIGDALL, S., BACH, H., BOBERT, J., WEHRHAN, M. & MAUSER, W., 2009: Inversion of a canopy reflectance model using hyperspectral imagery for monitoring wheat growth and estimating yield. Precision Agriculture, in print. DOI 10.1007/s11119-009-9104-6.
- OPPELT, N. & HANK, T., 2009. Improved modeling of maize growth by combining a biophysical model of photosynthesis with hyperspectral remote sensing. In: Henten, E.J.; Goense, D.; Lokhorst, C. (Eds): Precision agriculture '09, Wageningen Academic Publishers, pp. 133-140, Wageningen, The Netherlands.
- OPPELT, N. & MAUSER, W., 2007: Airborne Visible / Infrared Imaging Spectrometer AVIS: Design, Characterization and Calibration. *Sensors*, **7** (9), S. 1934-1954.
- OPPELT, N. & MAUSER, W., 2003: Hyperspectral Remote Sensing - a Tool for the Derivation of Plant Nitrogen and its Spatial Variability. In: Stafford, J. & Werner, A. (Eds.): Precision Agriculture 03, Wageningen Academic Publishers. S. 493-498.
- SCHEIBER, R., HAJNSEK, I., HORN, R., OPPELT, N., MAUSER, W., BEN BACCAR, B. & BIANCHI, R., 2007: AquiferEx: Results of the Optical and Radar Airborne Campaign in Tunisia. Proc. of the POLinSar Workshop, January 22-24 2007, ESA/ESRIN Frascati (Italy), ESA publication SP-644 (CD-ROM).
- SCHNEIDER, K., 2003: Assimilating remote sensing data into a land surface process model. *Int. J. of Remote Sensing*, **24** (14), S. 2959-2980.

White Reference Tour 2009. A round-robin test for better spectral libraries

ANDRÁS JUNG¹, CHRISTIAN GÖTZE & CORNELIA GLÄBER

Zusammenfassung: Terrestrische Spektraldaten werden oft durch Forschungsgruppen erzeugt. Diese spektralen Produkte reichen aber über die Ebene der Arbeitsgruppen hinaus und werden als Referenzen verwendet. Sie besitzen unterschiedliche Qualitätsstufen durch verschiedene Messabläufe, Messgeräte sowie Erfahrungen der Anwender. Forschungstätigkeiten sind von der Qualität und Genauigkeit der spektralen Daten stark beeinflusst. Praktische Anwendungen und Erfahrungen haben gezeigt, dass Messgeräte mit unterschiedlichen Charakteristika in der Labor- und Feldspektrometrie eingesetzt und deren Messergebnisse in spektrale Bibliotheken zusammengefasst werden. Die Anzahl der eingesetzten Spektrometer wächst kontinuierlich. Die Vergleichbarkeit der Messergebnisse bleibt weiterhin eine offene Frage. Unser Forschungsziel war es, Messergebnisse von nicht abbildenden Spektrometern mit variablen spektrometrischen Eigenschaften zu vergleichen. Das Projekt wurde im Rahmen eines Ringversuches durchgeführt und hat mehr als 20 Spektrometer einbezogen. In der Arbeit sind die ersten Ergebnisse, Vergleiche, Probleme zusammengefasst worden.

1 Introduction

Spectral libraries play significant role in archiving spectral information. The documentation of spectral signatures has different tradition, structure and aims. Even the signatures self have their unique history and origin depending on data collection methods or techniques. Experiences from practice have shown that the use of external spectral libraries often led to disappointments when spectral matching was implemented. It is a well known problem and the solution is more complex than only developing standards but at proper levels of the spectral data archives directives are needed (PRICE 1994, 1998). To completely fulfill this demand is behind the scope of our work as well, but to call attention to specific and critical points of the library processing chain is of interest for all of us. The theory of an appropriate measurement with its geometrical, radiometrical and technical aspects has been widely investigated and has a long history. Recent tendencies have shown that the number of field spectrometers is growing and in some segments of the market prices have decreased. However this fact is of high importance for the spectral libraries and directly affects the quality of the spectrum and throughout the usability and comparability of the spectral products. But less attention has been paid to see and monitor the practical reality of the spectral measurements and their consequences. An initiative called White Reference Tour 2010 was started by the German Society for Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation in close cooperation with the Martin-Luther University Halle-Wittenberg (MLU). This paper shows the concept and the very first results of the reference round-robin test.

2 Motivation

To analyze and compare spectral products of commercial spectrometers using the same reference targets was the central scope of our research. Spectra before entering the spectral library were analyzed. This part of the signal life-cycle is essential for any later application. Even the best meta-data structure can not substitute or compensate a low quality spectrum. The spectral library is as good as its spectra and data structure. This approach focuses on the usability and inter-compatibility of the spectra and less on the radiometrical, geometrical or technical properties of the devices and measurements. At this point it is to note that the development of a new meta-data structure or best practice to archive spectral data, was not our intension and a technical inter-comparison or inter-calibration of the spectrometers was also not the object of this work.

3 Methods

3.1 Reference targets and samples

Three calibrated reference targets (see Fig. 1; 1,2,3) and two material samples (see Fig. 1; 4,5) were measured in the experiment. The calibrated ones had 5 %, 20 % and 90 % absolute reflectance and the samples were; one smooth grey panel and one chlorite mineral.

The hemispherical spectral reflectance was measured for the calibrated reference targets. The calibration was performed with a standard from U.S. National Institute of Standards and Technology (NIST), serial number 2044a-01-15. The reflectance was determined by using a Perkin-Elmer Lambda 19 UV-VIS-NIR spectrometer (serial# 1260) equipped with a 150 mm PTFE sphere (certified by National Metrology Institute (PTB) Braunschweig, Germany, Calibration PTB 4.52-0208). The random uncertainty for the reference targets were 0.006 for 250-400 nm, 0.005 for 400-1100 nm, 0.006 for 1100-2200 and 0.010 for 2200-2500 nm. The size of the reference panels was 20x20 cm. The calibrated targets and the calibration were provided and maintained by SphereOptics Ltd. Germany.

The smooth grey panel represents moderate reflectance properties in the visible spectral range and very characteristic features in the NIR and SWIR. Its size was 20x20 cm. The sample was courtesy of the Remote Sensing and GIS Laboratory at the Tel-Aviv University.

The chlorite sample with a size of 5x5 cm was an ideal mineral for a spectrometric round-robin test because it is hard-wearing and shows absorption peaks and stand-alone features throughout the spectrum of 400-2500 nm. This consideration was of high importance for spectrometers with a sensing capability of up to 1000 nm. The second reason to choose this sample was its size. This precondition (5x5 cm) challenged the participants to use individual background materials which strongly affected the final outcome and enriched the experiment with valuable information. The mineral was courtesy of the Institute of Geosciences at the MLU.

The schematic illustration of the targets with spectrometer in the laboratory (Targets and samples were enlarged for illustration purposes) can be seen in Fig.1.

1) András Jung, Christian Götze, Cornelia Gläßer, Martin-Luther Universität, Institut für Geowissenschaften, Von-Seckendorff-Platz 4, 06120 Halle; E-Mail: andras.jung@geo.uni-halle.de, christian.goetze@geo.uni-halle.de, cornelia.glaesser@geo.uni-halle.de

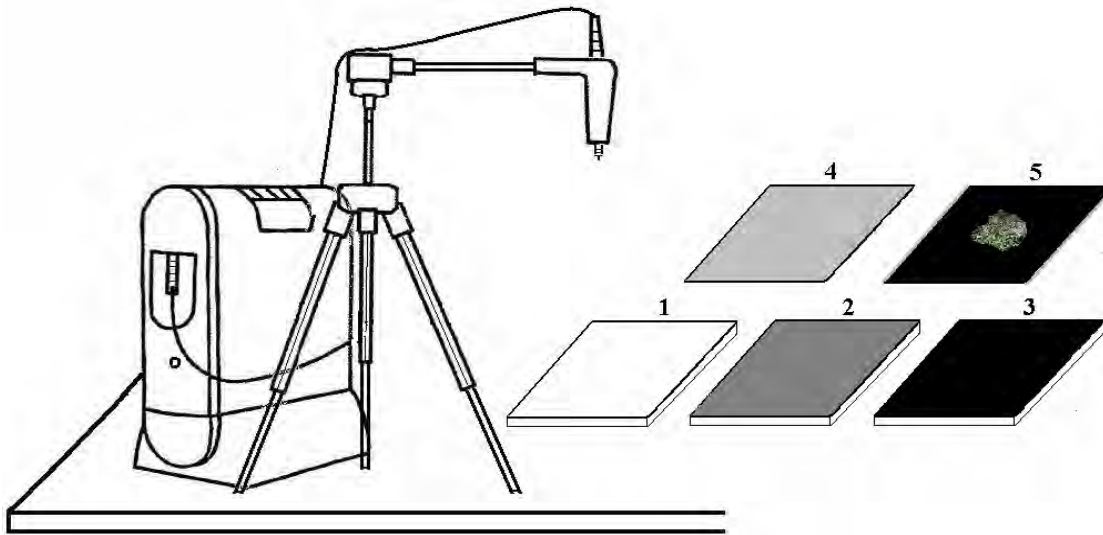


Fig. 1: Schematic illustration of the targets with a spectrometer in the laboratory (targets and samples were enlarged for illustration purposes)

3.2 The Round-Robin Approach

The panels and samples introduced above were carefully prepared and gripped in a box which was sent to a participant by post. By a web-based time schedule system every attendant was asked to declare his most preferred period of time. A period consisted of seven days included shipping, preparing, measuring and forwarding with a build-in buffer of two days.

A print-out manual and a set-up protocol assisted the successful documentation of the measurement. The manual informed and guided the operator on how to structure and label the spectra. The protocol contained details on different aspects of the set-up. The illumination parameters, human factors or other technical parameters were not predetermined but the participants had to fill out the set-up protocol. This protocol contains parameters for the lamp, geometry of the set-up, details for calibration and other parameters. The descriptive documents could optionally be supplemented with photos or other visual media. All the recorded spectral signals and the protocol were sent to the coordinator of the project via email. The box was sent to the next participant after having finished the measurement.

3.3 The set-up philosophy

Only those primary data were important to record which could not directly be derived from the spectra. Simplicity was of interest because the experiment had a voluntary basis and limited time frames. To consider and document all scientific aspects of a measurement would have been over the capacities (both the project and the participants) and would have refocused the original scopes as well.

For the sake of simplification and other influencing factors (changing weather conditions, quick accessibility of field sides, seasonal changes etc.) the laboratory seemed to be the most stable and

suitable place for the measurements. Most of the participants had a sophisticated laboratory with long-term experiences and professional infrastructure. They shortly became familiar with the concept and philosophy of the experiment. The philosophy was “just measure as you always do!” It was of high relevance during the round-robin test to reflect and document the reality of the spectrometric laboratory measurements without any preliminary technical instructions but with the same panels.

3.4 The participants

In the following table can be seen which institutions took part in 2009. The table contains the name of institutions, the head of the departments and the operative coordinators of the experiment.

Tab. 1: List of participants of the White Reference Tour in 2009

Institution	Head of department	Project partner
Foundation Alfred-Wegener Institute for Polar- and Marine Research (AWI)	Prof. Dr. Peter Lemke	Dipl. Umweltw. Christina Mehrstens
Friedrich-Schiller-University of Jena (FSU)	Prof. Dr. Christiane Schullius	Dr. Sören Hese
German Research Centre for Geosciences Potsdam (GFZ)	Prof. Dr. Hermann Kaufmann	Dipl. Geogr. Daniel Spengler
Helmholtz Centre for Environmental Research – (UFZ)	Prof. Dr. Ralf Seppelt	Dr. Angela Lausch
Humboldt University of Berlin (HUB)	Prof. Dr. Patrick Hostert	Dr. Sebastian van der Linden
Ludwig Maximilian University of Munich (LMU)	Prof. Dr. Wolfram Mauser	Dr. Tobias Hank
Martin Luther University Halle-Wittenberg (MLU)	Prof. Dr. Cornelia Gläßer	Dr. András Jung
SphereOptics GmbH Uhldingen	Dr. Wolfgang Böhme	Dipl. Ing. Christina Böhme
Tec5 AG Oberursel	Dipl. Ing. Steffen Piecha	Dipl. Ing. Elke Kirchner
Technical University of Berlin (TUB)	Prof. Dr. Birgit Kleinschmit	Dr. Michael Förster
The University of Bonn (RWFUB)	Prof. Dr. Gunter Menz Prof. Dr. Sebastian Schmidlein	Dr. Jonas Franke Dipl. Geoökol. Hannes Feilhauer
University of Göttingen (GAU)	Prof. Dr. Martin Kappas	Dr. Stefan Erasmi
University of Kassel (UKW)	Prof. Dr. Michael Wachendorf	Dr. Daniela Perbandt Dr. Thomas Fricke
Guest Institutions	Head of department	Project partner
Ben-Gurion University of the Negev (BGU)	Prof. Dr. Arnon Karnieli	Dr. Tamir Caras
Tel Aviv University (TAU)	Prof. Dr. Eyal Ben-Dor	Dr. Agustin Pimstein

3.5 The workflow

The reference targets and especially their spectra provide valuable details on the individual measurements. This information is the most sensible and precious in this investigation. In Fig. 2 is depicted how the data flow was organized and what kind of spectral information was considered for the conclusions.

The white reference measurement was taken from the calibrated white panel (90 % reflectance) and this became the reference for all targets and samples. Every spectral sampling was repeated four times over the same target and saved separately. Before reflectance values were generated the raw data or digital counts were also saved. The normalized reflectance factors were calculated and analyzed in this paper. MILTON et al. (2009) wrote that reflectance data will

remain a convenient way to represent the energy interactions occurring at the surface, and they have value in generic spectral libraries. This approach was accepted and followed in this work and used for further analyses. It is important to note that the real quantity acquired by the used spectrometers is the reflectance factor. The term reflectance factor was used which the ratio of the radiant flux is reflected by a target to that reflected into the same reflected-beam geometry by an ideal and diffuse standard surface, irradiated under the same conditions (NICODEMUS et al. 1977).

Every test spectrometer collected 40 spectra plus 8 spectra for individual backgrounds. When chlorite was being measured the size of the sample was often less than the field of view of the spectrometer and a spectrum-neutral background was needed to find. This was of high important to understand anomalies between the chlorite reflectance factor values (see Fig. 4).

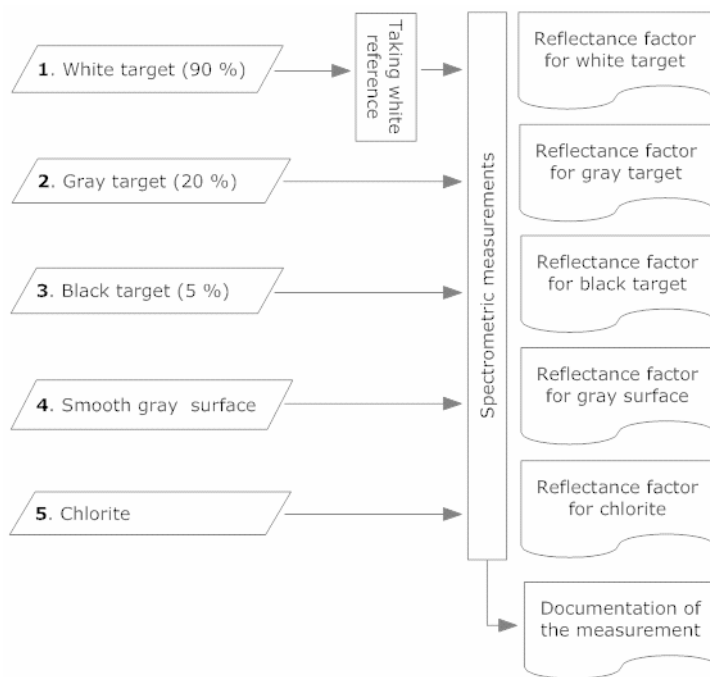


Fig.2: Measurement workflow with the spectral outcomes

3.6 Spectrometers

Spectrometers with different spectral resolution, working and scientific history were involved into the experiment. All of them were commercially available devices and spectral library producers. In Fig. 3 is depicted which spectrometers were involved and used during the tour.

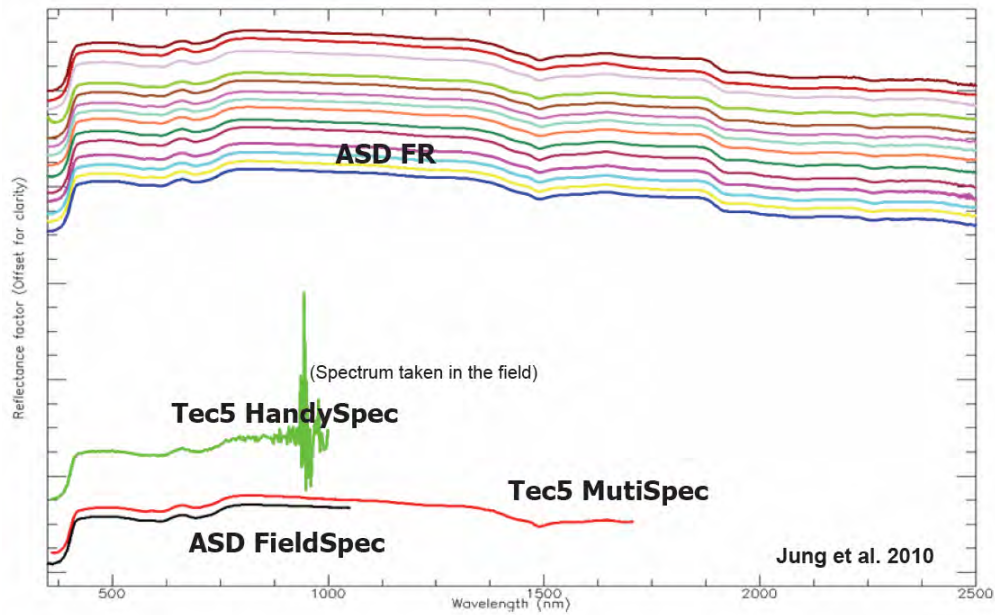


Fig. 3: Spectrometers used in the experiment

4 Results

The first results show that the measurements are very individual and there are different attitudes and traditions in our spectroscopy laboratories. The equipments and infrastructures are alternating and operating at varying levels. There are no uniform preferences for using materials in the laboratory even not for backgrounds.

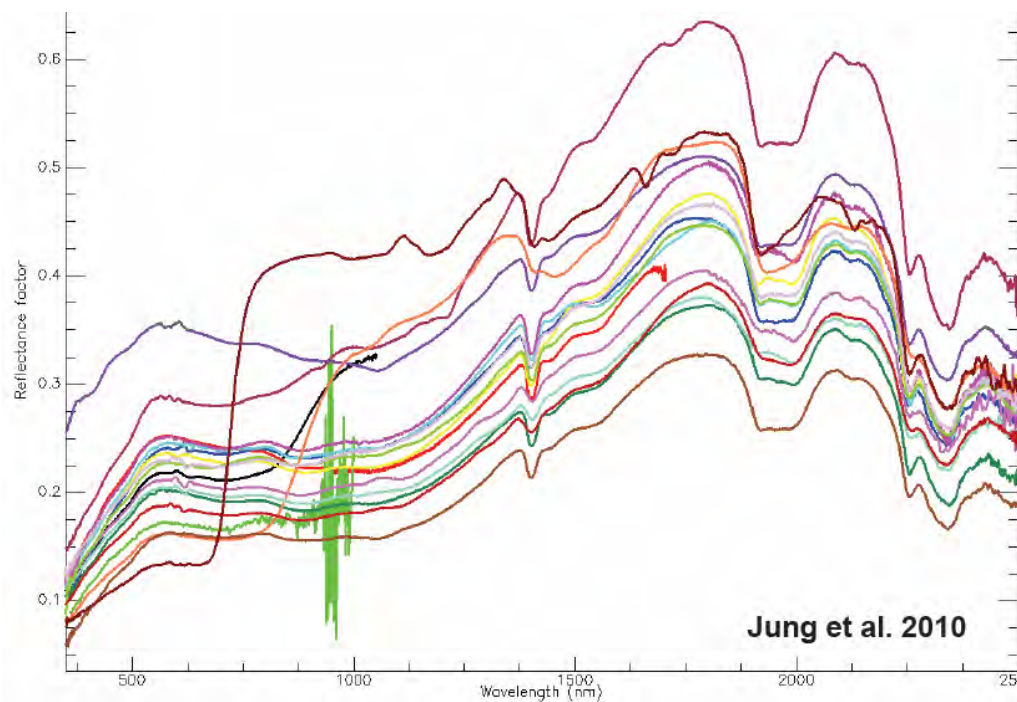


Fig. 4: Reflectance factors for the sample chlorite and the effect of background materials

In Fig. 4 all of the used spectrometers which captured the sample chlorite can be seen. At this example can be recognized that background materials play significant role when they are not chosen carefully. This Fig. 4 is just one example of the challenging questions of current measurement practices. By now it became evident that more communication is needed between spectroscopy labs (both horizontal and vertical). For new comers is training very important. There are many good recommendations for best practices but no standards or widely accepted protocols are used. The data base contains more information than shown in this paper but before the entire data analysis will take place and published cross-checking, traceability and publishing preferences must be cleared.

5 Acknowledgement

I am very thankful to all colleagues who took part in this project (see Tab. 1). Without their help, support and engagement this initiative would not have been possible to start and complete.

6 Literature

MILTON, E. J., SCHAEPMAN, M.E., ANDERSON K., KNEUBÜHLER M.& FOX N., 2009: Progress in field spectroscopy. *Remote Sensing of Environment*, **113**, S. 92-109.

NICODEMUS, F.E., RICHMOND, J.C., HSIA, J.J., GINSBERG, I.W. & LIMPERIS T., 1977: Geometrical Considerations and Nomenclature for Reflectance. National Bureau of Standards (U.S.),

PRICE, J. C., 1994: How unique are spectral signatures? *Remote Sensing of Environment*, **49**, S. 181-186.

PRICE, J.C., 1998: An approach for analysis of reflectance spectra. *Remote Sensing of Environment*, **64** (3), S. 316-330.

Einsatz von Reflexionsspektrometrie und HyMap-Daten zur Erfassung geochemischer Parameter in der Bergbaufolgelandschaft bei Teutschenthal (westl. v. Halle/Saale)

MICHAEL DENK*, CORNELIA GLÄßER*, ANDRÁS JUNG* & CHRISTIAN GÖTZE*

Das Bild der Tagebaufolgelandschaft bei Teutschenthal und das Prozessgeschehen vor Ort sind maßgeblich geprägt durch den ehemaligen Abbau von Braunkohle und die Aufhaltung von Rückständen des Kalisalzabbaus. An der großen Salzhalde erfolgen witterungsabhängig kurzfristige Wechsel von Ablaugungs- und Rekristallisationsprozessen und dynamische Änderungen von Mineralphasen. Abgelaugtes Haldenmaterial tritt zudem als hochkonzentrierte Sole in einer Niederung nördlich der Halde zu Tage, wo aus den salinen Wässern ganzjährig stabile und saisonal variable mineralische Neubildungen auskristallisieren. Die spektrale Identifizierbarkeit der vorkommenden Minerale wurde an feldfrischen, luftgetrockneten sowie pulverisierten Proben überprüft und Einflüsse von Korngröße, Feuchtigkeit und Eisengehalt auf die Spektren untersucht. Die flächendeckende Klassifikation der Minerale erfolgte unter Einsatz von HyMap-Daten.

1 Einleitung

Teutschenthal (Ortsteil Bahnhof) befindet sich im südlichen Sachsen-Anhalt und liegt ca. 15 km westlich der Stadt Halle (Saale) sowie etwa 20 km westlich von Eisleben. Nach Norden hin wird die Bergbaufolgelandschaft Teutschenthals von der Bundesstraße 80 und der Ortschaft Langenbogen begrenzt. Nach Westen grenzt das Gebiet an das am ehemaligen Ufer des Salzigen Sees gelegene Wansleben am See. Die Gesamtfläche der Bergbaufolgelandschaft bei Teutschenthal-Bahnhof umfasst ca. 10 km².

Bis 1910 erfolgte im Gebiet des sogenannten Schachtberges oberirdisch und unterirdisch der Abbau von Braunkohle. Noch gegenwärtig sind rechteckige Absatzbecken und Aschehalden ehemaliger Schwelereien im Gelände auszumachen. Im Zusammenhang mit dem Braunkohleabbaugeschehen ist das Trockenfallen bzw. Trockenlegen eines ehemaligen Feuchtgebietes – der Weitzschke - zu sehen. Im Jahr 1907 begann der Abbau von Kalisalzen durch das Kaliwerk Krügershall. Bis 1982 erfolgte der Abbau von Zechsteinsalz und die Aufhaltung anfallender Abbau- und Verarbeitungsrückstände auf zwei unterschiedlich großen Halden. Die westliche Kalihalde wurde dabei direkt im Bereich der ehemaligen „Königlichen Braunkohlegrube Langenbogen“ auf Rückständen des Altbergbaus aufgeschüttet. Über einen unterirdisch verlaufenden Stollen wurden Halden-Sickerwässer nach Norden hin in die Weitzschke-Niederung abgeführt, wo sie über einen Graben weiter Richtung Norden in die Salza

* Michael Denk, Prof. Dr. Cornelia Gläßer, Dr. András Jung, Dipl. Geogr. Christian Götze
Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Institut für Geowissenschaften,
Fachgebiet Geofernerkundung und Kartographie, Von-Seckendorff-Platz 4, D-06120 Halle,
E-Mail: michael.denk@student.uni-halle.de, cornelia.glaesser@geo.uni-halle.de,
andras.jung@geo.uni-halle.de, christian.goetze@geo.uni-halle.de

gelangten. Durch Auskristallisation von Mineralen aus den stark salzhaltigen Wässern setzte sich diese Rösche jedoch im Laufe der Jahre zu, so dass sich die salinen Wässer weiter ausbreiteten. Neben dem Abbau von Kohle und Salz wurde auch Ton westlich und südwestlich der Weitzscheniederung durch den VEB Ziegelwerke Wansleben bis in die 80er Jahre hinein abgebaut (JOHN 2000, OELKE 2002, Koch et al. 2002).



Abb. 1: Schrägluftbild der Bergbaufolgelandschaft bei Teutschenthal (Quelle: SHS GmbH 2009)

2 Problemstellung

Der Abbau von Braunkohle und die mit dem Abbau von Kalisalzen verbundene Aufhaltung von Rückständen der Salzgewinnung führen in der Bergbaufolgelandschaft bei Teutschenthal zum gleichzeitigen Auftreten zweier charakteristischer Folgeerscheinungen des Bergbaus:

a) Der Stoffaustrag durch Ablaugung der westlichen Kalirückstandshalde führt zum Eintrag hoher Stofffrachten in benachbarte Umweltkompartimente mit der Folge der Versalzung von Böden, Sedimenten und Gewässern sowie der Bildung von Sekundärmineralen. Im Outflowbereich der Halde, der Weitzschke-Niederung, ist auf diese Weise eine Binnensalzstelle entstanden (JOHN 2000, RICHTER 2001, KOCH et al. 2002).

b) Durch die Oxidation von Pyrit in den aufgeschlossenen tertiären Sedimenten kommt es zu dem als Acid Mine Drainage bekannten Problem der Versauerung von Sedimenten und Böden, vor allem aber Gewässern und der Mobilisierung des ehemals reduzierten und sulfidisch gebundenen Eisens sowie dessen Eintrag in die Umwelt (RICHTER 2001, KOCH et al. 2002).

Die dynamischen Prozesse an der westlichen Kalihalde in Teutschenthal und insbesondere die geochemischen Vorgänge und mineralogischen Bildungen in der Weitzschke-Niederung wurden bereits von RICHTER (2001) und KOCH et al. (2002) diskutiert. Ebenso die dynamischen Mineralphasenänderungen an der Haldenoberfläche (AREF et al. 2004).

Erste reflexionsspektrometrische Messungen erfolgten durch GIERTH (2006) und HEIM et al. (2008). Insbesondere B. HEIM setzte sich mit der spektralen Identifizierbarkeit verschiedener gipshaltiger Substrate und Oberflächen auseinander. Ziel dieser Arbeit ist es, in Anlehnung an die Arbeiten von GIERTH (2006) und HEIM et al. (2008) die spektralen Signaturen der im Untersuchungsgebiet auftretenden dominanten mineralischen Bildungen auf Basis reflexionsspektrometrischer Messungen zu erfassen, die Identifizierbarkeit der Mineralphasen durch den Vergleich von gemessenen Spektren mit Referenzspektren zu überprüfen und den Einfluss verschiedener Parameter (Feuchte, Oberflächenbeschaffenheit und Eisengehalt) auf das

Reflexionsspektrum zu ermitteln. Anschließend sollen die aus den punktuellen Beprobungen gewonnenen Spektren auf die Daten des abbildenden Spektrometers HyMap angewendet werden, um erstmals eine flächendeckende Klassifikation der vorkommenden Minerale im Untersuchungsgebiet zu erzeugen und deren räumliche Verbreitung zu erfassen.



Abb. 2: Sinterterassen aus Gips mit beginnender Ausfällung von Halit und Epsomit. Weiztschke-Niederung im August 2009 (Foto: D. Schwefel 2009).

3 Methodik

Die Bestimmung der Mineralphasen der entnommenen Proben erfolgte mittels Röntgenpulverdiffraktometrie und wurde von Prof. Pöllmann und Herrn Dr. Witzke (Fachgebiet Mineralogie und Geochemie des Instituts für Geowissenschaften, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg) veranlasst. Die Auswertung der Diffraktogramme erfolgte ebenfalls durch Prof. Pöllmann und Herrn Dr. Witzke. An- und Kationenanalysen zur Ermittlung der Stoffkonzentrationen erfolgten im hauseigenen, geökologischen Labor.

Die reflexionsspektrometrischen Feld- und Labormessungen wurden mit einem FieldSpec® Pro von ASD (Analytical Spectral Devices, 350 – 2500 nm) durchgeführt. Als Weiß-Standard dienten Spectralon®-Platten. Beprobungen im Feld erfolgten im März, Juli und August 2009, wobei die feldspektrometrischen Messungen jahreszeitlich- und witterungsbedingt nur im Juli und August, nicht aber im März durchgeführt werden konnten. Neben den im Feld durchgeführten Spektralmessungen wurden entnommene Proben im Labor im feldfrischen Zustand spektrometriert. Anschließend erfolgten multitemporale Labormessungen über mehrere Wochen in mehrtägigen Abständen, um den Einfluss der geringer werdenden Feuchte auf das Spektrum zu erfassen. Die luftgetrockneten Proben wurden letztlich pulverisiert und auf verschiedene Korngrößenfraktionen gesiebt, um den Einfluss unterschiedlich starker Aggregationen auf das Reflexionsspektrum zu ermitteln. Die Spektren ausgewählter Proben

gleicher Mineralphasen und gleicher Korngrößenfraktion wurden zudem hinsichtlich ihrer Absorptionsbanden parametrisiert. Dabei standen die stark vom oxidierten Eisen beeinflussten Spektralbereiche bis ca. 1000 nm im Vordergrund. Banden bei 495 nm und 995 nm wurden hinsichtlich ihrer Breite, Tiefe und der Lage des Bandentiefpunktes ausgewertet, um den Einfluss unterschiedlicher Eisengehalte zu ermitteln.

Im August 2009 erfolgte im Rahmen der EnMap-Nutzungsvorbereitung eine HyMap-Befliegung der Bergbaufolgelandschaft bei Teutschenthal. Der aufgezeichnete Datensatz stand für die Digitale Bildverarbeitung zur Verfügung und wurde für die flächendeckende Klassifikation der Minerale genutzt. Dabei wurden die in der Software ENVI (ITT Visual Information Solutions - ITT VIS) integrierten Algorithmen Spectral Feature Fitting, Spectral Angle Mapper, Continuum Removal sowie Band Ratios genutzt. Für die Analyse und Interpretation der Spektren wurden zudem mit dem Spectral Analyst gearbeitet. Als Referenzspektren für die vergleichende Betrachtung mit den selbst aufgezeichneten Spektren diente hauptsächlich die Spektralbibliothek des USGS (CLARK et al. 2007).

4 Bisherige Ergebnisse und Ausblick

Durch die multitemporalen Geländebeprobungen konnten sowohl die verschiedenen ganzjährig stabilen als auch saisonalen mineralischen Bildungen spektral und geochemisch erfasst werden. Die sich ganzjährig in der Weitzschke-Niederung bildenden Gipse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) wurden in den dominant vorkommenden Ausprägungen (Mineralhabitus, Farbe, Korngröße/Aggregation) spektral aufgezeichnet. Allgemein betrachtet zeigte sich dabei mit zunehmender Aggregation – von Auflagen kleiner körniger Einzelkristalle bis hin zu massiven mineralischen Krusten – und mit steigender Feuchtigkeit eine Abnahme der Gesamtreflexion. Die spektrale Identifikation der Gipse in situ anhand der Feldspektren war in der Regel nur bei verhältnismäßig trockenen und feinkörnigen Substraten bzw. Oberflächen möglich. Die charakteristischen Gipsbanden, die durch Vibrationen der Wasser-Gruppen verursacht werden (CLARK 1999), werden stark von der Körnigkeit bzw. Aggregation der Oberflächen und deren Feuchtigkeit beeinflusst. Die verhältnismäßig großen Banden bei etwa 990, 1200 und 1750 nm sind in den Feldspektren zumeist sichtbar. Die charakteristischen kleineren Banden bei ca. 1450, 1490 und 1540 nm sind dagegen teilweise nur schwach ausgebildet oder gar nicht vorhanden. Ebenso gilt dies für den Bereich von ca. 2000 nm bis 2500 nm. Erst durch Trocknung der Proben werden diese spektralen Charakteristika zunehmend stärker ausgeprägt. Es zeigte sich dabei, dass die Dreifachbande zw. 1450 und 1540 nm bei allen Proben nach dem Trocknen ausgeprägt war, während der Bereich zw. 2000 und 2500 nm oftmals nur geringfügig deutlicher wurde. Erst die Pulverisierung der Proben erhöhte die spektrale Identifizierbarkeit als Gips sehr deutlich und hatte starken Einfluss auf die Ausprägung der Banden zw. 2000 und 2500 nm. Die Spektren der pulverisierten Gips-Proben ähneln den Referenzspektren der USGS Spektralbibliothek sehr stark (Abb. 3) Die Faktoren Feuchte und Körnigkeit bzw. Aggregation beeinflussen die spektrale Identifizierbarkeit in den verschiedenen Spektralbereichen daher in unterschiedlich starkem Maß. Die Gipse in der Weitzschke-Niederung zeigen neben unterschiedlicher Aggregation und Feuchtigkeit bereits optisch anhand der Farbe (transparent bis dunkelbraun) auch verschieden starken Einfluss von Eisen, das aus den tertiären Deckschichten durch Pyritoxidation mobilisiert

wird. Die vom Eisen spektral beeinflussten Bereiche liegen in den Gipsspektren bei etwa 495 nm und 995 nm. Mit zunehmendem Eisengehalt zeigen sich eine Vertiefung und Verbreiterung der Absorptionsbanden sowie eine Verschiebung des Absorptionsminimums.

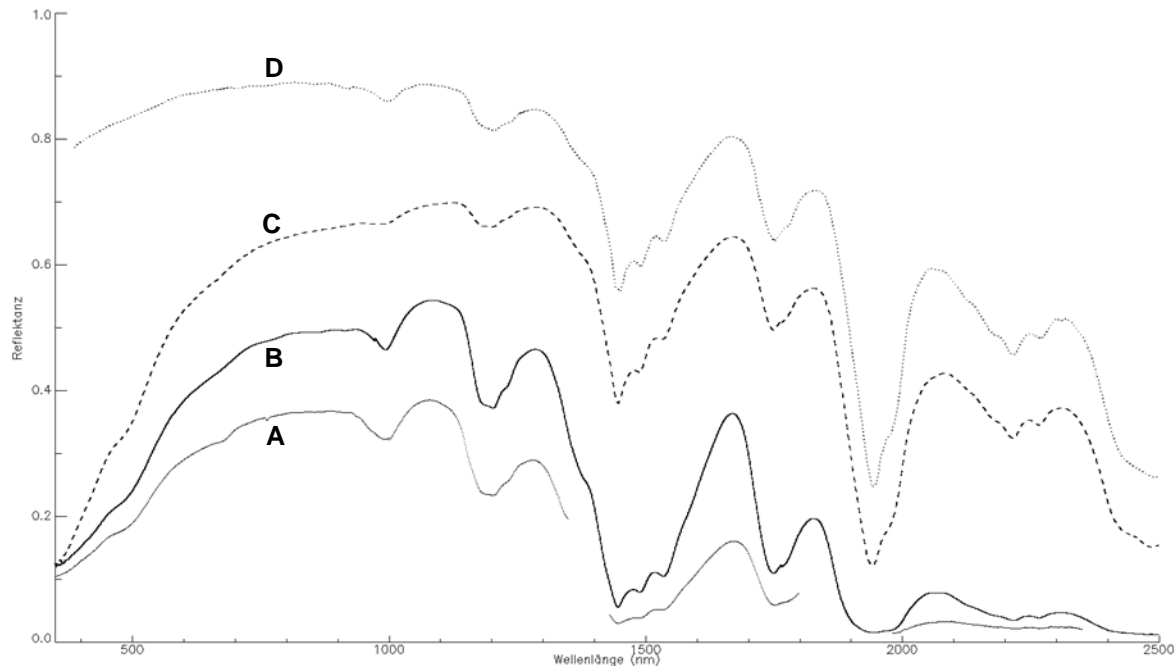


Abb. 3: Reflexionsspektren heller, körniger Gipskristalle. A Feldspektrum (die durch die atmosphärischen Wasserbanden verrauschten Bereiche wurden entfernt), B Laborspektrum nach 3 wöchiger Trocknung der Probe, C Spektrum der getrockneten und pulverisierten Probe (gesiebt auf 100-200 μm), D USGS Spektrum Gypsum SU2202 (CLARK et al. 2007).

Neben den ganzjährig ausfallenden Gipsen konnte auch die spektrale Identifizierbarkeit typischer Winter- und Sommerbildungen überprüft werden. Die in den Wintermonaten gebildeten großen Kristalle von Mirabilit ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) wandeln sich unter Abgabe des Kristallwasser bei steigenden Temperaturen und abnehmender Feuchte zu Thenardit (Na_2SO_4) um. Dieser Mineralphasenwandel konnte spektral erfasst und die Verschiebung sowie Auslöschung von Absorptionsbanden dokumentiert werden. Ebenfalls spektral erfasst wurden die während der Sommermonate bei Verdunstung der salinen Wässer gebildeten Halit-Epsomit-Ausfällungen (NaCl , $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$). Weiterhin gelang es, die mineralogisch unterschiedlichen Haldensubstrate herauszustellen sowie die Bildung weißer Krusten aus Halit und Thenardit auf der Haldenoberfläche spektral aufzuzeigen.

Um gipshaltige Flächen im HyMap-Datensatz zu klassifizieren erwies sich besonders das Spectral Feature Fitting als geeignet (Abb. 4). Dabei wurden keine vollständigen Feldspektren als Endmember verwendet, sondern lediglich der Wellenlängenbereich von etwa 1515 nm bis 1760 nm. In diesem Wellenlängenintervall weisen Gipse einen besonders starken spektralen Kontrast zu anderen Objektklassen auf. Dieser Hintergrund erklärt auch die guten Ergebnisse beim Einsatz von Band Ratios in diesem Spektralbereich ($\sim 1714 \text{ nm}/1739 \text{ nm}$). Die Verwendung des Spectral Angle Mappers zeigte besonders gute Ergebnisse bei der Klassifikation des Haldenmaterials. Der Algorithmus ist verhältnismäßig unempfindlich gegenüber relativen

Reflexionsunterschieden und damit für den Einsatz an der konisch zulaufenden Halde mit den morphologisch bedingten Beleuchtungsvariationen gut geeignet.

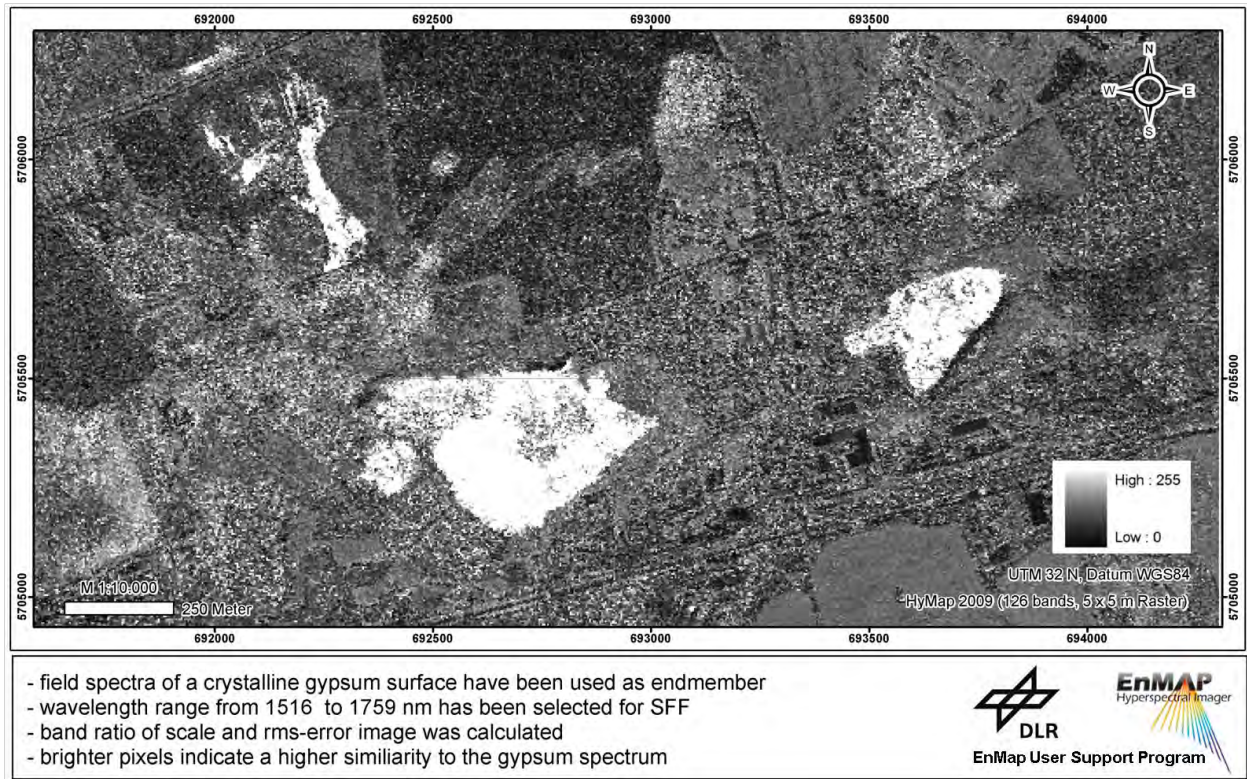


Abb. 4: Klassifikation von HyMap-Daten mittels Spectral Feature Fitting zur Ausweisung gipshaltiger Flächen in der Bergbaufolgelandschaft bei Teutschenthal. Als Endmember diente ein auf die 126 HyMap-Kanäle angepasstes Feldspektrum (Wellenlängenbereich 1516 – 1759 nm). Weiße Bildbereiche bedeuten eine hohe Ähnlichkeit der Pixelspektren zum Endmemberspektrum (Gips). Gut erfasst wurden die westliche und östliche Kalihalde, ein verlandetes Absatzbecken mit stark gipshaltigen Substraten am südwestlichen Fuß der Westhalde sowie die in der Weitzschke-Niederung auskristallisierenden Gipse.

Ein mögliches Forschungsfeld für zukünftige Arbeiten kann zum Beispiel die spektrale Erfassung von charakteristischen, im Zusammenhang mit dem Acid Mine Drainage auftretenden Eisenoxiden und Eisenhydroxiden darstellen, da dies bis zum gegenwärtigen Zeitpunkt im Untersuchungsgebiet noch weitestgehend unbekannt ist. Das Vorhandensein von HyMap-Datensätzen aus dem Jahren 2003, 2008 und 2009 erlaubt zudem Change-Detection-Analysen zur Erfassung der räumlich-zeitlichen Variationen im Untersuchungsgebiet. Weiterhin könnte ein Fokus auf vertiefenden quantitativ-stofflichen Analysen liegen.

5 Literaturverzeichnis

- AREF M. M. A., BACHMANN, G. H. und GÖSKE, J. (2004): Variable evaporite minerals in sabkha-like settings associated with potash dumps, Central Germany.– 6th International Conference on Geochemistry, Alexandria 2004, Abstracts Volume, S. 55–57.
- CLARK, R. N., SWAYZE, G. A., WISE, R., LIVO, K. E., HOEFEN, T. M., KOKALY, R. F. und SUTLEY, S. J. (2007): USGS Digital Spectral Library splib06a, U.S. Geological Survey, Data Series 231.
- CLARK, R. N. (1999): Spectroscopy of Rocks and Minerals, and Principles of Spectroscopy. In: Manual of Remote Sensing, Volume 3, Remote Sensing for the Earth Sciences, (A.N. Rencz, ed.). John Wiley and Sons, New York, S 3- 58, 1999.
- GIERTH, F. (2006): Ablaugung und Akkumulation von Bergehaldenmaterial der Grube „Deutschland“ Teutschenthal (geologische, mineralogische, spektrometrische Untersuchungen und Simulationsversuche). Diplomarbeit, Universität Leipzig, Fakultät für Physik und Geowissenschaften (unveröffl.).
- HEIM, B., GLÄBER, C., BORG, G., THOMAE, M., CHABRILLAT, S. und RICHTER, W. (2008): Spektroradiometrische Untersuchungen im GEO/BIOLabor ‘FND Salzstelle Teutschenthal-Bahnhof’ (Halle). In: Deutsche Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation (DGPF) ,Vom Erdapfel zum 3D-Modell’, Oldenburg, Deutschland, 23-26/04/2008, 6 S.
- JOHN, H. (2000): Zur Ausbreitung von Halophyten und salztoleranten Pflanzen in der Umgebung von Kali-Rückstandshalden am Beispiel des FND „Salzstelle bei Teutschenthal-Bahnhof“ (Saalkreis). In: Mitteilungen zur floristischen Kartierung in Sachsen-Anhalt. S. 175-197. Halle.
- KOCH, T., STOTTMEISTER, B. und THOMAE, M. (2002): Ein junger Geotop bei Teutschenthal. In: Hallesches Jahrb. f. Geowiss. Bd. 24, S. 105-111.
- OELKE, E. (2002): Die Anfänge der Braunkohlegewinnung in Mitteldeutschland. In: Hallesches Jahrbuch für Geowissenschaften. Bd. 24. S. 83-103.
- RICHTER, W. (2001): Salzgewinnung und Umweltbelastung. In: Hallesches Jahrb. f. Geowiss., Bd. 23, S. 137-153. Halle.

Using Laboratory and Airborne Imaging Spectroscopy to Determine Soil Organic Carbon

MICHAEL VOHLAND¹, CHRISTOPH EMMERLING², JOACHIM HILL¹ & SÖREN THIELE-BRUHN²

Summary: In this study, soil samples (n=74) with very variable properties were analysed in the lab with a fibre-optics spectroradiometer (ASD FieldSpec II Pro FR) to quantify the total contents of soil organic carbon (SOC). For the majority of the sampled plots (n=46), HyMap image data (that were acquired in parallel to the ground campaign) were also used to model SOC. Reflectance data were related to SOC contents by means of partial least squares regression (PLSR) and PLSR combined with a genetic algorithm (GA), the latter implemented for a selection of the most predictive spectral variables. Compared to full spectrum-PLSR, cross-validated results of GA-PLSR improved considerably, now based on a rigorously reduced number of spectral predictor variables. Accuracies obtained for both datasets were similar (FieldSpec data: $r^2 = 0.71$, mean RMSE = 0.21 ; HyMap data: $r^2 = 0.73$, mean RMSE = 0.18), but the spectral regions selected for the final regression model differed distinctly; in this respect, models scaled from lab to airborne sensor data.

Zusammenfassung: Ein Kollektiv von Bodenproben (n=74) mit sehr variablen Eigenschaften wurde in der vorliegenden Studie mit einem fiberoptischen Spektroradiometer (ASD Field Spec II Pro FR) eingemessen, um nachfolgend auf Basis der gemessenen Reflexionswerte die organischen Kohlenstoffgehalte (C_{org}) der Proben zu schätzen. Für die Mehrheit der beprobten Geländepunkte (n=46) konnten zusätzlich HyMap Bilddaten ausgewertet werden, die während der Bodenkampagne aufgenommen worden waren. Die statistische Modellbildung zwischen Reflexionswerten und C_{org} -Gehalten erfolgte mittels Partial Least Squares Regression (PLSR) und einer Kombination von PLSR mit einem Genetischen Algorithmus (GA), der der Selektion der zur Schätzung geeigneten Spektralvariablen diente. Verglichen mit PLSR ohne Variablenselektion konnte durch den Ansatz der GA-PLSR (und damit auf Basis einer stark reduzierten Anzahl von Spektralvariablen) eine deutliche Verbesserung der kreuzvalidierten Schätzergebnisse erzielt werden. Die für beide Datensätze erzielten Genauigkeiten waren ähnlich (Field Spec-Daten: $r^2 = 0,71$, mittlerer RMSE = 0,21 ; HyMap-Daten: $r^2 = 0,73$, mittlerer RMSE = 0,18); stark unterschiedlich waren jedoch, als Konsequenz aus bestehenden Skalierungseffekten zwischen Labor- und flugzeuggetragenen Sensordaten, die durch den GA ausgewählten und zur endgültigen Modellbildung genutzten Spektralbereiche.

1) Michael Vohland, Joachim Hill: Fernerkundung, Fachbereich VI Geographie/Geowissenschaften, Universität Trier, Campus II, 54286 Trier, E-Mail: vohland@uni-trier.de; hillj@uni-trier.de

2) Christoph Emmerling, Sören Thiele-Bruhn: Bodenkunde, Fachbereich VI Geographie/Geowissenschaften, Universität Trier, Campus II, 54286 Trier, E-Mail: emmerling@uni-trier.de, thiele@uni-trier.de

1 Introduction

Soil spectra can be measured with different instruments and settings. Lab spectroscopy using the visible and near-infrared domain (VIS-NIRS) is known as a rather quick method to characterise soil properties, but still requires sample preparation (e.g. collecting samples, drying, crushing). Airborne imaging spectroscopy provides a large amount of in-situ measurements, and thus may allow spatial patterns of soil variables to be reproduced without spatial interpolation. Nevertheless, airborne imaging spectroscopy has usually a lower precision level than lab spectroscopy (due to a lower signal-to-noise ratio and disturbing atmospheric influences, for example), and variable soil surface properties (moisture content, roughness, crusting) may be critical for the quantitative assessment of soil chromophores (e.g. organic matter or minerals as iron oxides or carbonates) from image data by a representative statistical model (STEVENS et al. 2008, BEN-DOR et al. 2009).

Both lab and airborne spectroscopy provide large sets of predictor variables that normally are strongly collinear and noisy, which may affect the accuracy of calibrating optically active soil variables from spectroradiometer data. To partly compensate these effects, reduction of dimensionality is a standard approach. In chemometrics, partial least squares regression (PLSR) has firmly established as a robust calibration tool, as it projects the data into a low-dimensional space (formed by a set of orthogonal latent variables). Further improvements may be achieved by selecting the most informative spectral variables instead of using the full spectrum, as features introducing only noise will rather worsen the performance of a PLSR model than improve it (YOSHIDA et al., 2001).

In this study, hyperspectral image data of the HyMapTM sensor (Integrated Spectronics, Baulkham Hills, Australia) and lab measurements with an ASD FieldSpec II Pro FR instrument (Analytical Spectral Devices, Boulder, Colorado, USA) were used to analyse soil samples for their contents of soil organic carbon (SOC). Soil samples were collected during the HyEurope 2009 campaign. In addition to full spectrum-PLSR, a genetic algorithm (GA) was combined with PLSR (GA-PLSR) to study the effects of spectral variable selection. The retrieved prediction models were compared for their accuracy and their scaling properties from lab to image data.

2 Materials

The study site is located in the Bitburger Gutland (Rhineland-Palatinate, Germany) and covers different geological substrates and agro-pedological zones with very variable soil properties (e.g. soil texture, pH, mineral composition). Soil samples were taken from the top horizon of fields (Ap, 0-10 cm depth). In total, 65 plots were sampled in a campaign between 23rd and 27th of August 2009, which represented a wide range of parent material (triassic sediments [sandstone, siltstone, limestone, dolomite, Keuper clays], conglomerates, loess) and soil types, varying from Regosol, Rendzina, Luvisols, Cambisols to Stagnosols. At each plot, a tract was defined with one central point and four further sampling points in all four cardinal directions. Approximately 6 m × 6 m were covered at each plot; all five collections per plot were pooled to one soil sample. At nine plots, additional material was sampled from the first five upper millimetres of the profile. These samples were also integrated in the following analysis (n = 74). For each plot, the

positions were tracked with a GPS.

In the laboratory, soil samples were crushed to pass a 2 mm sieve, immediately air-dried and afterwards pulverized by grinding. The pH was determined potentiometrically in a 10^{-2} M CaCl_2 solution with a glass electrode. The content of total soil organic carbon (SOC) was measured by gas chromatography after combustion at $1,100^\circ\text{C}$ using an EuroEA elemental analyser (HekaTech, Wegberg, Germany). Previously, soil samples with potentially free carbonate were pre-treated to remove carbonate-C. Briefly, 200 mg pulverized soil (dry mass) was treated with 200 ml 0.22 N HCl-solution and then suspended ($18,000 \text{ U min}^{-1}$) with an Ultra Turrax vortexer (IKA, Germany) for at least 3 minutes. NPOC (non purgeable organic carbon) equivalent to TOC (total organic carbon) from this suspension was analysed with a Shimadzu TOC-V- analyser.

An ASD FieldSpec II Pro FR fibre-optics spectroradiometer and a reflectance standard of known reflectivity (Spectralon®) were used to retrieve bidirectional reflectances of all soil samples over the $0.35\text{-}2.5 \mu\text{m}$ wavelength range with an increment of 1 nm. A 1000 W quartz-halogen lamp was used for illumination; viewing and illumination geometry were held constant for all spectroradiometric measurements (nadir view, 45° illumination zenith angle). To reduce overall spectral albedo variations and possible scattering effects that are due to residual differences of particle size distributions, a standard normal variate (SNV) correction of the spectra was performed. The SNV approach corrects each spectrum separately and does not refer to global parameters of the calibration set as a whole. Each spectrum (x_i) was corrected by:

$$x_{i,SNV} = \frac{(x_i - \bar{x})}{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}}}$$

with \bar{x} = arithmetic mean of the complete spectrum
 n = number of spectral channels

A data set of the HyMap airborne imaging sensor was acquired on the 27th of August 2009 near solar noon (solar zenith: 39.9° , solar azimuth: 180.7°). HyMap covered the wavelength range between 0.45 and $2.48 \mu\text{m}$ by 125 spectral bands with a bandwidth of approximately 16 nm; in the overflight, a ground resolution of 4 m was realized. Unfortunately, weather conditions were not the optimum during the overflight. Image product provided by DLR (German Aerospace Center, Oberpfaffenhofen) were affected by clouds and cloud shadows. Thus, it was not possible to integrate all 65, but only 46 plots in the analysis. ATCOR4 was used for atmospheric corrections of the image data, the geometric correction was performed with the PARGE™ software.

3 Methodology: GA-PLSR

PLSR combines features from principal component analysis (PCA) and multiple regression. As an extension of the classical PCA it projects the data into a low-dimensional space (i.e. a set of orthogonal latent variables) by a simultaneous decomposition of X (spectral matrix) and Y (matrix of dependent variables). The goal is that this decomposition explains as much as possible

of the covariance between X and Y. In a regression step, the decomposition of X is used to predict Y.

An important property of PLSR is its ability to handle large input spaces and to deal with noisy patterns. Although the usefulness of pre-selecting an optimum set of features instead of using the full spectrum has been controversially discussed for PLSR, a number of studies exist that document improved prediction accuracies when PLSR is combined with spectral variable selection strategies (e.g. LEARDI & GONZÁLEZ 1998, ARAÚJO et al. 2001, VISCARRA ROSSEL et al. 2009). With a large number of features it is not feasible to test all possible subsets for an optimal calibration model. Several techniques can be employed to identify a near-optimal solution. A genetic algorithm follows the strategy of a purely stochastic selection of an initial set of spectral variables, which then is optimised by considering many combinations of features and their interactions.

Genetic algorithms are inspired by evolutionary biology. In our case, the initial populations consisted of chromosomes with 2151 genes (FieldSpec data) and 125 genes (HyMap data), respectively. Each gene was formed by a single bit (binary coding, each spectral variable can be switched on or off). Chromosomes with an above-average fitness (fitness criterion: cross-validated variance explained by the PLSR model) were selected as parents. Offsprings were obtained by reproduction (cross-over method) and mutation, and the responses of the new chromosomes were evaluated with the decision to be included in the population or to be discarded. At the end of each run (with 200 evaluations), the selected variables of the fittest chromosome were identified. At the end of all runs (100 runs per cycle, and then three repetitions of the complete cycle), the total selection frequencies of the spectral variables decided on their acceptance in the final PLSR model.

4 Results & Discussion

In total, the contents of SOC ranged from 0.82 to 4.57 % (arithmetic mean = 2.13 %, median = 1.89 %). For the subset of 46 plots that were unclouded in the HyMap data, values ranged from 0.67 to 3.68 % (arithmetic mean = 1.98 %, median = 1.86 %).

With all 2151 spectral predictor variables of the complete FieldSpec spectra, PLSR provided moderately successful SOC estimates. In the calibration, the coefficient of determination (r^2) was high with 0.78, RPD (ratio of standard deviation of measured values to root mean squared error (RMSE) of prediction) was > 2.0 (Table 1). In the cross-validation, accuracies dropped to $r^2 = 0.55$ and RPD = 1.5, which at best allows the discrimination between low, medium and high values (Fig. 1). The application of the GA caused a rigorous reduction of spectral predictor variables used in the PLS regression. Only 80 spectral variables were selected instead of the original 2151 ones, 7 latent variables were extracted in the PLS approach (instead of 9, Fig. 1). Cross-validated results obtained with this relatively small number of variables in the GA-PLSR approach were notably more accurate than those of full spectrum-PLSR (Table 1, Fig. 1).

Table 1: Prediction accuracies for SOC retrieved from ASD spectroradiometer data (n=74) (a) and HyMap image data (n=46) (b) after SNV correction.

		PLSR		GA-PLSR	
		calibration	cross-validation ^a	calibration	cross-validation ^a
a)	r ²	0.78	0.55	0.79	0.71
	RMSE	0.39	0.56	0.38	0.44
	RPD	2.13	1.47	2.18	1.87
	mean RMSE ^b	0.18	0.26	0.18	0.21
b)	r ²	0.82	0.50	0.82	0.73
	RMSE	0.28	0.49	0.29	0.35
	RPD	2.39	1.37	2.32	1.92
	mean RMSE ^b	0.14	0.25	0.15	0.18

^a leave-one-out cross-validation

^b RMSE × arithmetic mean (measured values)⁻¹

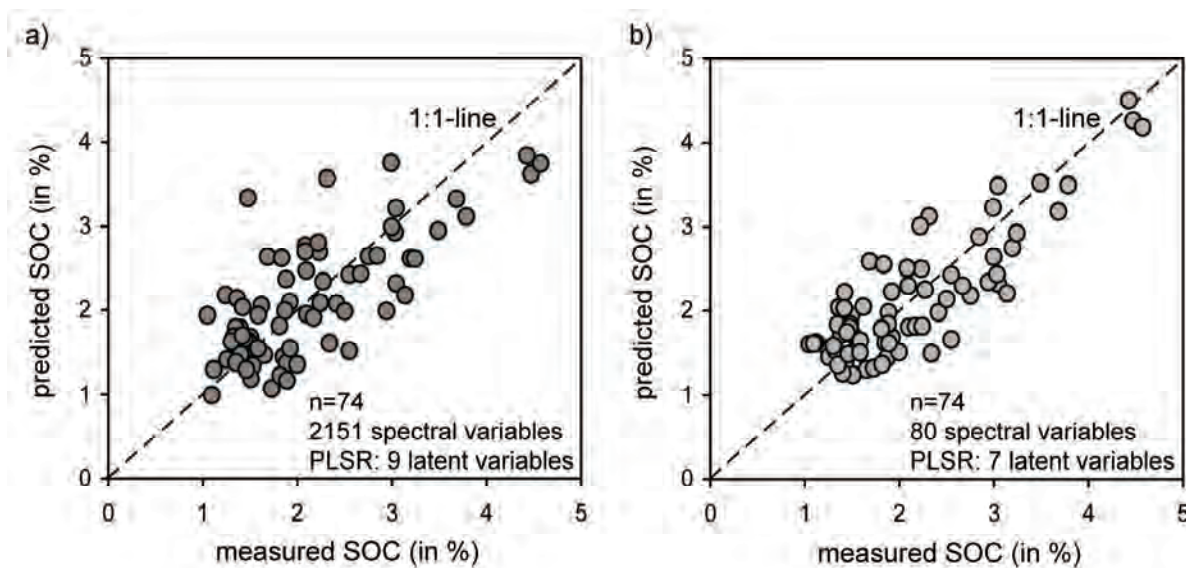


Figure 1: SOC predictions (cross-validated results) from ASD FieldSpec data using full spectrum-PLSR (a) and GA-PLSR (b).

By GA, the following spectral regions were selected as most predictive and thus included in the final PLSR model: 505-626 nm (19 variables), 1074 nm, 1412-1647 nm (12 variables), 1994-2201 nm (3 variables), 2302-2495 nm (45 variables). The following 6 spectral variables were most frequently selected in the GA runs (averaged selection frequencies ≥ 10): 2380, 2377, 2378, 2379, 2382, 2314 nm.

Precision of estimates retrieved from the HyMap Data were similar to those obtained in the lab approach. Again, the application of a GA for feature selection improved prediction accuracy considerably (Table 1, Fig. 2). In the final GA-PLSR model, only 11 of the original spectral

variables were selected, which were the following HyMap channels (central wave-lengths; descending order according to selection frequency): 2414, 2447, 1318, 762, 748, 1304, 2430, 733, 1291, 1164 and 2398 nm. Except from the wavelengths ≥ 2398 nm, there were no spectral overlaps with the GA selections on the lab spectroradiometer data.

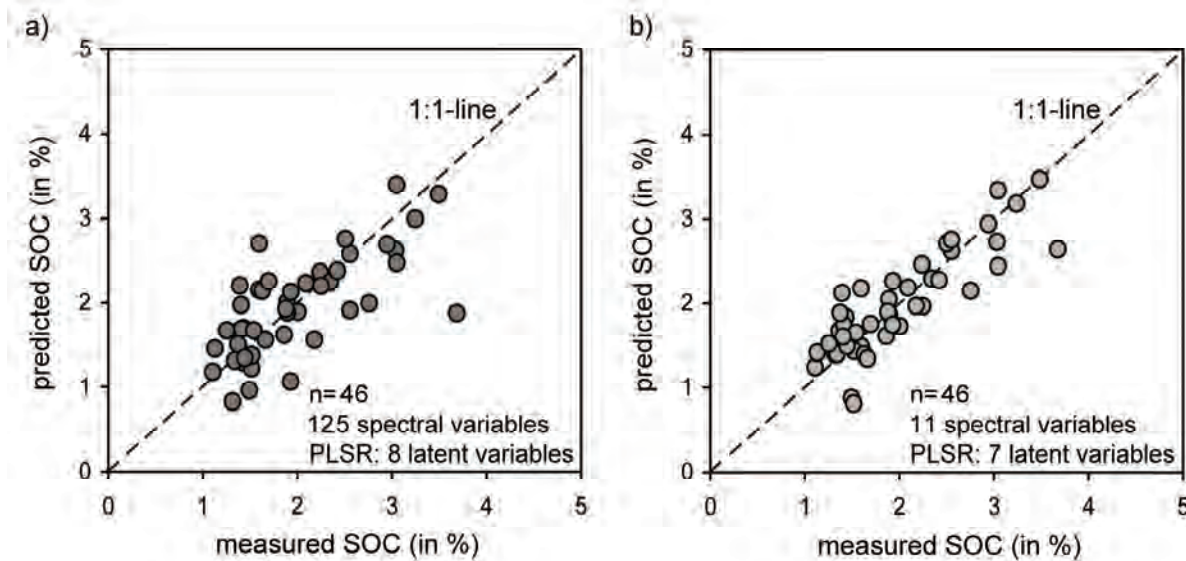


Figure 2: SOC predictions (cross-validated) from HyMap image data with full spectrum-PLSR (a) and GA-PLSR (b).

Although GA selections may not be mistaken for causal interpretations, the selections obtained in this study support the finding that the spectral influence of organic matter is not restricted to wavelengths in the visible and beginning NIR (wavelengths < 1200 nm, e.g. BOWERS & HANKS 1965), but affects the entire NIR region (BEN-DOR & BANIN 1995). BEN-DOR & BANIN (1995) stated, that the chemical complexity of organic matter makes it difficult to identify specific absorption bands and to relate them to particular wavelengths. Spectral predictive mechanisms may strongly vary depending on the decomposition stage, the nature of existing compounds, and the influence of other relevant factors like texture or soil colour (BEN-DOR & BANIN 1995, MOUAZEN et al. 2007). This variability is the main reason that researchers often tend to develop only local calibration models for each field they measure with NIR spectroscopy (MOUAZEN et al. 2007). Given the fact that the dataset studied here was pooled from very different sites, the results obtained with GA-PLSR are satisfying as they allow an approximate quantification.

5 Conclusions

- GA-PLSR was superior to stand alone-PLSR for both datasets (FieldSpec and HyMap data), as higher accuracies were obtained with GA-PLSR in the internal cross-validation of the defined prediction models. Feature selection by GA can be considered useful to extract the most predictive information from multicollinear and noisy spectra.

- The formulation of a valid SOC prediction model that covers different soil types with very variable properties (as in our study) is a challenge. Spectral prediction mechanisms may vary from one soil type to another. GA-PLSR was found helpful to provide one universal model for an at least rough SOC screening.
- Prediction models scale from laboratory spectra to airborne hyperspectral data. This point was evident from the GA approach, as the spectral overlap between GA selections from HyMap data and selections from FieldSpec data was small.

Acknowledgements

This study was financially supported by Nikolaus Koch Stiftung (Trier). We would like to thank the following people who assisted in the field work: Joachim Besold, Marco Hümman, Thomas Lanners, Marius Luig, Sebastian Mader, Christoph Müller, Oliver Schmidt.

References

- ARAÚJO, M.C.U., SALDANHA, T.C.B., GALVÃO, R.K.H., YONEYAMA, T., CHAME, H.C. & VISANI, V., 2001: The successive projections algorithm for variable selection in spectroscopic multicomponent analysis. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, **57** (2), 65–73.
- BEN-DOR, E. & BANIN, A., 1995: Near-infrared analysis as a rapid method to simultaneously evaluate several soil properties. *Soil Science Society of America Journal*, **59** (2), 364-372.
- BEN-DOR, E., CHABRILLAT, S., DEMATTÊ, J.A.M., HILL, J., WHITING, M.L. & SOMMER, S., 2009: Using imaging spectroscopy to study soil properties. *Remote Sensing of Environment*, **113** (Suppl. 1), S38-S55.
- BOWERS, S.A. & HANKS, R.J., 1965: Reflection of radiant energy from soils. *Soil Science*, **100** (2), 130-138.
- LEARDI, R. & GONZÁLEZ, A.L., 1998: Genetic algorithms applied to feature selection in PLS regression: how and when to use them. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, **41** (2), 195-207.
- MOUAZEN, A.M., MALEKI, M.R., DE BAERDEMAEKER, J. & RAMON, H., 2007: On-line measurement of some selected soil properties using a VIS-NIR sensor. *Soil & Tillage Research*, **93** (1), 13-27.
- STEVENS, A., VAN WESEMAEL, B., BARTHOLOMEUS, H., ROSILLON, D., TYCHON, B. & BEN-DOR, E., 2008: Laboratory, field and airborne spectroscopy for monitoring organic carbon content in agricultural soils. *Geoderma*, **144** (1-2), 395-404.
- VISCARRA ROSSEL, R.A. & LARK, R.M., 2009: Improved analysis and modelling of soil diffuse reflectance spectra using wavelets. *European Journal of Soil Science*, **60** (3), 453-464.
- YOSHIDO, H., LEARDI, R., FUNATSU, K. & VARMUZA, K., 2001: Feature selection by genetic algorithms for mass spectral classifiers. *Analytica Chimica Acta*, **446** (1), 485-494.

Mobiles Laser Scanning:

Technologische Fortschritte bei der Datenakquisition

**PETER RIEGER¹, NIKOLAUS STUDNICKA¹, MARTIN PFENNIGBAUER¹, GERALD ZACH¹,
ANDREAS ULLRICH¹**

Zusammenfassung: Das einzigartige Leistungsmerkmal moderner Laserscanner, die digitale Signalverarbeitung in Echtzeit („online waveform processing“), kommt bei deren Einsatz im mobilen Laser Scanning (MLS) optimal zur Anwendung. Mit 600.000 Pulslaufzeit-Entfernungsmessungen pro Sekunde ermöglicht das RIEGL VMX-250 MLS-System die Erfassung hochauflösender 3D Geodaten von hoher Genauigkeit bei üblicher Fahrgeschwindigkeit im Straßenverkehr. Mehrzielfähigkeit am neuesten Stand der Technik erlaubt es Laubwerk, Zäune und anderen Hindernisse zu durchdringen. Das Auslesen der kalibrierten relativen Reflektivität gestattet eine entfernungsunabhängige grau-kodierte Strukturierung von z.B. Fassaden und die automatische Erfassung von retroreflektierenden Verkehrszeichen, ebenso unabhängig von der Entfernung. Daten aus dem Feldeinsatz belegen die Genauigkeit der Kalibrierung und die hohe Qualität der georeferenzierten Punktwolke.

1 Einführung

Mobiles Laser Scanning (MLS) ist eine junge Technologie mit rasch wachsender Bedeutung für das gesamte Vermessungswesen. Die zügige Datenerfassung von einer beweglichen Plattform aus bietet im Vergleich zum konventionellen terrestrischen Laser Scanning (TLS) auf den verschiedenen herkömmlichen und auch neuen Anwendungsgebieten bemerkenswerte Vorteile. Laserscanner-Hersteller und Systemintegratoren sind sich des wachsenden Bedarfs an MLS-Systemen durchaus bewusst.

RIEGL trägt dem mit der Entwicklung und Markteinführung des RIEGL VMX[®]-250 MLS-Systems Rechnung, mit dem der Zeitaufwand für Integration, Inbetriebnahme und Daten-Nachbearbeitung auf ein Minimum reduziert wird. Das Gesamtsystem besteht aus zwei zueinander kalibrierten Laserscannern, einem Trägheitsnavigationssystem gekoppelt an ein globales Satellitennavigationssystem und entsprechender Software. Das VMX-250 kann mittels einer durchdachten Montagekonstruktion bequem auf jeden Dachgepäckträger montiert werden. Die in sich geschlossene Kalibrierung der einzelnen Subsysteme bleibt auch bei einer Demontage des Gesamtsystems (z.B. während des Transports) erhalten.

Es folgt ein Überblick über den Systemaufbau, die Spezifikationen und die Systemtechnik. Die angeführten Messergebnisse untermauern die erstklassige Qualität der erfassten Messdaten. Messgenauigkeit, Systemkalibrierung und Mehrzielfähigkeit werden anhand unterschiedlicher Beispieldaten analysiert.

1) alle Autoren:

RIEGL Laser Measurement Systems GmbH, 3580 Horn, Österreich, E-Mail: office@riegl.co.at

2 Beschreibung *RIEGL VMX-250*



Abb. 1: *RIEGL VMX-250* Mobile Laser Scanning System montiert am Vermessungsfahrzeug.

Das VMX-250 besteht aus zwei *RIEGL VQ-250* 2D-Laserscannern, einem inertialen Navigationssystem (INS) in Kombination mit einem globalen Satellitennavigationssystem (GNSS), welche die INS-GNSS Einheit bilden, sowie dem in einem portablen Koffer eingebauten Bordcomputer. Die INS-GNSS Einheit umfasst die Elektronik für kinematische Datenverarbeitung in Echtzeit (Real Time Kinematic, RTK) und drei Sensoren: den Sensor für das inertielle Lagemesssystem (Inertial Measurement Unit, IMU), den Radsensor (Distance Measuring Indicator, DMI) und einen GNSS Empfänger mit Antenne. Die Scanner und die INS-GNSS Einheit sind mechanisch fix aneinander gekoppelt auf bzw. in einer stabilen Montagevorrichtung befestigt, die z.B. wie in Abb. 1 dargestellt am Dachträger eines Fahrzeugs montiert wird. Ein einziges Kabel verbindet die Aufnahmeplattform mit der kompakten Steuereinheit im Auto, welche in einem Koffer Platz findet. Diese beinhaltet Stromversorgung, einen Computer mit der Software RiACQUIRE, Wechselfestplatten zur Datenspeicherung und einen handlichen Touchscreen mit einem bequemen Steuerinterface für den Bediener (Abb. 2). Beide Laserscanner werden während der Vermessung synchron betrieben und erfassen so dreidimensionale Daten mit der doppelten Messrate eines einzelnen Scanners.

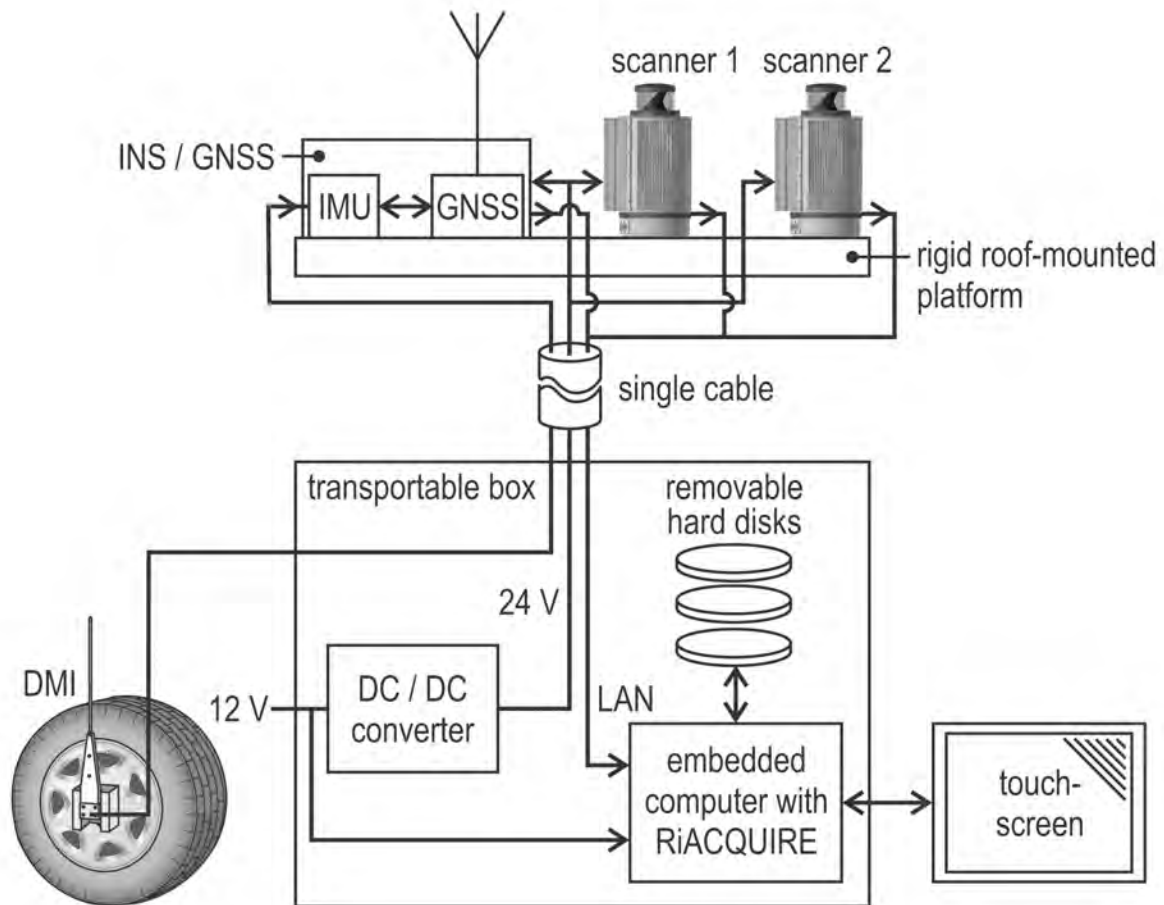


Abb. 2: Blockdiagramm *RIEGL VMX-250* Laser Scanning System.

Der „Full-Circle“ Laserscanner *RIEGL VQ-250* ist ein extrem schnelles Profilmessgerät auf Basis eines infraroten Laserstrahls mit geringem Öffnungswinkel und eines schnellen Linienscan-Mechanismus. Der mechanische Aufbau des Scanners ermöglicht eine gleichförmige und zugleich lückenlose 360-Grad-Ablenkung des Laserstrahls. Der *RIEGL VQ-250* ist kompakt und leicht, kann wahlweise stehend oder liegend und auch auf engstem Raum montiert werden. Seine Eckdaten sowie eine Abbildung sind in Tabelle 1 zu finden.

Herausragende Messleistung und ausgezeichnete Mehrzielauflösung selbst unter widrigen atmosphärischen Bedingungen werden durch die leistungsstarke Laserpuls-Laufzeitmessung, basierend auf *RIEGLs* bewährter Echosignalverarbeitungstechnologie mit Waveform-Analyse in Echtzeit erzielt.

Tab. 1: Spezifikationen *RIEGL* VQ-250 Laserscanner

 <p><i>RIEGL</i> VQ-250 Laserscanner</p>	Effektive Messrate	50 bis 300 kHz
	Max. Messreichweite	500 m @ $\rho \geq 80\%$ und 50 kHz 75 m @ $\rho \geq 10\%$ und 300 kHz
	Max. Anzahl der Ziele pro Messung	Praktisch uneingeschränkt
	Genauigkeit	10 mm
	Präzision	5 mm
	Laserklassifizierung	Laserklasse 1
	Scanwinkelbereich (einstellbar)	Bis zu 360° „Full Circle“, lückenlos
	Scangeschwindigkeit (einstellbar)	Bis zu 100 Scans/Sek.
	Gewicht	Ca. 11 kg

3 VMX-250 Technologie

3.1 „Waveform“-Datenverarbeitung in Echtzeit

Digitale Echosignalverarbeitung ist die technische Voraussetzung für „Full Waveform“-Analyse und Mehrzielfähigkeit, welche sich im Airborne Laser Scanning bereits seit einigen Jahren bewährt hat (ULLRICH 2005). Dabei werden die digitalen Echosignale während eines Fluges gespeichert und im Anschluss daran prozessiert. Obwohl dies eine differenzierte Objektklassifizierung sowie die Kalibrierung des Reflexionsgrades (BRIESE 2008) ermöglicht, ist dieser zusätzliche zeitaufwändige Arbeitsschritt bei typischen TLS-Anwendungen inakzeptabel. Für die terrestrischen, luftgestützten und mobilen Laserscanner der V-Line[®] hat *RIEGL* eine zukunftsweisende Methode der Echosignalverarbeitung in Echtzeit entwickelt. Wann immer ein möglicher Zielechopuls erkannt wird, werden die geschätzte Pulslaufzeit und Amplitude in Echtzeit ermittelt, indem die abgetasteten digitalen Signale mit gerätespezifischen Referenzpulsen verglichen werden. Das ermöglicht höchst genaue Messresultate über den gesamten Aussteuerungsbereich des Gerätes. Durch die effiziente und hardwareorientierte Implementierung von entsprechenden Algorithmen können die Scanner etwa bis zu 1,5 Millionen Entfernung- und Amplitudenmessungen pro Sekunde ausführen.

3.2 Präzision

Durch Anwendung der beschriebenen „Waveform“-Bearbeitung in Echtzeit werden Messresultate von sehr hoher Präzision, d.h. mit sehr geringem Entfernungsruschen, erzielt. Wir unterscheiden zwischen der maximalen Abweichung voneinander unabhängiger Entfernungsmessergebnisse eines einzelnen Scanners und jener des VMX-250 Systems, welches die Messungen der beiden zueinander kalibrierten Scanner miteinander kombiniert.

3.2.1 Präzision eines einzelnen Scanners bei Messung auf ebene Oberflächen

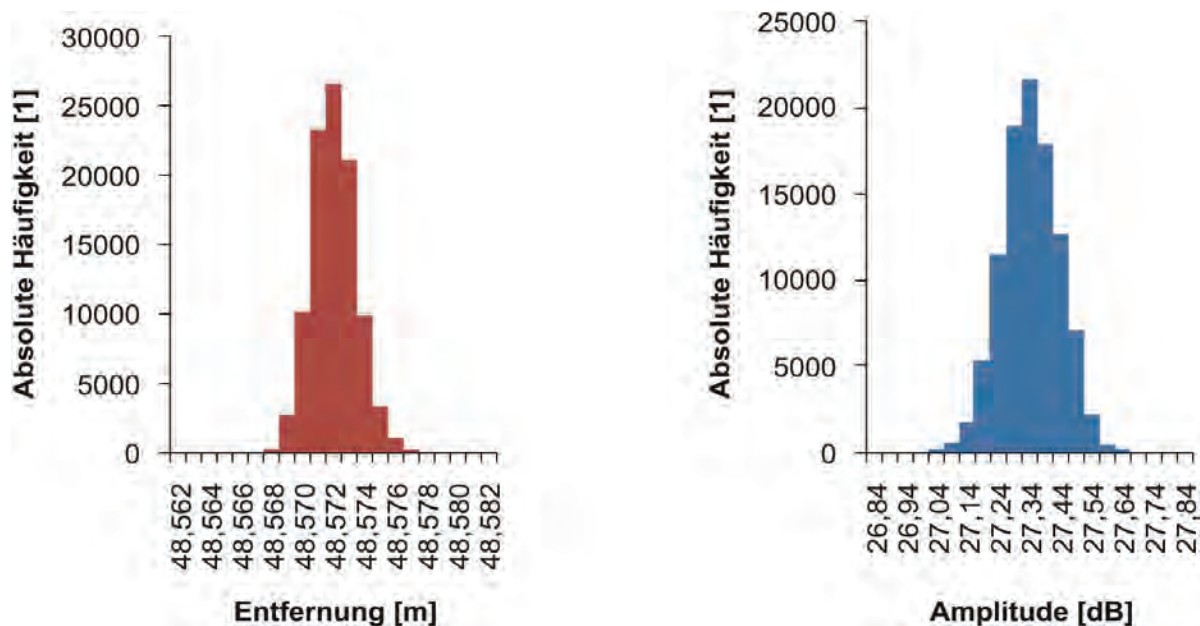


Abb. 3: Absolute Häufigkeit von Entfernungs- und Amplitudenergebnissen bei 100.000 aufeinander folgenden Messungen auf ein weißes, diffus reflektierendes Ziel in ca. 50 m Entfernung.

Um die Punkt-zu-Punkt-Wiederholgenauigkeit der Entfernungs- und Amplitudenmessung des einzelnen Laserscanners zu demonstrieren, wurde ein VQ-250 Laserscanner auf ein diffus reflektierendes Ziel in 50 m Entfernung gerichtet. 100.000 aufeinander folgende Einzelmessungen wurden aufgezeichnet und analysiert. Die Standardabweichung der Entfernungs-messungen (1-Sigma-Entfernungsrauschen) liegt bei nur 1,5 mm, wobei die Standardabweichung der Amplitudenmessungen kleiner als 0,1 dB ist. Die Gesamtentfernungsabweichung (min – max) einschließlich aller Ausreißer beträgt weniger als 20 mm, während die Gesamtamplitudenabweichung unter 1 dB liegt. Die entsprechenden Histogramme sind in Abb. 3 dargestellt.

3.2.2 Präzision des VMX-250 bei Messung auf ebene Oberflächen (einmalige Vorüberfahrt)

Abb. 4 zeigt die hohe Präzision des *RIEGL* VMX-250. Auf einer aufgespannten Werbeplane mit ca. 32 m² Fläche, welche sich in einer mittleren Entfernung von 20 m zum bewegten Scanner befand, wurden etwa 6.000 Punkte (in grün dargestellt) ermittelt. Beschreibt man die ausgewählten Punkte durch eine ebene Fläche und ermittelt die Standardabweichung der Punkte zu dieser Ebene, so ergibt sich das äußerst geringe Entfernungsrauschen von nur 1,6 mm (1-Sigma-Wert). Eine weitere statistische Analyse zeigt die Verteilung dieser Messungen über dem Reflexionsgrad (rechtes Diagramm oben) als auch der Amplitude (rechtes Diagramm unten). Da die Entfernung über den gesamten Zielbereich variiert, spiegelt auch die Amplitude des Echosignals die Entfernungsabhängigkeit der Messung im Ausmaß von rund 6 dB wider. Im

Gegensatz dazu zeigt die von der Entfernung unabhängige Reflektivität eine Abweichung von nur 3 dB. Diese verbleibende Abweichung der Messwerte ist daher im Wesentlichen auf die tatsächlichen Bereiche unterschiedlicher Reflektivität des Zieles selbst zurückzuführen.

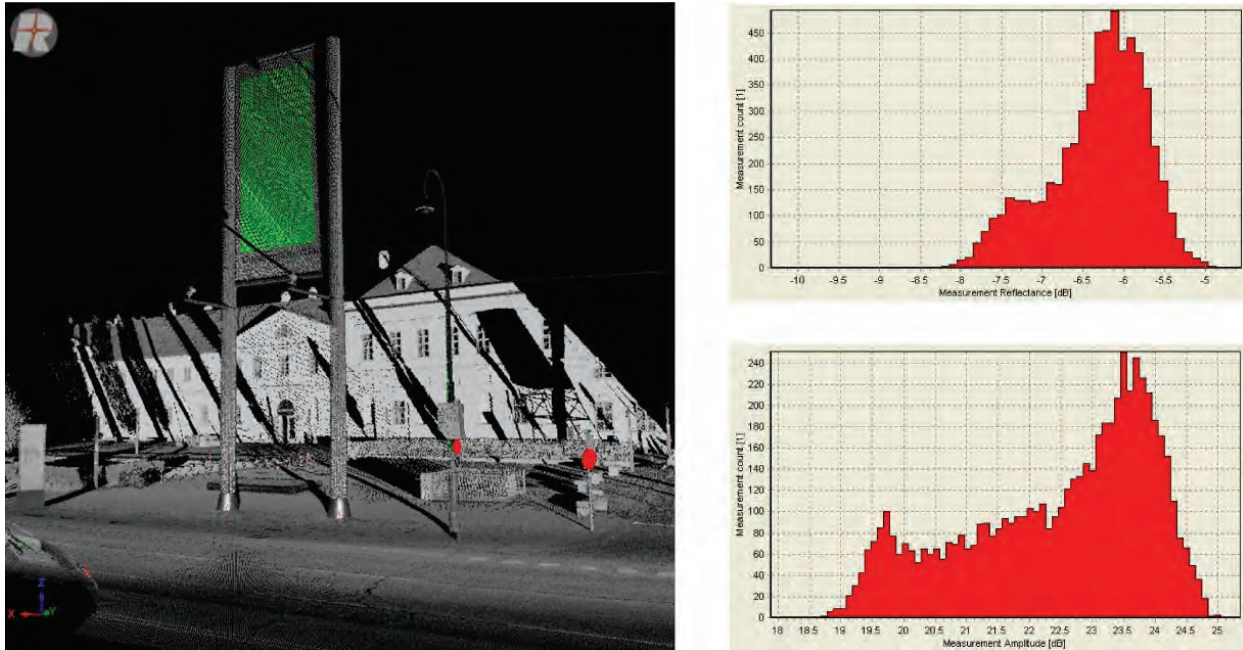


Abb. 4: Links: VMX-250 Punktwolke mit Helligkeitsdarstellung entsprechend der Reflektivität. Grün eingefärbte Punkte sind ausgewählte Punkte, rote Punkte markieren Reflexionsgrade größer als +5 dB. Rechts: Absolute Häufigkeit der ausgewählten Punkte aufgetragen über der Reflektivität (rechts oben) bzw. Amplitude des Echosignals (rechts unten).

3.3 Kalibrierte Amplitude und relativer Reflexionsgrad

Informationen über die Amplitude des Echosignals werden vom Scanner üblicherweise gemeinsam mit jeder Entfernungsmessung bereitgestellt, jedoch wird diese Information normalerweise nicht als Basis für die Ermittlung der tatsächlichen optischen Echopulsamplitude verwendet. Deshalb ist eine zuverlässige Objektklassifizierung und Kalibrierung des Reflexionsgrads nicht einfach zu bewerkstelligen und muss mittels Nachbearbeitung der Daten unter Verwendung von Reflexionsnormalen durchgeführt werden (BRIESE 2008).

Diese Aspekte werden bei den Laserscannern der *RIEGL* V-Line auf elegante Weise berücksichtigt. Sie verfügen über eine streng proportionale Amplitudenausgabe zu einem fixen gerätespezifischen Leistungspegel des Echosignals, wie z.B. der Detektionsgrenze des Gerätes. Für diesen Zweck hat *RIEGL* die ausgelesene Amplitude präzise kalibriert, so dass mit

$$A_{dB} = 10 \cdot \log \left(\frac{P_{echo}}{P_{DL}} \right) \quad (1)$$

für jede Messung eine Amplitude A_{dB} in dB über den gesamten Aussteuerbereich des Gerätes, bezogen auf das Detektionslimit angegeben werden kann. Dabei ist P_{echo} die optische

Spitzenleistung des Echopulses der entsprechenden Messung und P_{DL} die kleinste detektierbare optische Spitzenleistung.

Da diese kalibrierte Amplitude aber auch der grundlegenden Entfernungsabhängigkeit des vom Empfänger erkannten Echosignals unterliegt, ist die Interpretation der Scandaten besonders bei der Kombination von Daten verschiedener Laserscanner und Scanpositionen schwierig. Durch Bestimmung der Entfernungsabhängigkeit der Amplitude anhand einer Normreflektivität $A_{db,ref}$ und durch Vergleich der Echosignalamplituden mit dieser Kurve kann dem Anwender die Kennziffer ρ_{rel} zur Verfügung gestellt werden. Diese repräsentiert den „relativen Reflexionsgrad“, welcher proportional zum logarithmischen Verhältnis des tatsächlichen Reflexionsgrades der Zielfläche und eines rein weißen diffusen Reflektors ist

$$\rho_{rel} = A_{dB} - A_{dB,Ref}(R) \quad (2)$$

Der relative Reflexionsgrad ist somit ein Maß für den absoluten Reflexionsgrad eines Ziels in Bezug auf den Reflexionsgrad des Zieles mit welchem das Gerät kalibriert wurde, nämlich einem standardisierten weißen Ziel mit nahezu 100 % Reflexionsgrad. Dementsprechend wird weißen diffusen Zielen ein Wert um 0 dB und dunkelgrauen diffusen Zielen ein Wert von rund -10 dB zugeordnet, unabhängig davon wie weit das Objekt tatsächlich vom Scanner entfernt ist. Es ist zu beachten, dass dies nur auf Einzelziele zutrifft, nicht aber auf Ziele, die erkannt werden, wenn der Laserpuls in der Folge noch auf eines oder mehrere Ziele trifft oder das Ziel in seiner Ausdehnung kleiner als der Durchmesser des Laserstrahls ist.

Ziele, die eine bessere Richtwirkung als ein Lambert'scher Reflektor besitzen, liefern folglich eine relative Reflektivität größer als 0 dB. Zu diesen Zielen gehören Reflektorfolien, Tripel-spiegel, Autokennzeichen, Verkehrszeichen oder sich spiegelähnlich verhaltende Flächen, wie z.B. Fensterscheiben oder blankes Metall, bei senkrechtem Auftreffen des Messstrahls.

Die Ausgabe der relativen Reflektivität unterstützt sowohl die Veranschaulichung von Scandaten verschiedener Scanner als auch die Objektklassifizierung. Verkehrszeichen, Autokennzeichen und Referenzmarken sind durch ihre retroreflektierende Oberfläche in den aufgezeichneten Daten somit leicht identifizierbar.

3.4 Betrachtungen zur Punktdichte

Beim mobilen Laser Scanning hängt die erzielbare Punktdichte sowie die Punktverteilung von der Messrate des Laserscanners, der Scangeschwindigkeit (oder der Linienscanrate), der Messentfernung und der Fahrgeschwindigkeit ab.

Normalerweise wird eine MLS-Vermessung derart geplant, dass gewünschte Punktdichten und Punktmuster entsprechend den an die Daten gestellten Anforderungen erreicht werden. Diese wiederum hängen von der beabsichtigten Nutzung ab. Beim luftgestützten Laser Scanning wird ein annähernd gleichmäßig verteiltes Punkteraster, zumindest bei der Vermessung flacher Gebiete, üblicherweise von sich aus leicht erreicht und eine gewünschte geringe Änderung kann lediglich durch Variation der Flughöhe und somit der Messentfernung erfolgen. Hingegen liegt es in der Natur der Sache, dass die Punktdichte mobiler Scandaten bedingt durch den weiten Bereich der Messdistanzen stark variiert. Abb. 5 zeigt den Punktabstand zwischen zwei aufeinander folgenden Entfernungsmessungen einer Scanlinie an einer ebenen Oberfläche in Entfernung r vom Gerät, welcher mit $2\pi LPS/PRR$ gegeben ist. Dabei entspricht LPS der

Scanrate in Linien pro Sekunde und PRR der Laserpulswiederholrate (Pulsrepetitionsrate). Der Abstand zwischen zwei Scanlinien ergibt sich zu v/LPS , wobei v die Geschwindigkeit des Messfahrzeuges ist. Der Kehrwert der Fläche des von diesen beiden Abständen bestimmten Parallelogramms beschreibt die mittlere Punktdichte D

$$D = \frac{\text{LPS}}{v} \cdot \frac{\text{PRR}}{2\pi r \text{LPS}} = \frac{\text{PRR}}{2\pi r v} \quad (3)$$

angegeben in Punkten pro Quadratmeter, wobei das Resultat unabhängig von der Scanrate ist. Der tatsächliche Punktabstand innerhalb einer Scanlinie ergibt sich aus

$$d = \frac{1}{\text{PRR}} \cdot \sqrt{v^2 + 4\pi^2 r^2 \text{LPS}^2} \quad (4)$$

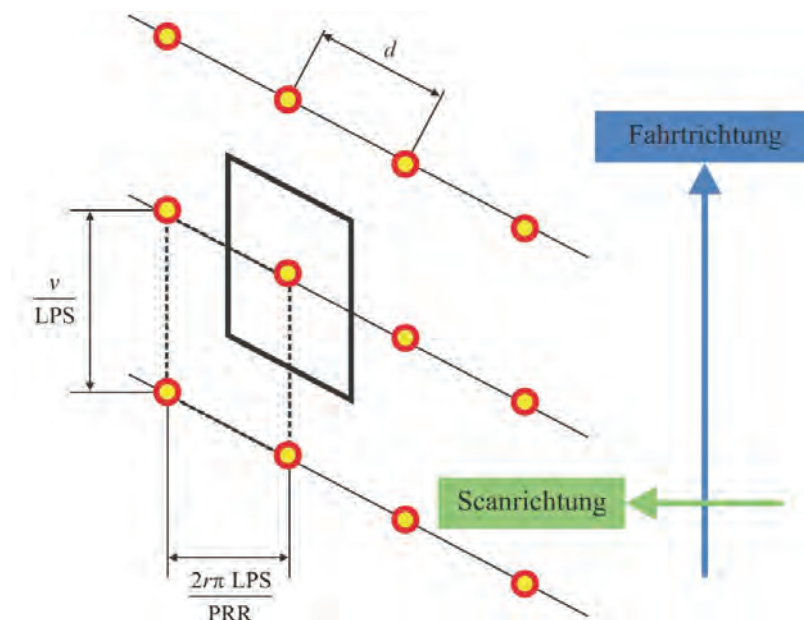


Abb. 5: Schematische Darstellung des Scanmusters auf ebener Oberfläche mit Punktabstand entlang von Scanlinie und Fahrtrichtung.

Meist ist ein regelmäßiges Punktmuster bei einer vorgegebenen Messentfernung gefordert. Der Abstand der Punkte innerhalb einer Scanlinie gleicht somit dem Abstand zweier aufeinander folgender Scanlinien (sprich $d = v/\text{LPS}$). Ein regelmäßiges Punktmuster wird z.B. bei der Darstellung von Fassadenoberflächen gewünscht. Die Scandatenerfassung von weit entfernten Objekten, wie z.B. Stromleitungen, erfordert dagegen eine höhere Punktdichte in der Scanlinie um sicherzustellen, dass der Laserstrahl die Leiterseile auch tatsächlich trifft und so die anschließende Berechnung des Leitungsverlaufs und Durchhangs ermöglicht.

Abb. 6 zeigt die grafische Darstellung der Punktdichte bezogen auf den jeweiligen Messabstand, welche mit dem VMX-250 bei unterschiedlichen Fahrgeschwindigkeiten erzielt wird. Beide Scanner arbeiten mit je 300 kHz Lasertaktfrequenz und liefern somit in Summe 600.000 Laserpulse pro Sekunde.

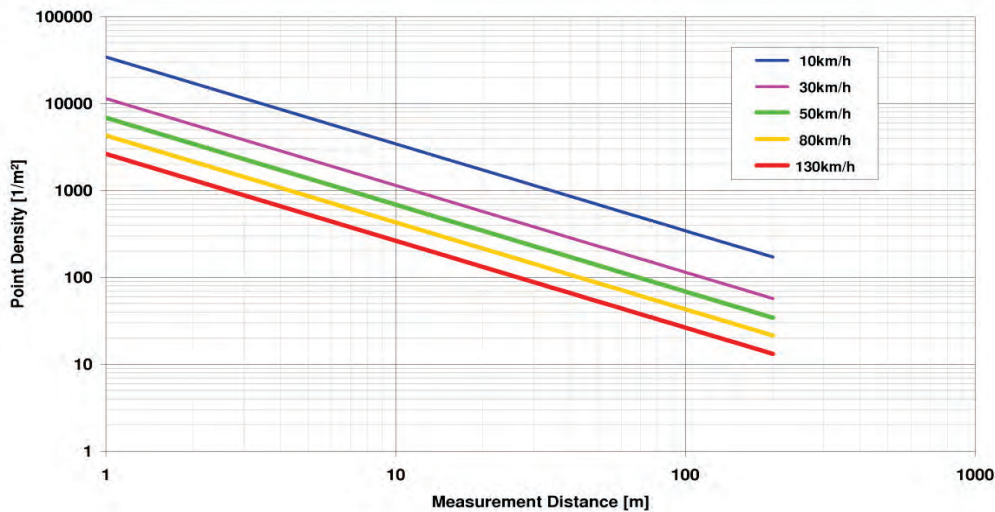


Abb. 6: Punktdichte versus Messabstand in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit.

Wie bereits vorher angegeben variiert die Punktdichte mit dem Messabstand. MLS-Systeme liefern generell sehr hohe Punktdichten der Straßenoberfläche (dem in den meisten Fällen nächstgelegenen Objekt), was in einer beträchtlichen Datenmenge resultiert. Allerdings ist eine solch hochauflösende Erfassung der Straße in manchen Fällen nicht das vorrangige Ziel. Durch eine gezielte Reduktion der räumlichen Abtastung, bewertet nach linearem Punktabstand und Änderungen des Reflexionsgrades der aufeinander folgenden Messungen, können diese Daten ausgedünnt werden. Die Datenmenge wird somit ohne signifikanten Informationsverlust reduziert. Diese Methode kann in Echtzeit während der Datenaufnahme oder auch in einem ersten Nachbearbeitungsschritt angewendet werden. Durch die Reduzierung der Datenmenge wird auch die Rechenzeit für nachfolgende Bearbeitungsschritte wie Auswertung der Punktwolken oder CAD-Modellierung verkürzt.

3.5 RIEGL VMX-250 Messergebnisse

Um die Leistungsfähigkeit eines VMX-250 Laser Scanning Systems zu demonstrieren, betrachten wir die Punktwolke des Vermessungsdatensatzes von einem Dorf in Niederösterreich, welcher unter guten GNSS-Bedingungen (ausreichende Anzahl an Navigationsatelliten sichtbar) aufgezeichnet wurde. Die Daten wurden beim Befahren der Hauptstraße in entgegengesetzten Richtungen mit jeweils beiden Scannern aufgenommen. Somit wurden die Gebäudeobjekte, u.a. Häuserfassaden, entlang des Straßenzuges in insgesamt vier separaten Scans erfasst. Abb. 7 veranschaulicht die aufgenommenen Daten eines der Gebäude anhand der kombinierten Punktwolke aller vier Scans, wohingegen Abb. 8 die Daten der einzelnen Scans wiedergibt.



Abb. 7: Punktwolke eines Gebäudes, aufgenommen in zwei Vorüberfahrten, und insgesamt einer Kombination von 4 Scans. Die Graustufenwerte resultieren aus der Reflektivität der jeweiligen Oberfläche im Bereich von -25 dB bis +5 dB.

Die Daten wurden mittels der sogenannten Systemkalibrierung (oder „Boresight Alignment“) berichtigt, um die Orientierung der Laserscanner im Koordinatensystem genau festzulegen. Die aufgezeichnete Fahrtroute, die Trajektorie, wird von der INS-GNSS Einheit geliefert. Zusätzlich wird eine ähnliche Vorgehensweise wie beim luftgestützten Laser Scanning (dort bekannt als „Scan Data Adjustment“) angewandt, um die Parameter der Trajektorie beider separater Fahrten in entgegengesetzter Richtung anzugleichen.

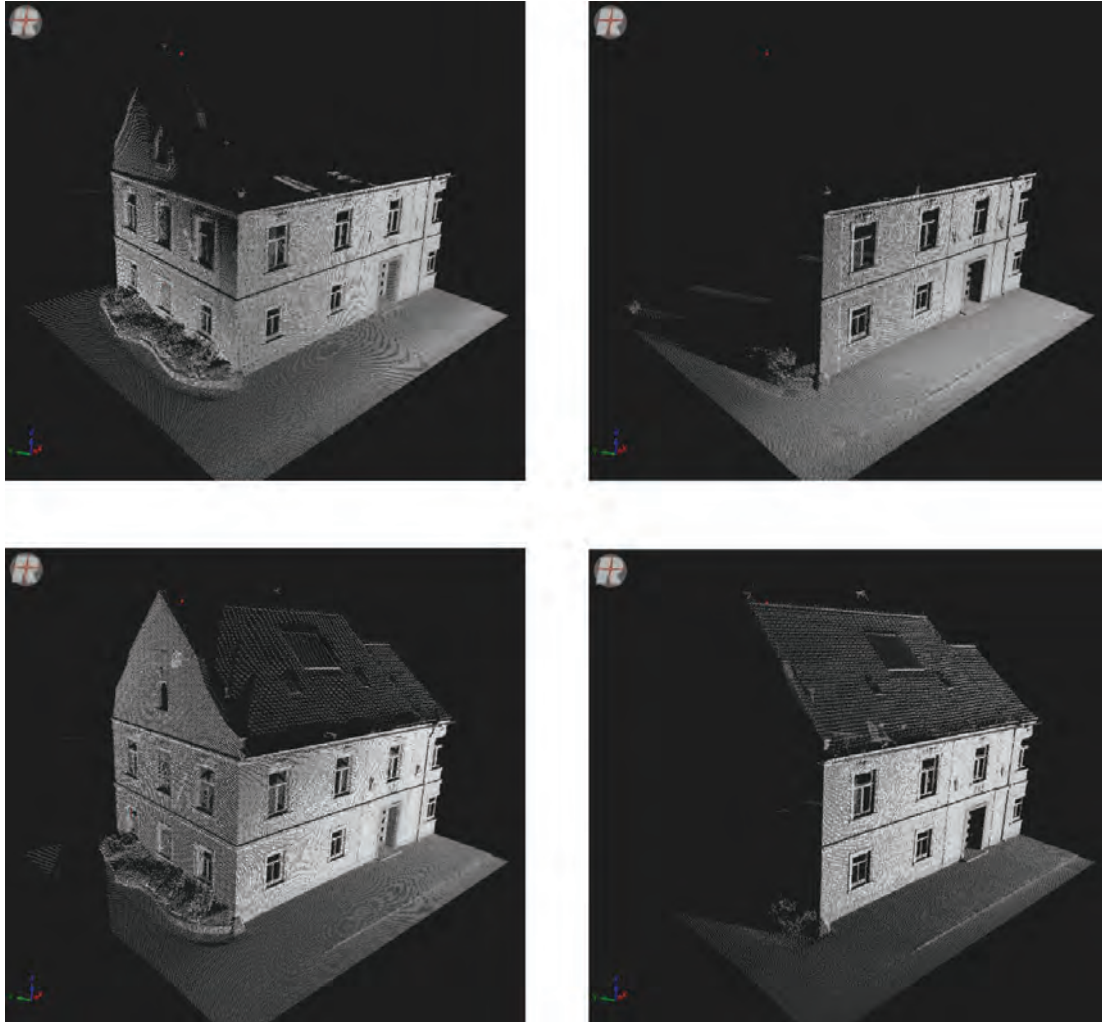


Abb. 8: Punktwolken, aufgenommen in zwei Vorüberfahrten,
 Oben links: Scanner #1 Fahrt 1. Oben rechts: Scanner #2, Fahrt 1.
 Unten links: Scanner #1 Fahrt 2. Unten rechts: Scanner #2, Fahrt 2.

Abb. 8 zeigt augenscheinlich, dass nur Scanner #1 Daten aufnimmt, welche die Fassade im rechten Winkel zur Fahrtrichtung zeigen. Bei Fahrt 1 „blickt“ der Scanner schräg nach hinten, bei Fahrt 2 schräg nach vorne. Im Vergleich zu Fahrt 1 ist bei Fahrt 2 auf der Gegenfahrbahn der Abstand zum Objekt größer, deshalb ist hier auch das Dach sichtbar.

Um die Qualität der Übereinstimmung im Datensatz richtig beurteilen zu können, wurde eine $2 \times 2 \text{ m}^2$ große ebene Fläche der Fassade ausgewählt, wie sie in Abb. 9 eingezeichnet ist. Die korrespondierenden Punkte zugrunde legend wird die Standardabweichung von einer eingepassten Ebene sowohl für die einzelnen Scans als auch für alle vier Scans gemeinsam berechnet. Die Resultate dazu sind in Tabelle 2 zusammengefasst. Aus der Tatsache, dass die ausgewählte Fassadenfläche aller Voraussicht nach nicht komplett eben ist sondern eine gewisse Rauigkeit aufweist, ergibt sich eine im Vergleich zu den oben genannten Daten leicht erhöhte Standardabweichung. In Summe betrachtet ist der Anstieg der Standardabweichung allerdings nur sehr gering und es können keine merklichen Lücken in den Scandaten erkannt werden.

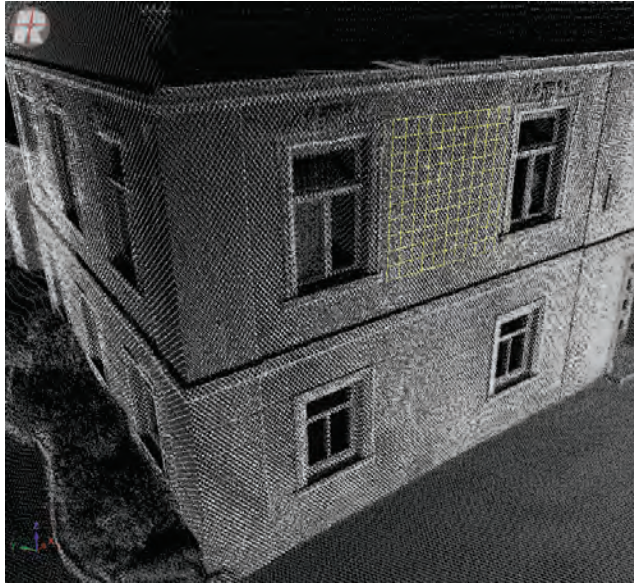


Abb. 9: Als eben angenommene 2x2 m² Fläche einer Fassade des gescannten Gebäudes zur Bestimmung der Standardabweichung der zugehörigen Punkte.

Tab. 2: Überblick über erzielte Standardabweichungen in der ausgewählten Punktwolke für unterschiedliche Kombinationen aus Scannern und Vorüberfahrten.

Scanner	Fahrt	Punkte	Standardabweichung
#1	1	6490	3,4 mm
#2	1	4114	3,2 mm
#1	2	2983	3,1 mm
#2	2	4288	3,3 mm
beide	alle	17875	3,8 mm

Der VQ-250 ist mehrzielfähig, d.h. bei jedem Laserschuss werden alle erfassten Zielechos, die über der Detektionsgrenze liegen, analysiert und mit Koordinaten, Amplitude und zusätzlichen Attributen ausgegeben. Diese Messfunktion ermöglicht es, auch von Zielen, die teilweise durch Vegetation, Zäune, etc. verdeckt sind, Daten zu erfassen.

Abb. 10 zeigt einen Auszug aus einem aufgenommenen Datensatz von einer Stadtautobahn. Die Datenaufnahme erfolgte in zwei separaten Vorüberfahrten in entgegengesetzter Richtung. Der linke Teil von Abb. 10 zeigt eine Flugaufnahme der Autobahn kurz vor der Einfahrt bzw. Ausfahrt eines Tunnels. Im Foto links unten kann eine Fußgängerüberführung ausgemacht werden. Weiters erkennt man eine Lärmschutzwand hinter Bäumen und Büschen entlang des Straßenverlaufes am linken Rand. Das rechte Bild spiegelt die vom VMX-250 gelieferte Punktwolke wieder. Objekte, die im Luftbild von oben erkennbar sind, fehlen in den MLS-Daten, weil die Sicht darauf versperrt ist. Andererseits liefert mobiles Laser Scanning Daten von Flächen, wie dem Inneren des Tunnels oder der Unterseite der Fußgängerüberführung, die für die Luftbildkamera nicht sichtbar sind.



Abb. 10: Datensatz einer Stadtautobahn, aufgenommen mit einer Luftbildkamera (MICROSOFT 2010) (links) und mit dem *RIEGL VMX-250* (rechts).

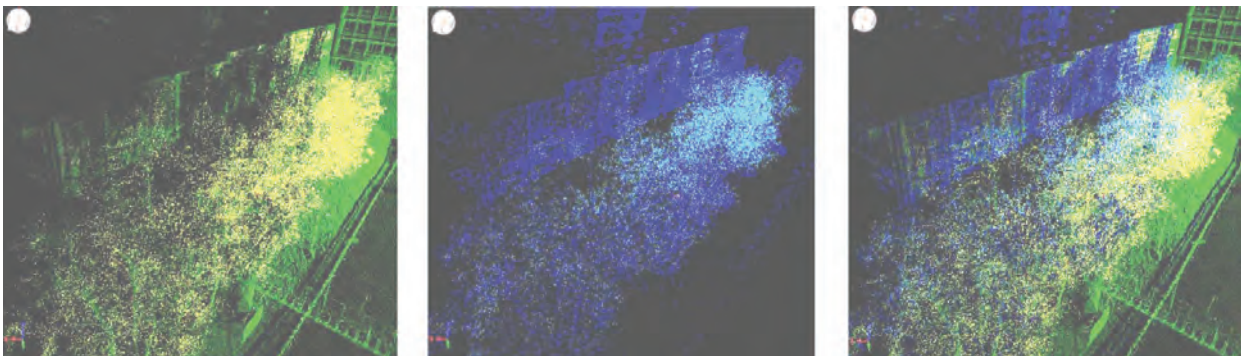


Abb. 11: Punktwolke einer teilweise durch Bäume und Büsche verdeckten Lärmschutzwand. Die Daten stammen aus einer der Vorüberfahrten mit dem *VMX-250*. Darstellung von Einzelziel- bzw. Erstziel-Daten (links), alle zusätzlichen mit Hilfe der Mehrzielfähigkeit des *VQ-250* ermittelten Daten (Mitte) und beide Daten zusammen (rechts).

Ein genauer Blick auf die Laserdaten der Lärmschutzwand, die teilweise von Vegetation verdeckt wird, zeigt die Vorteile der Mehrzielfähigkeit des Scanners. Die aufeinander folgenden Bilder in Abb. 11 visualisieren die entsprechend ihrer Klassifizierung eingefärbten Punkte: Ziele von Lasermessungen mit nur einem einzigen Zielecho sind grün. Wird mehr als nur ein einzelnes Zielecho ermittelt, wird das erste, d.h. das nächstgelegene Ziel, gelb und das letzte, d.h. das am weitesten entfernte Ziel, blau dargestellt. Für den Fall, dass mehr als zwei Ziele ermittelt wurden, werden alle zusätzlichen Zielechos in hellblau eingefärbt.

Eine statistische Auswertung anhand von 240 m^2 der Lärmschutzwand ergibt eine durchschnittliche Punktdichte von 133 Punkten/m^2 unter Berücksichtigung aller ermittelten Zielechos. Zieht man nur jene Daten (Erstziele) in Betracht, die auch ein nicht-mehrzielfähiger Laserscanner ermitteln würde, fiel die durchschnittliche Punktdichte auf nur noch 41 Punkte/m^2 , wodurch beinahe 70 % der Zielechos verloren gehen würden.

4 Literaturverzeichnis

- BRIESE, C., HÖFLE, B., LEHNER, H., WAGNER, W., PFENNIGBAUER, M., ULLRICH, A., 2008: Calibration of full-waveform airborne laser scanning data for object classification, in Proceedings SPIE Laser Radar Technology and Applications XIII, Vol. 6950, 6950H-1 – 6950H-8, Orlando.
- JELALIAN, A.V., 1992: Laser radar systems, Artech House, Boston London.
- RIEGER, P., STUDNICKA, N., PFENNIGBAUER, M., 2008: Boresight alignment method for mobile laser scanning systems, in Proceedings RSPRS, Moskau.
- PFENNIGBAUER, M., ULLRICH, A., 2008: Three-dimensional laser scanners with echo digitization in Proceedings SPIE Laser Radar Technology and Applications XIII, Vol. 6950, 6950U-1 – 6950U-8, Orlando.
- ULABY, F.T., MOORE, R.K., FUNG, A.K., 1981: Microwave remote sensing, active and passive. Volume II: Radar remote sensing and surface scattering and emission theory. Artech House Inc., Norwood.
- ULLRICH, A., REICHERT, R., 2005: High resolution laser scanner with waveform digitization for subsequent full waveform analysis in Proceedings SPIE Laser Radar Technology and Applications X, Orlando, Vol. 5791, 82-88.
- DATASHEET *RIEGL VZ-400*, *RIEGL*, 2010: www.riegl.com.
- DATASHEET *RIEGL VQ-250*, *RIEGL*, 2010: www.riegl.com.
- <http://www.bing.com/maps/?v=2&cp=s0v6nwjbz7q7&scene=29569712&lvl=2&sty=o&where1=Absberggasse%2C%201100%20Wien>, MICROSOFT 2010.

Automatische projektive Bildentzerrung am Beispiel der bildgestützten Planung von Solardachanlagen

THOMAS LUHMANN & ANDREAS VOIGT¹

Zusammenfassung: Es wird ein Verfahren vorgestellt, mit dem die automatische projektive Entzerrung von unkalibrierten Bildern ermöglicht wird. Dazu wird ein speziell konfiguriertes mobiles Referenzobjekt in die Bezugsebene des Objektes gelegt, dessen Messpunkte kalibriert und vollautomatisch auch unter sehr unterschiedlichen Beleuchtungsbedingungen gemessen werden. Die Berechnung der ebenen Projektivtransformation erfolgt durch Kleinste-Quadrate-Schätzung unter optionaler Einbeziehung zusätzlicher geometrischer Bedingungen. Aufgrund der begrenzten räumlichen Ausdehnung des Referenzkörpers kommt es in weiter entfernt liegenden Objektbereichen zu einer Extrapolation der Transformation. Die daraus resultierende Fehlerfortpflanzung wird anhand einer Monte-Carlo-Simulation untersucht.

1 Einleitung

Der zunehmende Einsatz von Solartechnologien auf Gebäudedächern hat zu einem wachsenden Bedarf an Mess- und Planungswerkzeugen geführt, mit denen Konzeption und Bau einer Solaranlage effizient und zielgerichtet vorgenommen werden kann. Hierzu existieren am Markt verschiedene Lösungen, die von der einfachen grafischen Visualisierung bis hin zur kompletten CAD-gestützten Planung einschließlich des elektrischen Designs reichen. Dabei kann weiterhin unterschieden werden zwischen Verfahren der örtlichen und regionalen Potenzialanalyse und der konkreten objektorientierten Planung, wenn eine Maßnahme tatsächlich umgesetzt werden soll.

Die regionale Potenzialanalyse hat zum Ziel, die in einer Region (Stadtteil, Kommune, Landkreis) vorhandene Bebauung daraufhin zu untersuchen, welche Einzelgebäude grundsätzlich für die Solarnutzung in Frage kommen. Dazu werden Verfahren des Airborne Laserscanning und der Luftbildphotogrammetrie unter Einbeziehung von digitalen Katasterdaten eingesetzt. Grobe Potenzialanalysen können vollautomatisch erfolgen, in dem ein 3D-Oberflächenmodell erzeugt und mit den Gebäudevektordaten verschnitten wird. Die so extrahierte Dachfläche wird im Minimum bezüglich der Dachneigung, Dachfläche und Sonnenausrichtung analysiert und bewertet. Weiter ins Detail gehende Analysen erfassen Störflächen auf dem Dach (Dachfenster, Schornsteine, Antennen), Gauben und Vorsprünge sowie durch Nachbarobjekte verursachte Verschattung. Verschiedene Dienstleister konkurrieren mit unterschiedlichen Methoden am Markt. Lösungen werden angeboten u.a. von den Unternehmen SunArea (LANIG et al., 2009), Areowest oder PixD.

¹ Institut für Angewandte Photogrammetrie und Geoinformatik
Jade Hochschule Oldenburg, Ofener Str. 16, D-26121 Oldenburg
www.jade-hs.de/iapg, E-Mail: vorname.name@jade-hs.de

Bei der objektbezogenen Planung einer Solaranlage besteht die Aufgabe in der Regel darin, eine verfügbare Dachfläche geometrisch zu erfassen und die in Frage kommenden Solarmodule zu positionieren. Wünschenswert sind weiterhin Möglichkeiten zur Planung von alternativen Lösungen und Varianten sowie zur Visualisierung der später realisierten Anlage. Während herkömmliche Planungsvorgänge üblicherweise auf manuellen Messungen vor Ort (Maßband, Längenschätzungen) mit relativ hoher Ungenauigkeit und Fehlerquote basieren, kann die Aufgabe mit photogrammetrischen Methoden deutlich beschleunigt werden und die Qualität der Planung signifikant gesteigert werden.

Die in diesem Artikel vorgestellte Lösung basiert auf der photogrammetrischen Einzelbildverarbeitung auf Grundlage der ebenen projektiven Transformation. Dabei wird der Bezug zwischen der ebenen Planungsfläche und der Bildebene hergestellt.

2 Projektivtransformation

2.1 Mathematisches Modell

Die Kollineritätsgleichungen

$$\begin{aligned} x' &= x'_0 + z' \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} \\ y' &= y'_0 + z' \frac{r_{12}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{32}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} \end{aligned} \quad (1)$$

beschreiben eine räumliche zentralperspektive Transformation von Objektkoordinaten (X, Y, Z) in entsprechende Bildkoordinaten (x', y') unter Kenntnis der inneren Orientierung $(x'_0, y'_0, c=z')$ und der äußeren Orientierung $(X_0, Y_0, Z_0, \omega, \varphi, \kappa)$ eines Bildes.

Sie lassen sich alternativ in der Form

$$\begin{aligned} x' &= \frac{a'_0 + a'_1 X + a'_2 Y + a'_3 Z}{1 + c'_1 X + c'_2 Y + c'_3 Z} \\ y' &= \frac{b'_0 + b'_1 X + b'_2 Y + b'_3 Z}{1 + c'_1 X + c'_2 Y + c'_3 Z} \end{aligned} \quad (2)$$

darstellen. Formel (2) beschreibt eine räumliche Zentralprojektion mit 11 Parametern, wie sie auch mit dem Ansatz der Direkten Linearen Transformation (DLT) vorliegt. Setzt man hier für ein ebenes Objekt $Z=0$, ergeben sich die Transformationsgleichungen der ebenen Projektivtransformation:

$$\begin{aligned}x' &= \frac{a'_0 + a'_1 X + a'_2 Y}{1 + c'_1 X + c'_2 Y} \\y' &= \frac{b'_0 + b'_1 X + b'_2 Y}{1 + c'_1 X + c'_2 Y}\end{aligned}\tag{3}$$

bzw. in der inversen Form:

$$\begin{aligned}X &= \frac{a_0 + a_1 x' + a_2 y'}{c_1 x' + c_2 y' + 1} \\Y &= \frac{b_0 + b_1 x' + b_2 y'}{c_1 x' + c_2 y' + 1}\end{aligned}\tag{4}$$

Die ebene Projektivtransformation beschreibt eine Koordinatentransformation zwischen zwei ebenen Koordinatensystemen, die zentralperspektiv aufeinander abgebildet werden. Dabei enthält der Term im Zähler jeweils eine ebene Affintransformation (6 Parameter), während die Koeffizienten im Nenner den Einfluss der Zentralperspektive darstellen.

Aus der Herleitung wird deutlich, dass sowohl die Koeffizienten der räumlichen Projektivtransformation als auch die der ebenen Projektivtransformation Parameter der inneren und äußeren Orientierung enthalten.

2.2 Bestimmung der Transformationsparameter

Zur Bestimmung der acht Parameter der ebenen Projektivtransformation genügen vier identische Punkte in beiden Koordinatensystemen, von denen nicht drei auf einer Geraden liegen dürfen. Die direkte Lösung der Koeffizienten ist möglich, wenn der Nenner in Gleichung (3) auf die andere Seite gebracht wird und damit ein lineares Gleichungssystem entsteht (KRAUS 2004, LUHMANN 2003). Bei einer überbestimmten Lösung erfolgt die Berechnung durch Ausgleichung.

In der praktischen Anwendung der Dach- oder Fassadenvermessung liegen Passpunkte kaum vor und können auch nur mit unverhältnismäßig hohem Aufwand bereitgestellt werden. Für eine einfache Bildverzerrung können stattdessen die Seitenlängen eines Rechtecks im Objektraum eingegeben werden, die allerdings auch vor Ort mit geeigneten Messmitteln bestimmt werden müssen. Daraus lassen sich vier Passpunktkoordinaten ableiten, die für eine Minimallösung ohne Kontrolle auf Messfehler dienen.

Eine vollautomatische und genaue Messung von Passpunkten gelingt durch ein lokales transportables Referenzfeld, das hier über sieben kalibrierte Messmarken verfügt. Dieses sog. PixTool wird auf die Objektfläche gelegt und mit im Bild abgebildet (Abb. 1). Die Messmarken werden im Bild automatisch gefunden und identifiziert, so dass der Anwender keine weiteren interaktiven Messungen vornehmen muss. Der implementierte Algorithmus zur Punkterkennung zeichnet sich durch besonders hohe Robustheit aus, so dass die Messung zuverlässig auch unter

den verschiedensten Lichtbedingungen funktioniert. Die Genauigkeit der Markenmessung liegt bei ca. 0.1 Pixel.



Abb. 1: Automatische Bildtransformation mit PixTool

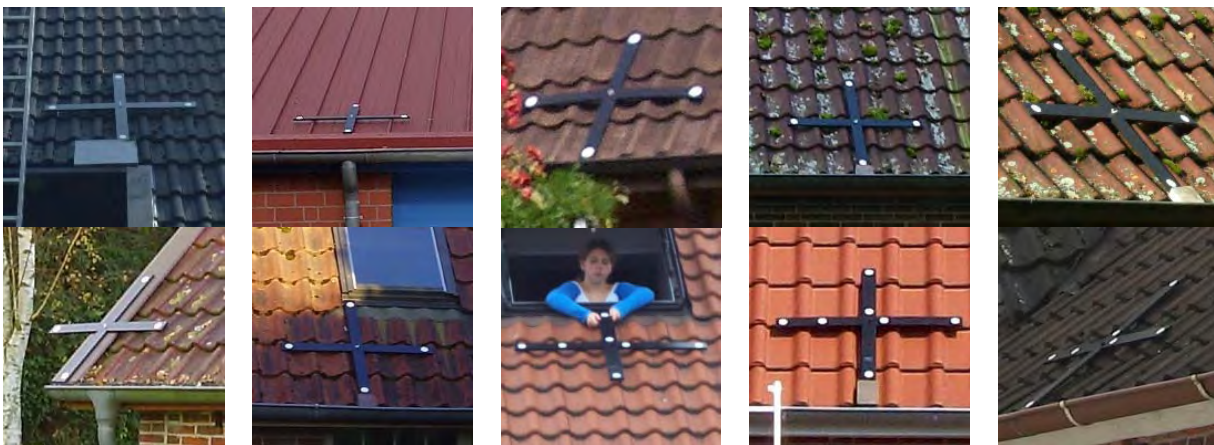


Abb. 2: Automatische Punktmessung bei unterschiedlichen äußeren Bedingungen

Abb. 2 zeigt beispielhafte Bildausschnitte der real abgebildeten Zielmarken des PixTools. Dargestellt sind hier Versionen unterschiedlicher PixTools mit vier bzw. sieben Referenzpunkten. Die Aufnahmen können mit beliebigen Digitalkameras erfolgen, wobei Blickrichtung und Abbildungsmaßstab in einem weiten Bereich frei wählbar sind. Der implementierte Algorithmus ist dabei in der Lage, sämtliche dieser oder vergleichbarer Punktmuster ohne Eingriff des Bedieners zu lokalisieren und zu identifizieren. Dazu wird eine Kombination von Korrelationsverfahren und Kleinster-Quadrate-Zuordnung mit geometrischen Bedingungen eingesetzt.

Die Lage des PixTools auf der zu planenden Fläche ist entscheidend für die Genauigkeit des Verfahrens. Da typischerweise das Verhältnis von Referenzobjekt zu Dachfläche bei 1:8 bis 1:12 liegt, werden Mess- und Transformationsfehler stark extrapoliert.

3 Genauigkeitsanalyse

3.1 Monte-Carlo-Simulation

Mit der Methode der Monte-Carlo-Simulation kann das Fehlerverhalten eines komplexen Systems numerisch simuliert werden. Allen Eingangsgrößen einer Berechnung werden eine Verteilungsfunktion (z.B. Normalverteilung) sowie systematische und zufällige Rauschteile zugewiesen. Durch wiederholtes Durchlaufen einer Simulationsschleife variieren die Eingangsgrößen gemäß den zugeordneten Abweichungen und führen zu entsprechend variierenden Ausgangsgrößen. Daraus lassen sich statistische Kenngrößen (Standardabweichungen, RMS-Werte, Spannen) ableiten, die das Fehlerverhalten des Systems realistisch repräsentieren, sofern die Fehlerverteilungsfunktionen praxisnah definiert worden sind.

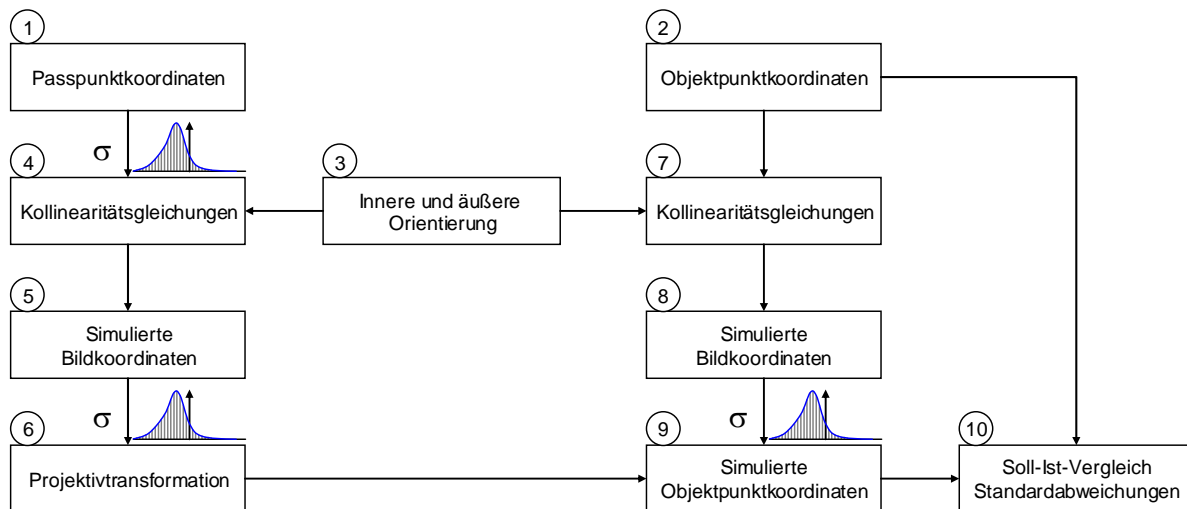


Abb. 3: Ablauf der Monte-Carlo-Simulation

Abb. 3 stellt den Ablauf der Monte-Carlo-Simulation für die Genauigkeitsuntersuchung der ebenen Projektivtransformation dar. Ausgehend von fehlerfreien Passpunktkoordinaten (1) und einer angenommenen Kamera mit innerer und äußerer Orientierung (3) werden über die Kollinearitätsgleichungen (4) simulierte Bildkoordinaten (5) berechnet. Aus Pass- und Bildpunktkoordinaten werden die acht Parameter der Projektivtransformation (6) bestimmt. Aus einer Liste gegebener fehlerfreier Objektkoordinaten (Vergleichspunkte) (2) werden mit denselben Orientierungsparametern (3) ebenfalls simulierte Bildkoordinaten (7) berechnet, aus denen mit der vorher berechneten Projektivtransformation (6) neue simulierte Objektkoordinaten (9) erhalten werden. Das in Abb. 3 dargestellte Symbol σ kennzeichnet dabei jeweils die Stellen im Simulationsablauf, an denen ein zufälliges Rauschen angebracht werden kann. Da die simulierten Objektkoordinaten damit verrauscht sind, kann über einen Soll-Ist-Vergleich (10) mit den fehlerfreien Objektkoordinaten das Genauigkeitsverhalten im Objektraum analysiert werden. Der Monte-Carlo-Prozess verläuft dabei über n Iterationen der Arbeitsschritte (4) bis (10).

Der dargestellte Simulationsprozess erlaubt auch die Einführung nicht ebener Pass- und Objektpunktkoordinaten. Damit können Abweichungen von der Ebenheit der Objektpunktfelder simuliert werden, z.B. zur Analyse einer unebenen Dachfläche oder einer Schiefelage des PixTools.

Im Einzelnen werden vor allem folgende Fehlereinflüsse untersucht:

- Bildmessgenauigkeit der Referenzpunkte
- Genauigkeit der Referenzpunkte im Objektraum
- Lage des Passkreuzes in der Objektebene
- äußere Orientierung der Kamera (relative Lage und Orientierung von Bild- und Objektebene)
- Einfluss nicht-ebener Objektpunkte

3.2 Simulationsergebnisse

Aus der Vielzahl der möglichen Variationen von Eingangsparametern werden im Folgenden einige exemplarische Simulationsergebnisse dargestellt und bewertet. Ausgehend von einer Objektfläche von 12m x 8m mit 45° Dachneigung wird eine typische Kameraposition gemäß Abb. 4 simuliert. Das PixTool hat eine Ausdehnung von ca. 1m x 1m und liegt typischerweise am unteren Rand des Daches.

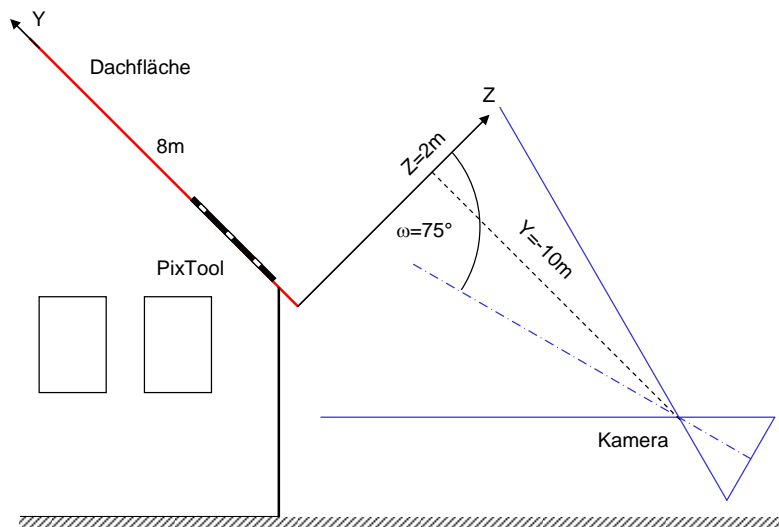

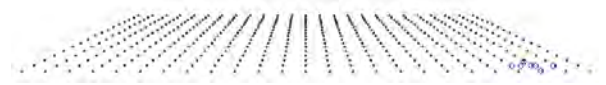
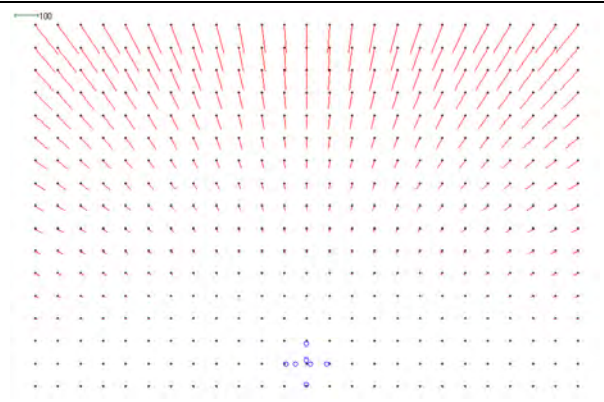
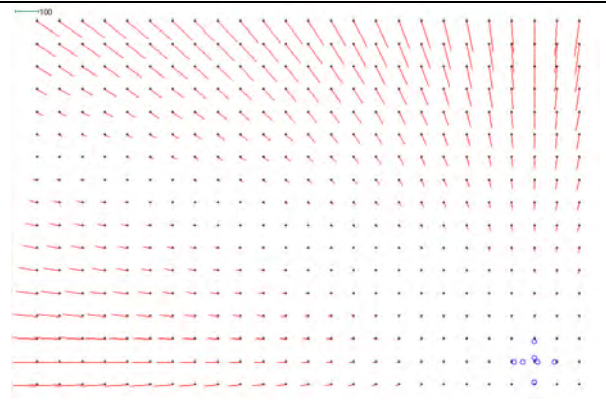


Abb. 4: Typische Aufnahmesituation

Tab. 1 zeigt beispielhafte Ergebnisse der Monte-Carlo-Simulation für zwei unterschiedliche Szenarien. Die jeweilige Bildpunktverteilung zeigt, dass die Aufnahme des Daches unter einem sehr schrägen Winkel erfolgt. Bei zentrischer Lage des PixTools ergeben sich erwartungsgemäß symmetrische Fehlervektoren mit einer mittleren Länge von ca. 42mm (in Y) und einer

maximalen Länge von ca. 104 mm (in Y) wobei die genannten Rauschanteile mit >3 Sigma eingehen. Mit identischen Rauschanteilen, etwas günstigerer Blickrichtung und seitlich gelegenem PixTool ergeben sich asymmetrisch verteilte Koordinatenfehler mit einer mittleren Genauigkeit von ca. 46mm (in Y) und einer maximalen Länge von ca. 145 mm (in Y).

PixTool zentrisch $\Omega = 75^\circ$ Genauigkeit Passpunkte: 0.5mm Genauigkeit Bildmessung: 0.001mm $RMS_x = 24\text{mm}$ (max. 82mm) $RMS_y = 42\text{mm}$ (max. 104mm)	PixTool seitlich $\Omega = 45^\circ$ Genauigkeit Passpunkte: 0.5mm Genauigkeit Bildmessung: 0.001mm $RMS_x = 33\text{mm}$ (max. 101mm) $RMS_y = 46\text{mm}$ (max. 145mm)
 <p>Bildpunktverteilung</p>	 <p>Bildpunktverteilung</p>
 <p>Fehlervektoren</p>	 <p>Fehlervektoren</p>

Tab. 1: Beispielhafte Simulationsergebnisse

4 Anwendungsbeispiele

Das hier vorgestellte Verfahren wird im Programmsystem PixSolar eingesetzt zur Planung und Visualisierung von Dachsolaranlagen. Neben der kompletten Vermessung von Dachfläche und Störflächen (Fenster, Gauben etc.) kann der Benutzer Solarmodule aus einer Datenbank interaktiv im Bild platzieren, durch Texturüberlagerung realitätsnah visualisieren und Leistungskenndaten der künftigen Anlage berechnen. Planungsalternativen können einfach realisiert und bewertet werden. Bei Verwendung des PixTools sind keine weiteren örtlichen Messungen erforderlich. Von der Bildaufnahme bis zur ersten fertigen Planung werden weniger als 10 Minuten benötigt. Abb. 5 zeigt Beispiele von Planungen einer Photovoltaikanlage.



Abb. 5: Bildgestützte Planung und Visualisierung von Dachsolaranlagen

Das Verfahren ist auch für alle sonstigen bildgestützten Messungen und Planungen ebener Objektflächen geeignet. Abb. 6 zeigt dazu die beispielhafte Vermessung einer Hochhausfassade zur Bestimmung der zu bearbeitenden Nettofläche (ohne Fenster) sowie eine Darstellung einer alternativen Farbgebung.



Abb. 6: Vermessung einer Hochhausfassade und Planung einer alternativen Farbgestaltung

5 Literaturverzeichnis

KRAUS, K., 2004: Photogrammetrie. Band 1, Geometrische Informationen aus Photographien und Laserscanneraufnahmen. Walter de Gruyter, Berlin.

LANIG, S., LUDWIG, D., KLÄRLE, M., DÜYFFKE, 2009: Präsentation des Solarenergiepotenzials einer Stadt mittels WebGIS. VDV, 05/2009, S. 352-356. Verlag Chmielorz, Wiesbaden.

LUHMANN, T., 2003: Nahbereichsphotogrammetrie. Wichmann Verlag, Heidelberg.

Digitalkameratachymeter – Einsatzmöglichkeiten für modulare und integrierte Systeme

STEFAN HAUTH¹ & MARTIN SCHLÜTER²

Zusammenfassung: Die aktuellen Entwicklungen bei den modernen Tachymetern zeigen verstärkt in die Richtung einer Kombination von digitalen Bildsensoren mit Robottachymetern. So bieten verschiedene Gerätehersteller polare Messsysteme mit fest integrierten Digitalkameras an. Ergänzend zu dieser Entwicklungsschiene forscht das i3mainz an einem modularen Konzept.

Das modulare Konzept für Digitalkameratachymeter ist unabhängig von den Herstellern und ermöglicht eine Kombination verschiedener Hardware, Software und Algorithmen und ist deshalb unabhängig von individuellen Entwicklungszyklen. Es sollen hier erste Ergebnisse der aktuellen Entwicklung im Bereich der Hardware (Kamera, Optik und Halterung) gezeigt werden.

Modulare und integrierte Systeme haben individuelle Stärken und Schwächen. Deshalb erwarten wir, dass beide Ansätze in unterschiedlichen Einsatzgebieten genutzt werden. Unser Ziel ist ein besseres Verständnis für die Systeme und ihren Anwendungen. Es werden erste Ergebnisse von Anwendungen und das Potenzial in anderen Einsatzbereichen gezeigt.

1 Einleitung

Das i3mainz entwickelt seit 2006 Kombinationslösungen von digitalen Industriekameras mit polaren Messsystemen und zeigt erfolgreich mit dem i3mainz Digitalkameratheodolit den Einsatz im Umfeld von technischen Präzisionsmessungen (SCHLÜTER/HAUTH/HEß 2009). Im aktuellen Forschungsprojekt „Modulare Digitalkameratachymeter“, gefördert vom BMBF, werden die bei automatischen Kollimationszielungen gewonnenen Erfahrungen auf tachymetrische Anwendungen übertragen.

Die Idee, bildgebende Sensoren mit einem Tachymeter bzw. Theodolit zu kombinieren, ist im Grunde nicht neu. Bereits in den 80er Jahren wurde, mit einem Fokus auf Theodolitmesssystemen, im Bereich Videotheodolite geforscht. Diese Entwicklungen gehen schrittweise bis zu den heutigen Digitalkameratachymetern weiter (JURETZKO 2005 und WASMEIER 2009). Die Hersteller Pentax, Trimble, Topcon und Leica Geosystems bieten heute polare Messsysteme mit integrierten Digitalkameras an (siehe Kapitel 2).

2 Digitalkameratachymeter als integriertes System

Die Hersteller von Messgeräten bieten seit den letzten Jahren verschiedene Systeme an, bei denen die Digitalkamera fest in das Tachymeter integriert ist. Die Hersteller verfolgen dabei zum Teil unterschiedliche Einsatzzwecke für eine Digitalkamera in einem polaren Messsystem.

¹ Stefan Hauth M. Sc., Institut für Raumbezogene Informations- und Messtechnik i3mainz, FH Mainz, Lucy-Hillebrand-Str.2, 55128 Mainz, hauth@geoinform.fh-mainz.de

² Prof. Dr.-Ing. Martin Schlüter, Institut für Raumbezogene Informations- und Messtechnik i3mainz, FH Mainz, Lucy-Hillebrand-Str.2, 55128 Mainz, schlueter@geoinform.fh-mainz.de

Ebenso verschieden sind auch die technischen Umsetzungen zur Kombination von Kameras und Messgeräten.

Bei den Visio-Modellen von der Firma Pentax ist die Digitalkamera über dem Objektiv des Fernrohrs montiert (Abbildung 1). Die Kamera hat eine Auflösung von ca. 3 Megapixeln und ein Weitwinkelobjektiv mit fester Brennweite (PENTAX 2008). Die Bilddaten dienen in Zusammenhang mit den Messwerten vom Tachymeter als Grundlage für die grafische Dokumentation der Zielpunkte in einem Übersichtsbild.

Hexagon Metrology bietet mit dem Leica Absolute Tracker AT401 ein polares Messsystem an, das eine Übersichtskamera fest integriert hat (Abbildung 1, HEXAGON 2010). Lasertracker halten grundsätzlich kein Okular für den Benutzer vor. Die Übersichtskamera beim Lasertracker unterstützt insbesondere das Arbeiten mit mehreren passiven Reflektoren.

Die Trimble VX Spatial Station hat seine Kamera unter dem Fernrohrobjektiv verbaut (Abbildung 1). Der Sensorchip hat eine Auflösung von ca. 3 Megapixel und eine Weitwinkelobjektiv mit einer festen Brennweite (TRIMBLE 2007). Die Digitalkamera dient zur Dokumentation der Messpunkte und zur Steuerung des Gerätes. Das Tachymeter bietet auch einen Scanmodus an, die Kamera dient hier wie bei anderen Laserscannern auch zur Festlegung des Scanbereiches. Die Bilder können zur Texturierung der Scandaten verwendet werden.

Bei der Topcon Imaging Station kann der Benutzer über zwei bildgebende Sensoren verfügen (Abbildung 1). Eine Kamera ist mit einem Weitwinkelobjektiv neben dem Objektiv des Tachymeterfernrohres befestigt. Der zweite Sensor ist koaxial zum Strahlengang des Gerätefernrohres integriert und nutzt somit auch dessen Fokus. Beide Kameras haben eine Auflösung von ca. 1,3 Megapixel (TOPCON 2008). Die beiden Kameras können zur Anzielung von Punkten genutzt werden. Dabei dient die neben dem Fernrohr angebrachte Kamera der Übersicht bei der Grobanzielung und die im Fernrohr integrierte Kamera der Feinanzielung. Die Kameras unterstützen ähnlich wie bei dem Trimble-Modell den Scanmodus des Tachymeters.

Das Digitalkameratachymeter von Leica Geosystems ist zurzeit ein Prototyp. Es handelt sich dabei um eine Kleinserie die auf der TCRA1200-Reihe aufbaut. Bei diesem Gerät ersetzt ein CMOS-Farbchip die Strichkreuzplatte und das Okular. Die Auflösung beträgt ca. 5 Megapixel (WASMEIER 2009).



Abbildung 1: Polare Messsysteme mit integrierter Kamera (v.l.n.r.): Pentax Visio-Modelle, Leica Geosystems Absolute Tracker AT401, Trimble VX Spatial Station, Topcon Imaging Station

3 Modulare Digitalkameratachymeter

3.1 Konzept und Aufbau

Wir bauen auf den von SCHIRMER (1994) zusammengestellten Optionen für die Kombination von einem Theodolit und einem digitalen Bildsensor auf. Das modulare Digitalkameratachymeter, das zurzeit am i3mainz entwickelt wird, kommt ohne umfassende Veränderungen am Messgerät aus. Es besteht auf der Hardwareseite aus einem Okularadapter. Dieser dient als Halterung für die Digitalkamera, Optik und den Fokusmotor. Für die Montage ist das normale Okular zu entfernen und durch den Adapter zu ersetzen (Abbildung 2). Der Softwareteil besteht aus der Steuerung der Kamera, des Tachymeters und des Fokusmotors. Dazu kommen u.a. Algorithmen für die geometrische Kalibrierung der Kamera bezüglich der Tachymeterachsen und Bildverarbeitungsfunktionen.

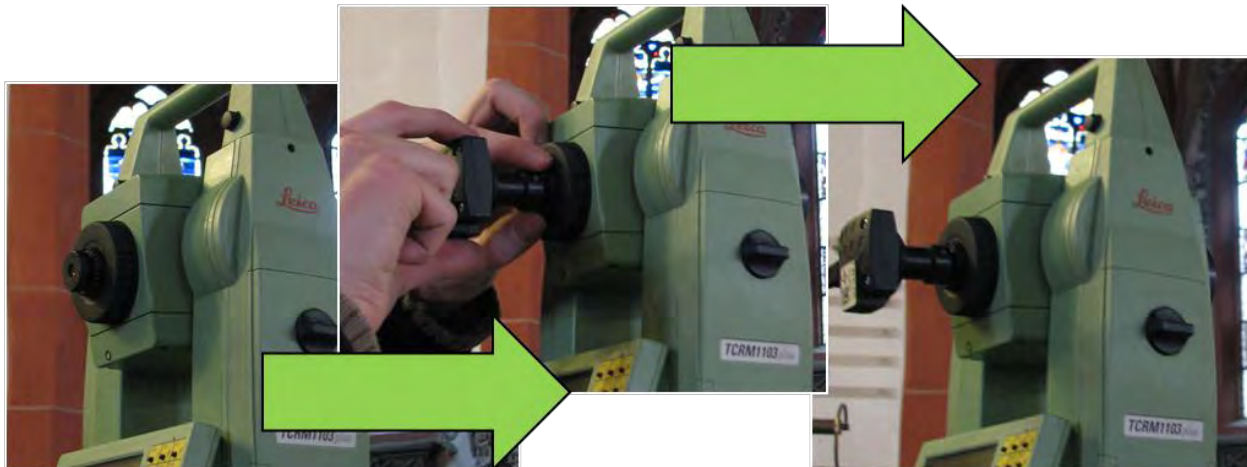


Abbildung 2: Modulares Digitalkameratachymeter, Montage des Adapters an die Okularhalterung

Der Okularadapter hat die Vorzüge, dass im Feld einfach und schnell zwischen dem klassischen Okular und dem Digitalkameraokular gewechselt werden kann. Das modulare System ermöglicht damit ein einfaches und kostengünstiges Upgraden eines herkömmlichen Tachymeters zu einem Digitalkameratachymeter. Das Konzept sieht vor, dass die Hardware mit wenigen Sonderanfertigungen auskommt. So sind Kamera und Optiken keine speziellen Entwicklungen für dieses Projekt, sondern auf gängigen Industriestandards aufbauende Katalogware. So nutzen wir z.B. S-Mount und C-Mount-Anschlüsse für Kamera und Optik und serielle Schnittstellen bzw. USB für Stromversorgung und Datentransfer. Das hat den Vorteil, dass die Komponenten relativ preisgünstig sind und das ein Wechsel von Bauteilen einfach und schnell erfolgen kann. So lässt sich ohne großen Aufwand die Kamera austauschen: durch ein neueres Modell, mit z.B. mehr Auflösung, oder farbig statt monochromatisch.

3.2 Optik und Kamera

Beim modularen Digitalkameratachymeter wird keine Veränderung des optischen Strahlengangs im Fernrohr vorgenommen. Die Digitalkamera nimmt die Bilder direkt von der Strichkreuzebene

auf. Der Adapter ist so variabel konzipiert, dass unterschiedliche Vergrößerungen von der Strichkreuzebene möglich sind. Der Benutzer kann wählen, ob er die Strichkreuzebene vollständig abgebildet haben möchte oder, für eine bessere Vergrößerung, nur den zentralen Teil der Strichkreuzebene.

Die Abbildung 3 zeigt den schematischen Aufbau (im Querschnitt) des Okularadapters zur Befestigung der Digitalkamera mit der Optik. Die Optik ist über ein S-Mount-Gewinde in der Okularhalterung befestigt. Diese Halterung ist am Bajonettanschluss für das Okular mit dem Tachymeter verbunden. Die Länge der Okularhalterung bestimmt den Abbildungsmaßstab und somit wie viel vom Strichkreuz auf den Sensor abgebildet wird. An der Kamerahalterung ist die Digitalkamera über einen C-Mount-Anschluss befestigt. Die Halterung lässt sich variabel auf der Okularhalterung verschieben, dadurch verändert sich der Abstand zwischen Sensor und Optik und das Strichkreuz kann scharf abgebildet werden.

Zurzeit werden Digitalkameras mit einer Auflösung von 2560 x 1920 Pixeln (farbig und monochromatisch) und 1280 x 1024 Pixeln (monochromatisch) verwendet. Die Kameragehäuse sind Serienprodukte der Hersteller mit einem C-Mount-Anschluss. Die Datenübertragung und die Stromversorgung erfolgen bei allen Kameras über USB 2.0. Dadurch kann je nach Anwendungsgebiet und Genauigkeitsanforderung zwischen einer Farbkamera mit Bayer-Sensor und monochromatischen Sensoren gewechselt werden. Bei den Optiken handelt es sich um S-Mount-Modelle mit unterschiedlichen Festblenden.

An der Objektivöffnung des Tachymeters ist ein geeignetes Gegengewicht vorzusehen.

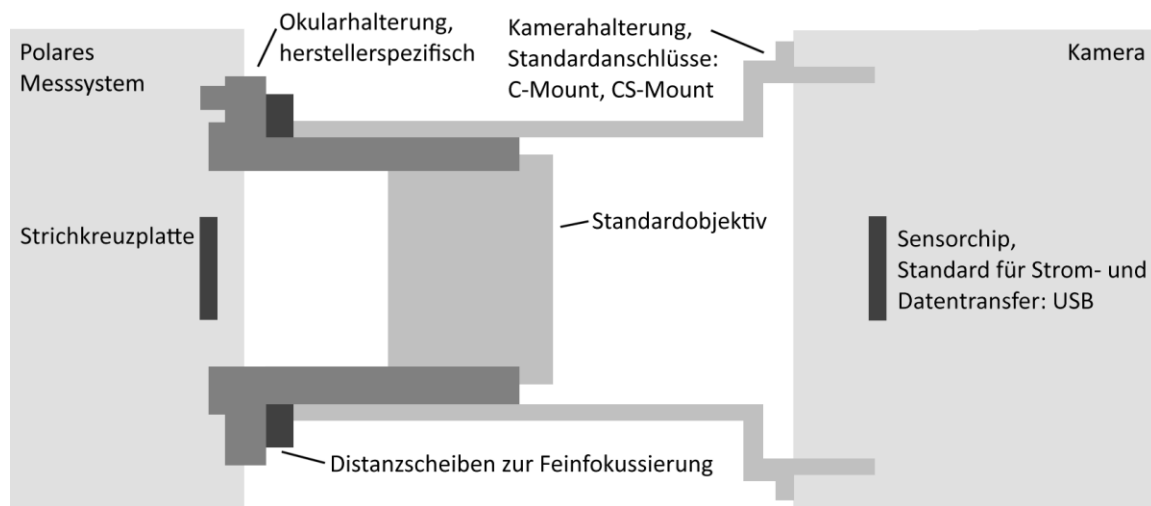


Abbildung 3: Schematischer Querschnitt des Okularadapters

3.3 Auflösungsvermögen

Um zu überprüfen welche Bildauflösungen für ein Digitalkameratachymeter sinnvoll sind, wird das Auflösungsvermögen über die Kontrastübertragungsfunktion ermittelt. Die Aufnahme der Messbilder findet dabei nicht in einer Laborumgebung statt, sondern im Außendienst auf endlich entfernten Zielen. Dies soll praxisnähere Ergebnisse liefern, weil der Haupteinsatzbereich für

geodätische Tachymeter der Außendienst ist. Die Testtafeln sind in den Entfernungsbereichen aufgebaut, die den üblichen Messentfernungen eines geodätischen Tachymeters entsprechen (bis ca. 400 m). Auf den Testtafeln sind Balkenmuster (Schwarz/Weiß-Wechsel) in verschiedenen Linienbreiten aufgedruckt (Abbildung 4).

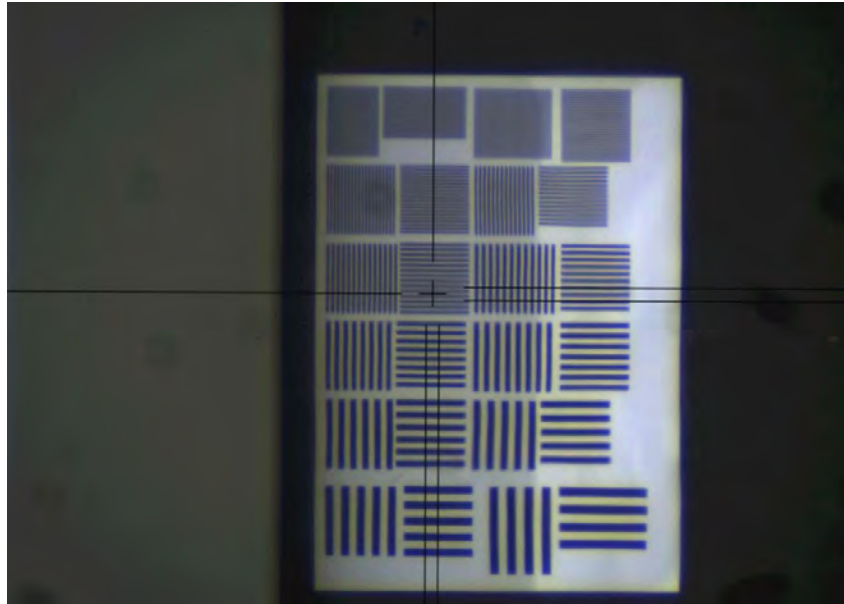


Abbildung 4: Testtafel mit regelmäßigem Strichmuster in unterschiedlichen Linienbreiten. Aufnahme durch das Tachymeterfernrohr (Ausschnitt)

Die Kontrastübertragungsfunktion wird angelehnt an KRAUS (2004) berechnet:

$$C' = \frac{I'_{\max} - I'_{\min}}{I'_{\max} + I'_{\min}} \quad (1)$$

$$CT(F) \approx C' \quad (2)$$

C' – Kontrast im Bildraum

$CT(F)$ – Kontrastübertragungsfunktion in Abhängigkeit der Objektfrequenz (F)

I' – Intensität im Bild

Die folgenden Werte beschreiben nicht die Kontrastübertragungsfunktion in Abhängigkeit zu der Bildfrequenz (f), sondern in Abhängigkeit zu der Objektfrequenz (F). Dies ist eine Abweichung von der in der gängigen Literatur üblichen Darstellung, ermöglicht aber in diesem Fall eine bessere Vergleichbarkeit mit der Messauflösung des Tachymeters. Die Kontrastübertragungsfunktion ist pro Messbild auf den jeweiligen größten Bildkontrast normiert.

Um die Funktion zu erzeugen, wird pro Messbild durch die Streifenmuster ein Grauwertprofil gelegt. In diesen Profilen lassen sich dann die Intensitätsunterschiede messen und den $CT(F)$ für die jeweilige Frequenz (Lp/mm) ermitteln.

Bei der Frequenz, bei welcher die Kontrastübertragungsfunktion einen gewissen Schwellenwert unterschreitet, liegt das Auflösungsvermögen. Dieser Grenzwert ist an der Stelle im Bild zu

wählen, an der kein periodisches Streifenmuster mehr zu erkennen ist, sondern nur noch ein strukturloses Grau (NASSE 2008). Bei den hierfür erzeugten Messbildern liegt die Grenze bei ca. $CT(F) = 0,2$.

Die nachfolgenden Werte zeigen exemplarisch die Ergebnisse der durchgeführten Messserien. Das verwendete Digitalkameratachymeter hat einen CMOS-Farbsensor und eine Auflösung von 2560 x 1920 Pixeln (ca. 5 Megapixel). Das Tachymeter ist ein Leica Geosystems TCRM 1103. Zum Vergleich der Auflösungen werden aus den jeweiligen Messbildern die Auflösungsstufen 1920 x 1440 (ca. 2,7 Megapixel) und 1280 x 960 (ca. 1,2 Megapixel) zusätzlich berechnet. Die Tabelle 1 zeigt das Auflösungsvermögen im Objekt der drei Auflösungen exemplarisch in drei Entfernungen. Das Auflösungsvermögen wird in dieser Tabelle nicht in Lp/mm sondern Breite des Linienpaars angegeben. Dies soll deutlicher zeigen, welche Details im Objekt noch zu erkennen sind. Es ist zeigt sich, dass die Reduzierung der Bildauflösung auch eine Reduzierung bei der Detailauflösung (=Auflösungsvermögen) mit sich bringt. Der Faktor zwischen der größten und kleinsten Bildauflösung ist gleich 2, bei dem Auflösungsvermögen aber nur ca. 1,2. Der Verlust in der Detailauflösung ist also erheblich geringer, als die Reduzierung der Bildauflösung.

Tabelle 1: Darstellung des Auflösungsvermögens im Objektraum, Breite des Linienpaars in mm, Grenzwert 0,2

	Entfernung ca. 40 m	Entfernung ca. 110 m	Entfernung ca.250 m
2560 x 1920	2,4 mm	9,0 mm	14,4 mm
1920 x 1440	2,5 mm	9,3 mm	15,7 mm
1280 x 960	2,8 mm	9,3 mm	16,6 mm

Die Tabelle 2 zeigt nochmal die Werte aus Tabelle 1, nur wird hier die Breite des Linienpaars in mgon angegeben. Bei den Entfernungen von 40 m und 250 m sind Werte für die jeweilige Bildauflösung relativ gleich. Die schlechteren Ergebnisse bei der Entfernung von 110 m kommen durch Luftflimmern. Dies zeigt, dass äußere Einflüsse (z.B. Atmosphäre) starke Auswirkungen auf das Auflösungsvermögen haben.

Tabelle 2: Darstellung des Auflösungsvermögens im Objektraum, Breite des Linienpaars in mgon, Grenzwert 0,2

	Entfernung ca. 40 m	Entfernung ca. 110 m	Entfernung ca.250 m
2560 x 1920	3,8 mgon	5,1 mgon	3,6 mgon
1920 x 1440	3,9 mgon	5,2 mgon	3,9 mgon
1280 x 960	4,3 mgon	5,2 mgon	4,2 mgon

Einen direkten Rückschluss von der Bildauflösung über das Auflösungsvermögen zu der Messgenauigkeit ist nur bedingt möglich. So haben das Aussehen und die Eigenschaften des Ziels auch einen sehr starken Einfluss auf die Genauigkeit. Dass mit einem modularen Konzept

auch Messgenauigkeiten von ca. 0,15 mgon möglich sind, zeigt SCHLÜTER/HAUTH/HEß (2009) mit einem Digitalkameratheodolit. Die Winkelmessgenauigkeit des dort verwendeten Leica Geosystems TM5100 konnte mit einer Kameraauflösung von 1280 x 1024 Pixeln komplett ausgenutzt werden.

4 Anwendungsfelder und Ausblick

4.1 Digitalkameratachymeter

Bei dem reinen Digitalkameratachymeter ist der Fokus des Messgerätes fix oder kann nur manuell am Gerät verändert werden. Mögliche Anwendungsfelder sind hochpräzise Ausrichtearbeiten mittels Kollimations und Autokollimationszielungen (AZAR 2009), sowie die Azimutbestimmung durch astronomische Beobachtungen von Sternen oder der Sonne (Abbildung 5).

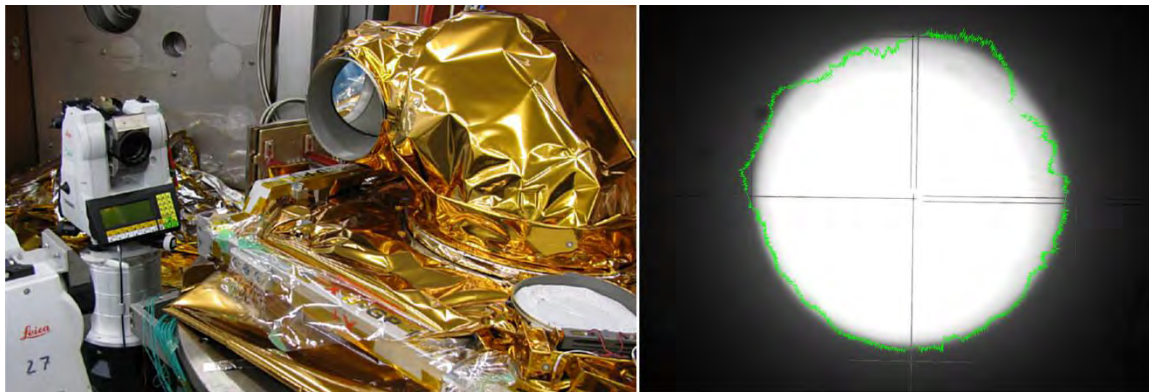


Abbildung 5: Präzise Ausrichtung von Laserstrahlen (links), Azimutbestimmung über astronomische Beobachtungen der Sonne (rechts)

4.2 Digitalkameratachymeter mit Fokusmotor

Bei dieser Ausbaustufe kommt zur der Kamera ein Fokusmotor hinzu, dieser ermöglicht die Steuerung des Fokusantriebs vom PC aus. In der Kombination mit einem Motortachymeter kann das Gerät komplett ferngesteuert werden. Das Messgerät kann somit auch in gewissen Bereichen autark arbeiten und nach einer Lernphase automatisch verschiedene Ziele wiederholt anmessen. Das Digitalkameratachymeter kann zur Dokumentation von natürlichen Passpunkten für Laserscanning und Photogrammetrie genutzt werden. Die natürlichen Passpunkte sind dabei normal mit dem Tachymeter aufzunehmen und das Bild dient als Hilfe für das Auffinden der Punkte in der Punktwolke (Abbildung 6). Im Projekt „DIO3D“ (Deutsche Inschriften Online 3D) vom i3mainz wird das modulare Digitalkameratachymeter für diesen Anwendungsfeld eingesetzt.

Weiterhin können mit einem Digitalkameratachymeter Bauschäden wie z.B. Risse (Abbildung 6) einfach und präzise dokumentiert und georeferenziert werden. Ein Monitoring des Verlaufs und der absoluten Ausdehnung von Rissen sollte auch über große Zeiträume hinweg möglich sein.



Abbildung 6: Dokumentation von natürlichen Passpunkten für Laserscanning und Photogrammetrie (links) und Rissmonitoring (rechts)

4.3 Digitalkameratachymeter mit automatischer Fokussteuerung

In der letzten Ausbaustufe ist eine Automatisierung der Fokussteuerung möglich. Der Fokusmotor lässt sich sowohl anhand der Distanzmessungen des Tachymeters als auch mittels Bildanalyse steuern. Damit ist einerseits eine gewisse Komfortsteigerung für den Benutzer verbunden, andererseits könnten nicht nur Reflektoren sondern auch anderweitig definierte Targets oder Messtaster automatisiert gefunden und erkannt werden.

Technisch machbar ist auch ein automatisiertes Zusammenrechnen von Bildserien systematischer Fokuseinstellungen, das sog. Fokus-Stacking, (HAUTH 2009). Die derzeit verfügbaren Lösungen versagen jedoch bei Szenen mit sehr stark gegliederter räumlicher Tiefe. In unseren Augen ist daher im Moment noch offen, mit welchen Anwendungen dem Modularen Digitalkameratachymeter der Sprung in die Produktreife gelingt.

5 Literaturverzeichnis

- AZAR, E., 2009: Automatisierte Prüfung von digitalen Libellen mit einem Digitalkamera-theodolit. Bachelorarbeit, FH Mainz, B0035.
- HAUTH, S., 2009: Focus-Stacking für Videotachymeter. Masterarbeit, FH Mainz, KM0005.
- HEXAGON, 2010: Leica Absolute Tracker AT401, Produktbroschüre.
- JURETZKO, M., 2005: Reflektorlose Video-Tachymetrie – ein integrales Verfahren zur Erfassung geometrischer und visueller Informationen. Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Heft Nr. 588, München.
- KRAUS, K., 2004: Photogrammetrie Band 1. De Gruyter Lehrbuch, Berlin.
- NASSE, H. H., 2008: Wie liest man MTF-Kurven?. Carl Zeiss, Geschäftsbereich Photo-Objektive.
- PENTAX, 2008: Pentax Visio Total Station V-325DN Series Specifications. Datenblatt.
- SCHIRMER, W., 1994: Universaltheodolit und CCD-Kamera – ein unpersönliches Meßsystem für astronomisch-geodätische Beobachtungen. Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Heft Nr. 427, München.
- SCHLÜTER, M., HAUTH, S., HEB, H., 2009: Selbstkalibrierung motorisierter Digitalkamera-theodolite für technische Präzisionsmessungen. ZfV, 134 (1), S. 22-28.
- TOPCON, 2008: IS Imaging Station. Datenblatt.
- TRIMBLE, 2007: Trimble VX Spatial Station. Datenblatt.
- WASMEIER, P., 2009: Videotachymetrie – Sensorfusion mit Potenzial. AVN, 7/2009, S. 261-267.

Neue Digitalkameras mit erhöhter Stabilität?

J. PEIPE¹, H.-J. PRZYBILLA², H. HASTEDT³ & D. RIEKE-ZAPP⁴

Zusammenfassung: Für den Moment der Belichtung gültige Daten der inneren Orientierung einer Kamera sind bekanntlich Voraussetzung für eine unverzerrte Rekonstruktion photogrammetrischer Aufnahmestrahlenbündel. Kritisch ist die mechanische Stabilität der eingesetzten Kamera zu sehen. Generell kann man vermuten, dass bei Kameras mit möglichst wenig beweglichen Teilen günstige Voraussetzungen für eine hohe geometrische Genauigkeit der Objektrekonstruktion vorliegen.

Im Beitrag werden Testmessungen mit neuen Digitalkameras mit Festbrennweite beschrieben. Besonders hinzuweisen ist auf das Ricoh GXR-Kamerasystem, bei dem Objektiv und Sensor in einem Aufnahmemodul fest zusammengefügt sind.

1 Einleitung

Präzise photogrammetrische Objektbestimmung ist möglich, wenn die innere Geometrie der Aufnahmekamera im Moment der Belichtung bekannt ist und zur Rekonstruktion unverzerrter Strahlenbündel verwendet werden kann. Dies bedeutet üblicherweise, dass aktuelle Werte für die Elemente der inneren Orientierung vorliegen (Kamerakonstante, Lage des Hauptpunktes im Bildkoordinatensystem, Bildfehler beschreibende und eventuell weitere Parameter (Objektivverzeichnung etc.)). Es ist vorteilhaft, wenn diese Daten über einen gewissen Zeitraum stabil erhalten bleiben. Die heutzutage bei photogrammetrischen Messungen eingesetzten Kameras werden jedoch für beliebige Nutzer entworfen und hergestellt, nicht aber mit Rücksicht auf photogrammetrische Stabilitätsanforderungen – mit wenigen Ausnahmen. Instabilitäten treten an verschiedenen Stellen eines Aufnahmesystems auf, z. B. an den Verbindungen des Kamerakörpers mit dem Objektiv und dem Sensor. Auch das Gewicht des Objektivs bzw. eines Blitzgerätes kann die Position des Projektionszentrums verändern, wenn die Kamera gewälzt, d. h. in verschiedenen Lagen gebraucht wird. Zur Ermittlung bzw. Verhinderung von Instabilitäten werden rechnerische Verfahren und auch Möglichkeiten der mechanischen Stabilisierung durch Verschrauben und/oder Verkleben der Kamerateile angewendet (MAAS 1999, TECKLENBURG et al. 2001, RIEKE-ZAPP et al. 2009).

Die in diesem Bericht vorgestellten Kameras bieten von ihrer Konstruktion her gute Voraussetzungen für eine stabile innere Geometrie. Es handelt sich zum einen um die Sigma DP1 (inzwischen weiterentwickelt zu den Versionen DP1s, DP2 und DP2s), eine kompakte Digitalkamera mit Festbrennweite, manuellen Einstellmöglichkeiten und ohne Bildstabilisator. Der dreischichtige Foveon X3 CMOS Sensor der Kamera nimmt pro Pixel alle drei Farben direkt auf und sorgt für hervorragende Auflösung, Dynamik und Farbdarstellung. Als zweites wird das Wechselmodul-Kamerasystem Ricoh GXR untersucht. Hier bilden Objektiv und Sensor samt Bildprozessor eine Einheit (Aufnahmemodul), die über einen Schiebe-

1) Jürgen Peipe, UniBw München, INF4, W.-Heisenberg-Weg 39, 85577 Neubiberg, Germany, E-Mail: j-k.peipe@unibw-muenchen.de

2) Heinz-Jürgen Przybilla, Hochschule Bochum, Labor für Photogrammetrie, Lennerhofstr. 140, 44801 Bochum, Germany, E-Mail: heinz-juergen.przybilla@hs-bochum.de

3) Heidi Hastedt, Jade Hochschule, Institut für Angewandte Photogrammetrie und Geoinformatik, Ofener Strasse 16, 26121 Oldenburg, E-Mail: heidi.hastedt@hs-woe.de

4) Dirk Rieke-Zapp, University of Bern, Institute of Geological Sciences, Baltzerstrasse 1+3, 3012 Bern, Schweiz, E-Mail: zapp@geo.unibe.ch

anschluss mit dem Kamerakörper verbunden werden kann. Eignung und Genauigkeit der beiden Kameras bei photogrammetrischen Messungen werden an Testkörpern ermittelt.

2 Sigma-Kameras DP1/DP2

Parallel zur klassischen SLR-Kamera SD14 (PEIPE et al. 2007) wurde von der Fa. Sigma in den letzten Jahren ein kompaktes, relativ leichtes Kamerasystem mit Festbrennweite entwickelt, die DP1 – und als Folgeversion die DP2. Beide Kameras weisen einen 20.7 mm * 13.8 mm großen Foveon X3 CMOS Sensor mit 4.7 MPixel pro Farbkanal (2652 * 1768 Pixel) auf. Die Brennweite des Objektivs beträgt bei der DP1 16.6 mm (entsprechend 28 mm Kleinbild), bei der DP2 24.2 mm (41 mm Kleinbild).

Bei einer Kamera mit Festbrennweite kann man mit erhöhter Stabilität rechnen, da kein Objektivwechsel vorgenommen wird. Andererseits ist im Fall der DP1/DP2 Misstrauen angebracht: Das Objektiv wird nämlich beim Einschalten aus dem Kamerakörper herausgefahren und beim Ausschalten wieder hinein. Eine solche Bewegung kann zu einer Instabilität des Projektionszentrums im Bildraum führen. Dies wurde durch Kalibrierungen über einen längeren Zeitraum verifiziert. Kalibrierungen im Laufe eines Jahres (n=13) resultierten in einem Versatz der Hauptpunktage von ± 9 Pixeln für die Sigma DP1, bei einer Pixelgröße von 0.0078 mm. Die Sigma DP2 wurde über drei Monate (n=7) hinweg beobachtet. Der Versatz der Hauptpunktage lag in diesem Zeitraum bei ± 4 Pixeln. Die Kameras sind daher für Messanwendungen mit höheren Genauigkeitsansprüchen weniger geeignet. Erfolgreich eingesetzt werden sie jedoch z. B. bei Anwendungen in der Geologie (RIEKE-ZAPP et al. 2010) und in UAVs, bei denen es vor allem auf die Kompaktheit und auf das geringe Gewicht der Kamera ankommt.

3 Digitalkamera Ricoh GXR

3.1 Technische Spezifikationen

Die Ricoh GXR wird vom Hersteller als "kompaktes und vielseitiges Wechselmodul-Kamerasystem" angeboten (Abb. 1; RICOH 2010). Dies bedeutet, dass die Kamera aus zwei Teilen besteht, einem Basisgehäuse und via Schiebeanschluss austauschbaren Aufnahmemodulen mit jeweils einem Objektiv, Bildsensor und Bildprozessor. Der Kamerakörper enthält Akku, SD-Speicherkarte, Display, Blitz und Bedienungselemente. Als Vorteile dieser Konstruktion werden die kompakte Bauweise, die optimale Anpassung von Objektiv, Filterung und Sensor z. B. zur Vermeidung von Farbrauschen und Moiré-Effekten sowie der perfekte Staubschutz innerhalb des geschlossenen Aufnahmemoduls genannt. Aus photogrammetrischer Sicht ist ein solches Aufnahmemodul, in dem Objektiv und Sensor zueinander fest installiert sind, natürlich aus Stabilitätsgründen vorteilhaft.

Das getestete Aufnahmemodul mit der Bezeichnung A12 weist ein 33 mm Objektiv (entsprechend 50 mm Kleinbild) und einen 23.6 mm * 15.7 mm großen CMOS Sensor mit ca. 12.3 Mio effektiven Pixeln (4288 * 2848) auf. Andere Objektiv-Sensor-Kombinationen sind in Planung; das zweite, bereits vorhandene Modul (S10 mit Zoom-Objektiv) ist für photogrammetrische Zwecke kaum geeignet.



Abb. 1: Ricoh GXR Wechselmodul-Kamerasystem (Quelle: www.letsdigital.org)

3.2 Photogrammetrische Messungen

Die Kamera wurde nach Maßgabe der VDI/VDE Richtlinie 2634, Blatt 1 (VDI/VDE 2002) getestet. Hierfür stand ein würfelförmiger Prüfkörper bei der Fa. AXIOS 3D Services in Oldenburg zur Verfügung. Für den Vergleich mit den kalibrierten Messlinien des Prüfkörpers wurden die Koordinaten aller Objektpunkte mit der Bündelausgleichungssoftware AICON 3D Studio und ergänzend mit dem Programm FiBun (mit bildvarianter innerer Orientierung; TECKLENBURG et al. 2001) berechnet.

Zunächst wurde die Bündelausgleichung mit dem 3D Studio durchgeführt, wobei die Kamerakonstante c , die Lage des Hauptpunktes x_H , y_H und die Verzeichnungsparameter A_1, A_2, A_3 für die radial-symmetrische und B_1, B_2 für die tangentielle Verzeichnung simultan (und bildinvariant) mitbestimmt wurden. Die Längenmessabweichungen aus der Differenz der photogrammetrisch berechneten und der kalibrierten Strecken am Prüfkörper zeigt Abb. 2. Es ist zu erkennen, dass die meisten Abweichungen im Bereich von ca. $\pm 110 \mu\text{m}$ liegen, mit zwei Ausreißern bei knapp $-200 \mu\text{m}$ an zwei langen Strecken. Im weiteren Verlauf gelang es nicht, durch Variation der Parameter der inneren Orientierung, vor allem durch ihre bildvariante Bestimmung, das Ergebnis zu verbessern, d. h. die Längenmessabweichungen zu verringern. Dies kann auch als Hinweis auf eine gewisse Stabilität der Kamera gedeutet werden. Dennoch ist abschließend festzustellen, dass die GXR trotz ihrer für Photogrammeter attraktiven Konstruktion bei diesen ersten Genauigkeitstests nur mittelmäßige Ergebnisse im Objektraum liefern konnte – dies im Vergleich zu digitalen SLR Kameras wie z.B. der Nikon D2X (RIEKE-ZAPP et al. 2009).

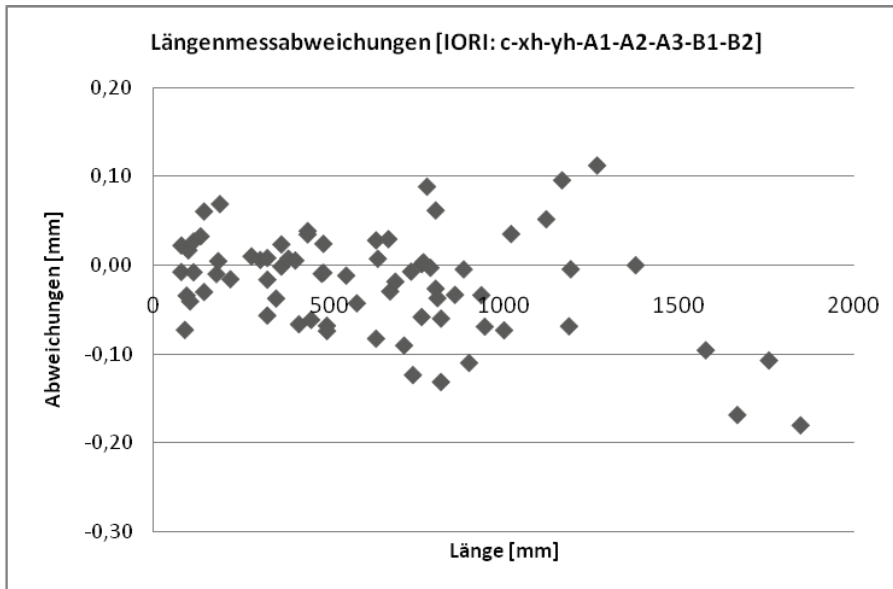


Abb. 2: Ricoh GXR – Längenmessabweichungen (bildinvarianter Ansatz der Inneren Orientierung)

4 Literaturverzeichnis

LETSGODIGITAL.ORG, 2010: <http://www.letsgodigital.org/de/23814/ricoh-gxr/>, Seitenzugriff: 25. Mai 2010

MAAS, H.G., 1999: Ein Ansatz zur Selbstkalibrierung von Kameras mit instabiler innerer Orientierung. Publikationen der DGPF, Band 7, S. 47-53

PEIPE, J., RIEKE-ZAPP, D. & TECKLENBURG, W., 2007: Genauigkeitsuntersuchung von Kameras mit Foveon-Farbsensoren. Vorträge 27. Wiss.-Techn. Jahrestagung der DGPF, Publikationen der DGPF, Bd. 16 (Hrsg. E. Seyfert), Muttentz/Schweiz, 2007, S. 453-456

RICOH, 2010: www.ricoh.com, Seitenzugriff: 04. Juni 2010

RIEKE-ZAPP, D., TECKLENBURG, W., PEIPE, J., HASTEDT, H. & HAIG, C., 2009: Evaluation of the geometric stability and the accuracy potential of digital cameras – Comparing mechanical stabilisation versus parametrisation. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 64/3, S. 248-258

RIEKE-ZAPP, D.H., BOMMER-DENSS, B. & ERNST, D., 2010: Small format digital photogrammetry for applications in the earth sciences. ISPRS Symposium Newcastle, Commission V, WG V/6, im Druck

TECKLENBURG, W., LUHMANN, T. & HASTEDT, H., 2001: Camera modelling with image-variant parameters and finite elements. In: Optical 3-D Measurement Techniques V (Hrsg. A. Grün & H. Kahmen), Wichmann, Heidelberg, S. 328-335

VDI/VDE, 2002: VDI/VDE Richtlinie 2634, Blatt 1 "Optische 3D-Messsysteme – Bildgebende Systeme mit punktförmiger Antastung". Beuth Verlag, Berlin, 10 S.

Genauigkeitsaspekte bei der Oberflächenerfassung mit dem System PhotoModeler Scanner

HEINZ-JÜRGEN PRZYBILLA¹ & JÜRGEN PEIPE²

Zusammenfassung: Das Softwaremodul PhotoModeler Scanner (PMS) ist seit einiger Zeit als Aufsatz für das etablierte Photogrammetrie-System PhotoModeler verfügbar. Durch Dense Surface Modeling (DSM) erweitert es die punkt- und linienhaften Auswertemöglichkeiten der PhotoModeler Basissoftware hinsichtlich der Generierung von flächenhaften/räumlichen Punktwolken. Hierzu werden Verfahren der Photogrammetrie und des Computer Vision Stereo-Matchings eingesetzt. Die kostengünstige Software stellt darüber hinaus Funktionalitäten zur Verfügung, die eine Weiterverarbeitung der Punktwolken bis hin zu einem oberflächenvermaschten 3D-Modell erlauben.

Im Beitrag wird über Untersuchungen bezüglich der Anforderungen an das System und der Optimierung der Systemparameter berichtet und es werden die Ergebnisse an Beispielen erläutert. In Anlehnung an die Richtlinie VDI/VDE 2634 erfolgt abschließend ein Genauigkeitstest sowie ein Vergleich mit den Ergebnissen eines Streifenprojektionssystems.

1 Einleitung

Verfahren zur 3D-Oberflächenvermessung haben in den letzten Jahren deutlich an Bedeutung gewonnen. Terrestrisches Laserscanning für die großräumige Objekterfassung ist ebenso unverzichtbar wie die Nutzung von Streifenprojektionssystemen und Linienscannern bei der Erfassung kleinförmiger Objekte. Auch photogrammetrische Ansätze können erfolgreich eingesetzt werden (close-range photo-based 3D scanning; REMONDINO & EL-HAKIM 2006, LUHMANN et al. 2008). Als ein Beispiel hierfür soll im Folgenden das Softwaremodul PhotoModeler Scanner (RSI 2010) beschrieben werden.

2 PhotoModeler Scanner

Die Software PhotoModeler (PM) ist seit vielen Jahren im Markt positioniert. Sie zeichnet sich aus durch Flexibilität in der Anwendung, umfangreiche Funktionalitäten, Erzeugung punkt- und linienhafter Auswertergebnisse sowie die Option zur Oberflächentexturierung, bei gleichzeitig niedrigen Beschaffungskosten. Das seit einiger Zeit erhältliche Modul PhotoModeler Scanner (PMS) erweitert die Auswertemöglichkeiten durch die Generierung von räumlichen Punktwolken und setzt dabei als Plugin auf die vorhandene Funktionalität von PM auf. Der Prozess des „Dense Surface Modeling“ (DSM) basiert auf Verfahren der Photogrammetrie (Bildorientierung) und des Computer Vision Stereo-Matching, ohne dass der Hersteller (EOS Systems Inc, Vertrieb in Deutschland durch RSI GmbH, RSI 2010) hierzu nähere Informationen verfügbar macht.

1) Heinz-Jürgen Przybilla, Hochschule Bochum, Labor für Photogrammetrie, Lennershofstr. 140, 44801 Bochum, Deutschland, E-Mail: heinz-juergen.przybilla@hs-bochum.de

2) Jürgen Peipe, UniBw München, INF4, W.-Heisenberg-Weg 39, 85577 Neubiberg, Deutschland, E-Mail: j-k.peipe@unibw-muenchen.de

Die Software enthält Module zur Bildtriangulation, zum Punktwolken-Matching sowie zur Generierung und Weiterverarbeitung von 3D-Oberflächenmodellen. Als Hardware kommen beliebige digitale Kameras (DSLR) zum Einsatz, deren Parameter der inneren Orientierung durch Kalibrierung vorab ermittelt werden.

Vorgaben an die Oberflächeneigenschaften bestehen insofern, dass ungleichmäßige Strukturen bzw. Texturen (Wände, Steine, Holz, etc.) vorhanden sein sollten, da homogene Oberflächen (Metall, Glas, etc.) eine Erfassung erschweren bzw. sie unmöglich machen. In diesen Fällen müssen Messobjekte für die Aufnahme oberflächenbehandelt werden (z. B. durch Aufbringen einer Textur).

2.1 Systemparameter und Anforderungen

Für die Generierung von Punktwolken mittels Stereo-Matching macht der Hersteller Vorgaben für die Aufnahmekonfiguration. Fotos sind parallel oder annähernd parallel zu erfassen (Konvergenzwinkel von max. 30°), bei möglichst gleichem Bildmaßstab und Einhaltung eines Basisverhältnisses von 0.1-0.5.

Der Suchraum des DSM-Algorithmus ist durch zu definierende Objektebenen festzulegen. Alternativ wird eine Ebene vom Programm – mehr oder weniger willkürlich – vermittelnd durch die für die Bildorientierung genutzten Targets gelegt. Durch Vorgabe von Umringen kann der Suchraum auf lokale Bildbereiche eingegrenzt werden. Nach Definition einer Sampling-Rate wird das Matching ausgeführt.

„Advanced Parameter“ dienen der Steigerung der Korrelationsgenauigkeit (subpixel, super sampling factor, matching region radius) und nehmen Einfluss auf das Matching bei Vorliegen wenig kooperativer Texturen (texture type – zur Verbesserung der Texturerkennung mit dem Nebeneffekt einer Erhöhung der Anzahl der Störpixel). Alle „advanced Parameter“ führen zu einer deutlichen Verlängerung der Rechenzeiten.

2.2 Basisverhältnis und Konvergenzwinkel

Im Rahmen verschiedener Untersuchungen (PRZYBILLA et al. 2010) wurden die Herstellerempfehlungen zur Aufnahmekonfiguration geprüft. Eine Testfläche wurde zu diesem Zweck mit unterschiedlichen Konvergenzwinkeln und Basisverhältnissen erfasst. Die Anzahl der in diesen Fällen tatsächlich gematchten Punkte und die Datenhomogenität (Punkte innerhalb einer definierten Ebene) wurden festgestellt. Die geometrische Qualität der Punktwolke variiert dabei über ein breites Spektrum nur in geringem Umfang und weist eine hohe Güte auf.

2.3 Oberfläche und Textur

Um den Einfluss der Oberflächengestalt sowie der Textur zu ermitteln, wurden verschiedene Testobjekte in die Untersuchungen einbezogen (PRZYBILLA et al. 2010). So zeigen die Ergebnisse der Erfassung eines „Böhler-Sterns“ (BÖHLER et al. 2003; Abb. 1) die signifikante Abhängigkeit des Matchings von der Textur. Der grau gefärbte Testkörper im linken Bildteil zeigt eine diffuse Punktwolke, die keine Konturen erkennen lässt und über erhebliches Messrauschen verfügt. Bei dem mit einem Zufallsmuster ausgestatteten Testkörper im rechten Bildteil sind Abbildungen der zwei räumlichen Ebenen deutlich erkennbar, ebenso die Begrenzungen des Sterns.

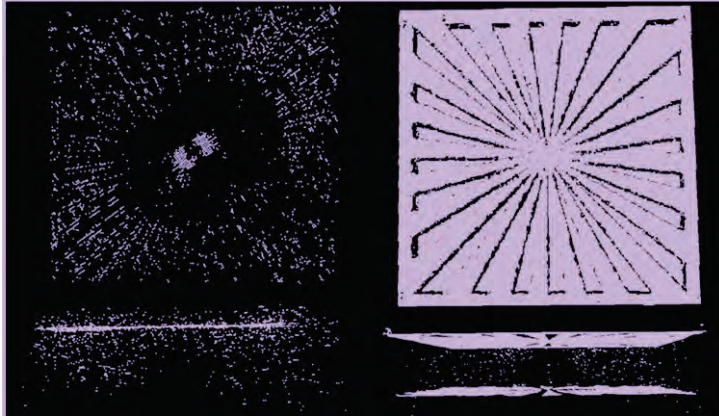


Abb. 1: Böhler-Stern (links: homogen grau , rechts: mit Textur)

3 Prüfung in Anlehnung an VDI/VDE 2634

Die Ableitung von Kenngrößen stellt eine etablierte Vorgehensweise zur Prüfung und Abnahme optischer 3D-Messsysteme dar. Mit der Richtlinie VDI/VDE 2634, Blatt 1 bis 3, ist ein Regelwerk verfügbar, das geeignet ist, bildgebende Systeme mit punkt- oder flächenhafter Antastung zu prüfen (VDI/VDE 2002 und 2008).

Die strengen Anforderungen an die Auslegung der Prüfkörper stellen „im Alltag“ ein gewisses Hindernis bei der Umsetzung der Richtlinie dar und sind oftmals nur mit erheblichem finanziellen Aufwand zu realisieren. Dies gilt umso mehr, wenn das zu prüfende Messsystem in einer extrem günstigen Preiskategorie angesiedelt ist. Aus diesem Grunde wurde für die vorliegenden Untersuchungen ein preiswerter Prüfkörper aus Standardbauteilen (Edelstahlprofile und Präzisionskugeln für Kugellager) konzipiert. Zur Verbesserung der Messbarkeit wurden die Kugeln mit einem Kalkspray behandelt und Zufallsmuster mit schwarzem Toner erzeugt (Abb. 2).

Kugelförmige Prüfkörper eignen sich auf Grund ihrer geometrischen Eigenschaften bei Systemen mit flächenhafter Antastung in besonderer Weise. Sie werden daher in der Regel für die Ermittlung von Kenngrößen wie Antastabweichung und Kugelabstandsabweichung genutzt.

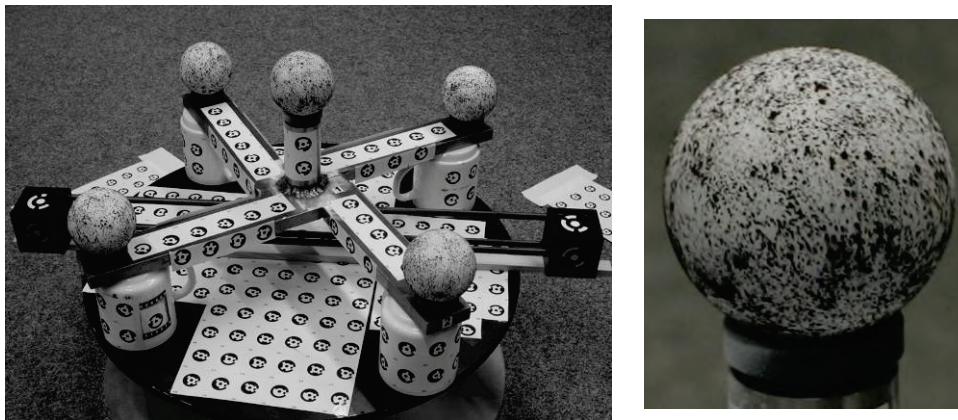


Abb. 2: Prüfkörper aus Präzisionskugeln mit aufgebrachtener Textur

Die Sollmaße des Prüfkörpers wurden mit einem Lasertracker (API 2010) erfasst, so dass Sollwerte für die Kugelradien und Abstände der Kugelzentren vorlagen ($\sigma < 10 \mu\text{m}$). Abb. 3 (li.) zeigt die Aufnahmesituation als Rundum-Verband mit vier Stereo-Bildpaaren und weiteren Einzelaufnahmen, die der Stützung dienen. Vergleichende Untersuchungen erfolgten mit dem Streifenprojektor Breuckmann TriTOS, ausgestattet mit einer hochauflösenden 6 MPixel Kamera. Für die Prüfung in Anlehnung an VDI/VDE 2634, Blatt 2, wurde eine Aufnahmekonfiguration verwendet, die eine komplette Abbildung des Prüfkörpers in einem Einzelscan ermöglicht (Basis 35 cm, FOV 67.5 cm, Aufnahmedistanz 104 cm, Messtiefe 30 cm). Um den Anforderungen der VDI/VDE 2634, Blatt 3, Rechnung zu tragen (Erfassung des Prüfkörpers über mehrere Einzelansichten) wurden insgesamt acht Einzelscans erstellt und mittels ICP-Algorithmus verknüpft (Abb. 3 re.)

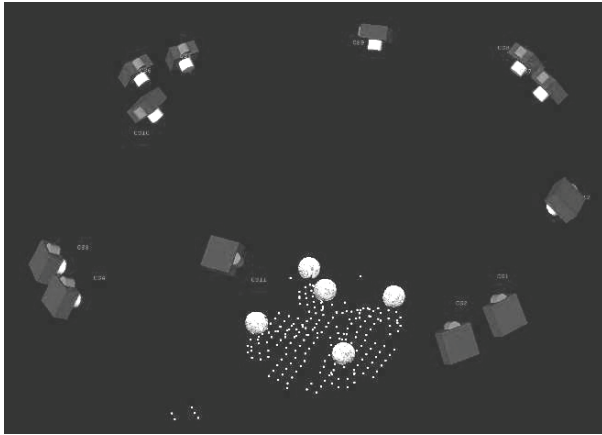


Abb. 3: Aufnahmekonfiguration PMS (li.), Breuckmann TriTOS (re.)

Die Kenngröße Antastabweichung PS (Differenz aus gemessenem und kalibriertem Kugeldurchmesser), ermittelt in jeweils zwei unabhängigen Messreihen, ist in den Abb. 4-5 dargestellt.

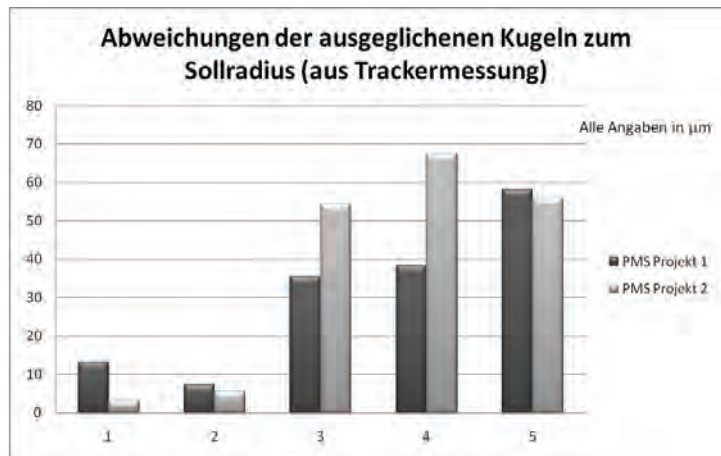
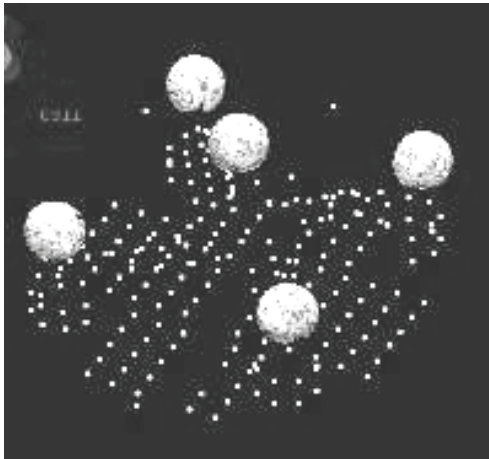


Abb. 4: PMS – Punktwolke aus 4 Stereobildaufnahmen (li.); Antastabweichung PS [μm] (re.)

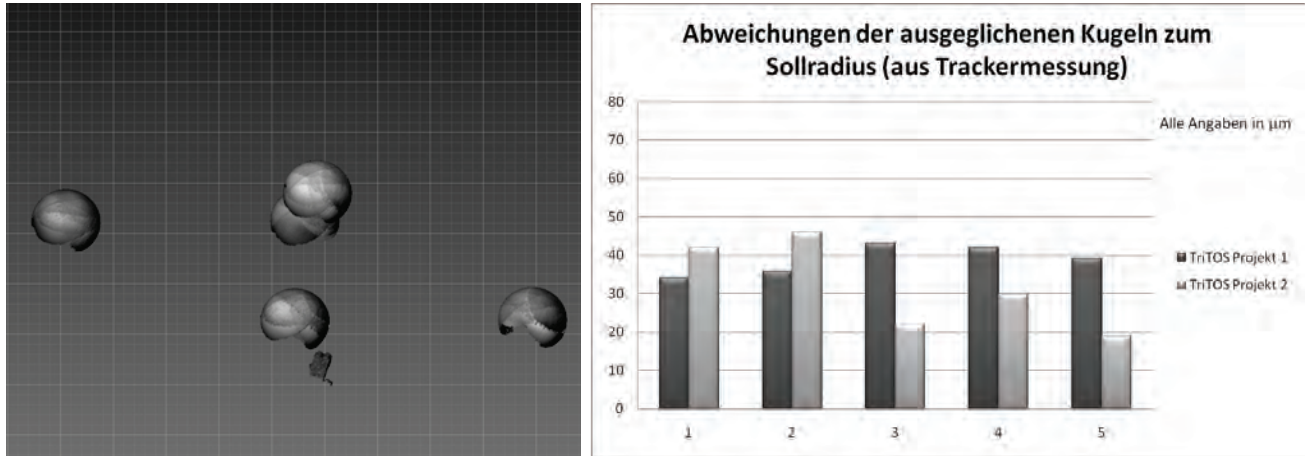


Abb. 5: TriTOS – Punktwolke aus 8 fusionierten Einzelansichten (li.); Antastabweichung PS [μm] (re.)

Die Abb. 6-7 geben die Kenngröße Antastabweichung PF (Form; Spanne der radialen Abstände der Messpunkte von einer berechneten Ausgleichskugel) wieder.

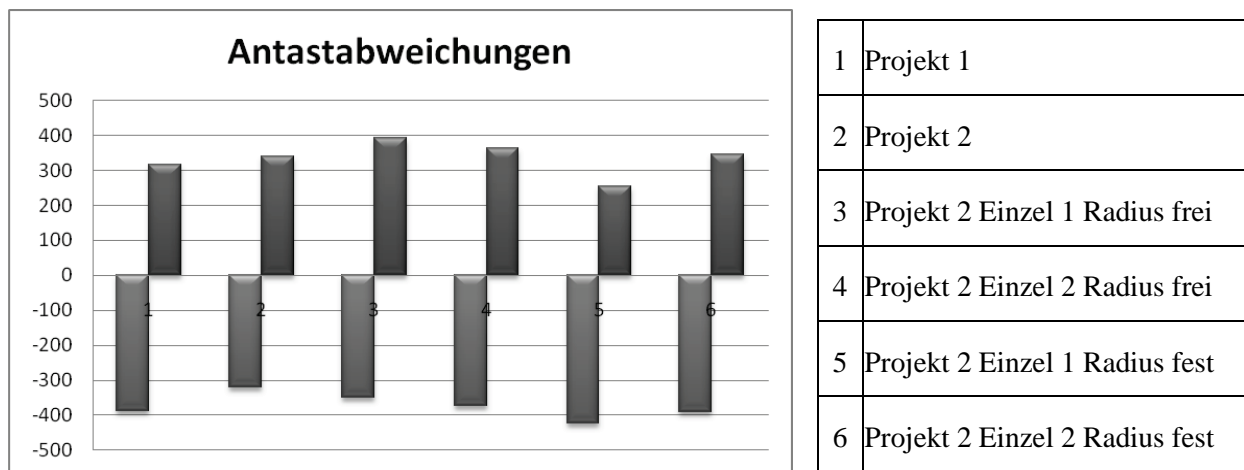


Abb. 6: PMS – Antastabweichung PF [μm] (die Nummern 1 und 2 beziehen sich auf die Aufnahmekonfiguration gemäß Abb. 3 (li), die Nummern 3 bis 6 auf die Auswertung jeweils eines einzelnen Stereobildpaares)

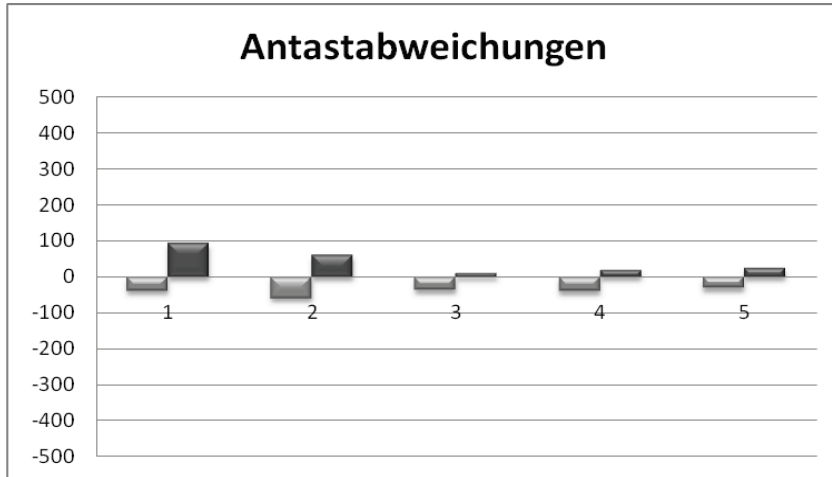


Abb. 7: TriTOS – Antastabweichung PF [μm]

Die Kugelabstandsabweichung SD (Abb. 8-9) ergibt sich aus der Differenz zwischen dem gemessenen Wert und dem kalibrierten Wert eines Abstandes zweier Kugelmittelpunkte.

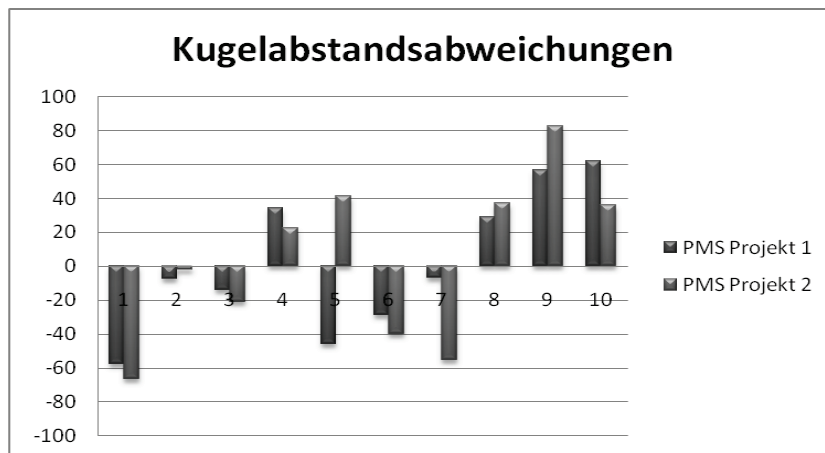


Abb. 8: PMS – Kugelabstandsabweichung SD [μm]

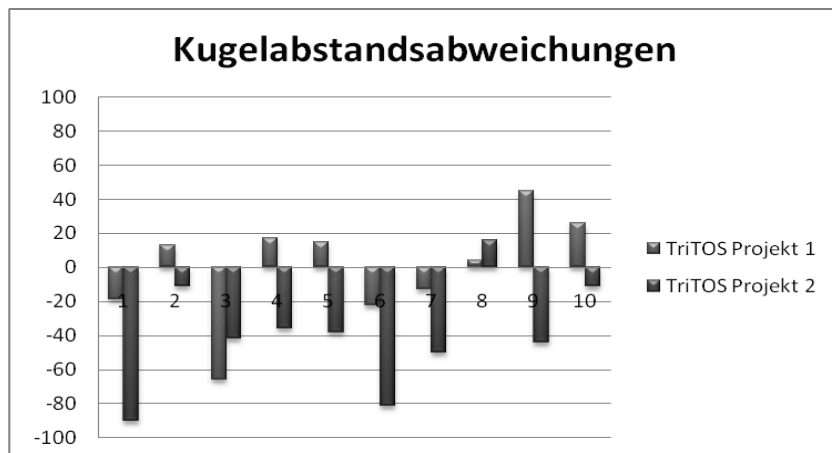


Abb. 9: TriTOS – Kugelabstandsabweichung SD [μm]

4 Resümee

Erste Untersuchungen des Systems PhotoModeler Scanner haben gezeigt, dass dieses Software-Modul ein durchaus brauchbares Hilfsmittel zur Generierung von 3-D Objektoberflächen durch foto-basiertes Scannen darstellt. Zu achten ist vor allem auf eine geeignete Aufnahmekonfiguration samt Bildorientierung sowie auf ausreichende Textur am Objekt. Wichtige Vorteile des PMS sind die relativ geringen Anschaffungskosten von Kamera und Software gegenüber anderen optischen 3D-Messsystemen (Laserscanner, Streifenprojektionssystem etc.), die hohe Mobilität und das geringe Gewicht der Ausrüstung, die kurze Zeit für die Aufnahme vor Ort und der variable Messbereich zur Erfassung unterschiedlich großer Objekte.

Im Vergleich zu den Ergebnissen, die mit einem Streifenprojektionssystem an einem Prüfkörper erzielt wurden, erwies sich der PMS vor allem bei der Ermittlung der Form der Prüfkörper-Kugeln als unterlegen. Insgesamt zeigen die Genauigkeitsuntersuchungen aber eine für viele Anwendungen ausreichende, wenn auch nicht höchste Qualität auf.

5 Literaturverzeichnis

- API, 2010: Systeminformationen API Omnitrac, www.apisensor.de/omnitrac.html, Seitenzugriff: Mai 2010
- BÖHLER, W., BORDAS VICENT, M. & MARBS, A., 2003: Investigating Laser Scanner Accuracy. The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. 34, Part 5/C15, S. 696-701
- LUHMANN, T., BETHMANN, F., HERD, B. & OHM, J., 2008: Comparison and Verification of Optical 3-D Surface Measurement Systems. International Archives for Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 37, Part 5B, Beijing, S. 51-56
- PRZYBILLA, H.-J., PEIPE, J. & JUNGHANS, O., 2010: Untersuchungen zur photogrammetrischen Erfassung von Punktwolken mit dem System PhotoModeler Scanner. In: 9. Oldenburger 3D-Tage, ISBN 978-3-87907-494-5, S. 106-113
- Remondino, F. & El-Hakim, S., 2006: Image-Based 3D Modeling. Photogrammetric Record, Vol. 21 Issue 115, S. 269-291
- RSI, 2010: Informationen zum System PhotoModeler und PhotoModeler Scanner. www.rsi-gmbh.de/public/de/prod/soft/photomod_scanner.html, Seitenzugriff: Mai 2010
- VDI/VDE, 2002: Optische 3D-Messsysteme – Bildgebende Systeme mit flächenhafter Antastung. VDI/VDE-Richtlinie 2634 Blatt 2, Stand 8.2002, Beuth Verlag, Berlin, 11 S.
- VDI/VDE, 2008: Optische 3D-Messsysteme – Bildgebende Systeme mit flächenhafter Antastung in mehreren Einzelansichten. VDI/VDE-Richtlinie 2634 Blatt 3, Stand 12.2008, Beuth Verlag, Berlin, 11 S.

Dokumentation und Rekonstruktion des unvollendeten Kaiserdenkmals im Dom zu Speyer

MICHAEL MOSER¹, ALBERT GRIMM-PITZINGER² & KLAUS HANKE³

*Der Artikel beschreibt die virtuelle Rekonstruktion des geplanten und nie errichteten Kaiserdenkmals im Speyrer Dom mithilfe von historischen Quellen und einer 3D – Messung von existierenden Fragmenten. Der Schwerpunkt lag auf einer Analyse der Architekturteile, die sich hauptsächlich aus geometrischen Grundkörpern zusammensetzen. Obwohl die Objekte Elemente wie Zylinder und Kegel beinhalten, weisen sie auch Abweichungen aufgrund ihrer Herstellungsart und Oberflächenstruktur zur geplanten Sollgeometrie auf. Zur Bestimmung dieser Abweichungen wurden alle existierenden Teile mit extrem hoher Auflösung mit einem FARO Laser Probe Scanner gemessen und modelliert. Dadurch konnten Ausreißer, wie Materialstrukturen oder Beschädigungen am Fragment, vor der Analyse bestimmt und eliminiert werden. Die Arbeiten resultierten in einem virtuellen Modell des Monuments und einer Visualisierung in der geplanten Umgebung, im Speyrer Dom. Ein positiver Nebeneffekt der hohen Auflösung ist die vollständige Dokumentation aller existierenden Teile
Der Artikel wird durch einen Vergleich der Qualität der FARO – Daten mit denen eines TRIMBLE GX Scanners abgerundet.*

1 Einleitung

Im Jahr 1514 unterzeichneten Kaiser Maximilian I. und der Steinmetzmeister Hans Valkenauer einen Vertrag über die Errichtung eines monumentalen Denkmals im Dom zu Speyer. Zum Gedenken der dort bestatteten Kaiser und Könige sollten zwölf Säulen mit einer Statue der Herrschers oder der Herrscherin errichtet werden. Als krönenden Abschluss war ein imposanter Reif beabsichtigt. Der für seine Marmorwerke berühmte Salzburger Bildhauer Hans Valkenauer sollte die Figuren und Architekturteile roh anlegen und zum Transport vorbereiten. Das Zusammenfügen und die feine Ausarbeitung waren erst in Speyer geplant. Aufgrund von nicht erfolgten Zahlungen und dem Tod des Kaisers um 1519 wurde der Auftrag nie fertiggestellt. Zu Beginn des 20. Jahrhunderts wurden in Salzburg sieben Statuen des Museums, zwei eingemauerte Figuren in der Wand eines Gebäudes und weitere Architekturteile in einer Gartenmauer als Fragmente dieses Denkmals erkannt. Seitdem tauchen immer wieder figurale und architektonische Elemente auf, die diesem Monument zugeordnet werden.

1) Michael Moser, Arbeitsbereich für Vermessung und Geoinformation, Technikerstraße 13a, 6020 Innsbruck; E-Mail: michael.t.moser@uibk.ac.at

2) Albert Grimm-Pitzinger, Arbeitsbereich für Vermessung und Geoinformation, Technikerstraße 13a, 6020 Innsbruck; E-Mail: albert.grimm@uibk.ac.at

3) Klaus Hanke, Arbeitsbereich für Vermessung und Geoinformation, Technikerstraße 13a, 6020 Innsbruck; E-Mail: klaus.hanke@uibk.ac.at

2 3D Dokumentation

Die beabsichtigte Untersuchung der Fragmente durch den beauftragten Steinmetzmeister des Salzburg Museums war ein zusätzlicher Impuls für eine hochauflösende dreidimensionale Dokumentation zur beabsichtigten Analyse der Geometrie für die Rekonstruktion des Denkmals. Ein Vorteil bei einer digitalen Methode, im Vergleich zu einer analogen, ist eine texturlose Darstellung der Oberfläche, in der die diversen Strukturen der Oberfläche besser sichtbar sind. Mittels einer veränderten Beleuchtung oder einer vergrößerten Darstellung wird diese Anschaulichkeit noch verstärkt. Ziel war es, die Spuren der verwendeten Werkzeuge und den erreichten Fertigungszustand des Denkmals zu untersuchen und mittels einer dreidimensionalen Kartierung zu dokumentieren. Daher war es notwendig, für die Analysen die Geometrie mit einem hochauflösenden und exakten Messsystem zu erfassen und dementsprechend die Modellierung zu gestalten.

2.1 Rohdatenerfassung

Für die Rohdatenerfassung der Figuren und Architekturteile wurde ein FARO Laser Probe Scanner, der auf einem 7-Achs-FARO Laser Arm montiert war, gewählt. Mit diesem Triangulationsscanner wird ein ca. 8 cm breiter Streifen in einem Abstand von ca. 10 cm vom Objekt gemessen. Die freihändige Führung erlaubt es auch, Bereiche mit Hinterschneidungen zu erfassen, ein wesentlicher Vorteil im Vergleich zu starren Aufnahmetechniken und notwendig für die folgende geometrische Analyse. Die jeweilige äußere Orientierung des Scanners liefert der Messarm mit seinen integrierten Winkelsensoren. Dadurch werden die einzelnen Aufnahmen in ein gemeinsames Koordinatensystem überführt. Dies macht das zeitaufwendige und oft nicht erwünschte Anbringen von Passmarken am Objekt überflüssig. Das Resultat dieser Rohdatenerfassung war eine Punktwolke mit einer Auflösung von 0,5 mm und mit einer Genauigkeit bis zu einem Zehntelmillimeter.



Abb. 1: Erfassung der Rohdaten

2.2 Registrierung und Polygonnetzberechnung

Im Vorfeld der Analysen waren die einzigen Korrekturen an der Punktwolke das Entfernen der nicht relevanten Bereiche aufgrund der Auflagerung bzw. der Stabilisierung des Objekts, sowie eine Optimierung der Registrierung der einzelnen Teilschans zueinander. Die verbesserte Ausrichtung der einzelnen Teilbilder erfolgt über einen Vergleich ihrer vorläufigen Oberfläche aus der Erfassung. Bei der anschließenden Triangulation der Punktwolke wurden die Überlappungsbereiche der Aufnahmen innerhalb eines definierten Bereichs gemittelt und als fusioniertes Polygonnetz exportiert.

3 Geometrische Analyse

Um eine sinnvolle geometrische Analyse zu gewährleisten, wird das Dreiecksnetz nicht weiter verändert. Jede weitere Bearbeitung wie Glättung der Oberfläche, Schließen der Löcher oder Ausdünnen des Polygonnetzes würde nur das Ergebnis der Untersuchung verfälschen.

3.1 Grundgedanke der Analyse

Bei vielen architektonischen Entwürfen bildet sich das Grundgerüst aus geometrischen Elementen. Abhängig von den jeweiligen Modeerscheinungen dieser Zeitepoche, werden diese Strukturen noch mit Verzierungen geschmückt. Genau dieser Prozess ist der Grundgedanke dieser geometrischen Analyse. Die hochauflösende dreidimensionale Dokumentation wird in ihre Bestandteile segmentiert. Nach dem Entfernen der Dekorationen und Unterteilen in ihre Grundkörper bleibt für die Untersuchung die notwendige Istgeometrie übrig. Aufgrund ihrer hohen Datendichte können auch einige Varianten der gewählten Sollgeometrie, wie Quader, Zylinder oder Kegel, gesucht werden. In diesem Bearbeitungsschritt wird ihre Lage und Dimension anhand der definierten Istgeometrie optimal angepasst. Abschließend erfolgt ein Vergleich der beiden Oberflächen zueinander, zum Beispiel mithilfe des kürzesten Abstandes, und somit eine Kontrolle der Berechnung.

3.2 Einfluss von geometrischen Abweichungen

Obwohl die jeweiligen Künstler und Handwerker über ein ausgezeichnetes geometrisches Wissen und hohe handwerklichen Fähigkeiten verfügten, sind leichte Differenzen zur geplanten Form aufgrund der Herstellung nicht zu verhindern. Diese Unterschiede werden aber schon bei der Berechnung der Sollgeometrie ausgeglichen.

Eine andere Form der Abweichung sind die verschiedenen Oberflächenstrukturen bei diesem unvollendeten Denkmal. Nachdem der Künstler seine Arbeit nicht vollenden konnte, befinden sich die erhaltenen Fragmente in sehr unterschiedlichen Stadien. Bei den hochpolierten Bauteilen sind alle Bearbeitungen abgeschlossen und die beabsichtigte Geometrie sichtbar. Die noch vorhandenen minimalen Ausreißer, wie kleine Risse im Material, haben auf die folgenden Berechnungen keinen spürbaren Einfluss.

Problematischer sind die roh behauenen Elemente. Die Proportionen der Objekte sind schon vorhanden, aber durch die raue Oberfläche ist es äußerst schwer, ihre genauen Abmessungen zu ermitteln. Die hohe Auflösung der Dokumentation ermöglicht eine sehr genaue Kalkulation einer Sollgeometrie, die in einem Verhältnis zum geplanten Bauteil steht. Dadurch sind schon wichtige

geometrische Eigenschaften, wie Achsen oder Neigungen der Objekte, bekannt. Anhand von Erfahrungswerten eines Bildhauers oder einer Analyse der Proportionen, wenn genügend Daten verfügbar sind, könnte sogar das fertig bearbeitete oder hochpolierte Bauteil rekonstruiert werden.

Bei größeren Ausreißern, wie Beschädigungen am Objekt, werden diese Zonen schon im Vorfeld der Berechnung segmentiert und entfernt. Ist eine Situation nicht eindeutig erkennbar, kann eine vorläufige Ermittlung einer Sollgeometrie hilfreich sein. Mit ihr ist es möglich, die fehlerhaften Bereiche besser einzugrenzen und eine exaktere Segmentierung durchzuführen. Im Anschluss daran wird die jeweilige Sollgeometrie bestimmt.

3.3 Geometrische Informationen anhand der Sollgeometrie

Die Analyse der Architekturteile lieferte wichtige Informationen für die weiteren Bearbeitungen. Die Längsachse der ermittelten Sollgeometrie war die Grundlage für die senkrechte Ausrichtung der einzelnen Elemente. Des Weiteren konnte über einen Vergleich der verschiedenen Kegel der jeweiligen Pfeiler des Denkmals ihre durchschnittliche Säulenneigung, Durchmesser und Höhe berechnet werden. Etwas komplizierter waren die Ausrichtung und die Bestimmung des Durchmessers der Krone. Bei ihr war die Kombination mehrerer geometrischer Bedingungen, wie die Seitenflächen und die segmentierte Vorderseite, notwendig, um die Längsachse und den Radius des Elements zu erhalten.

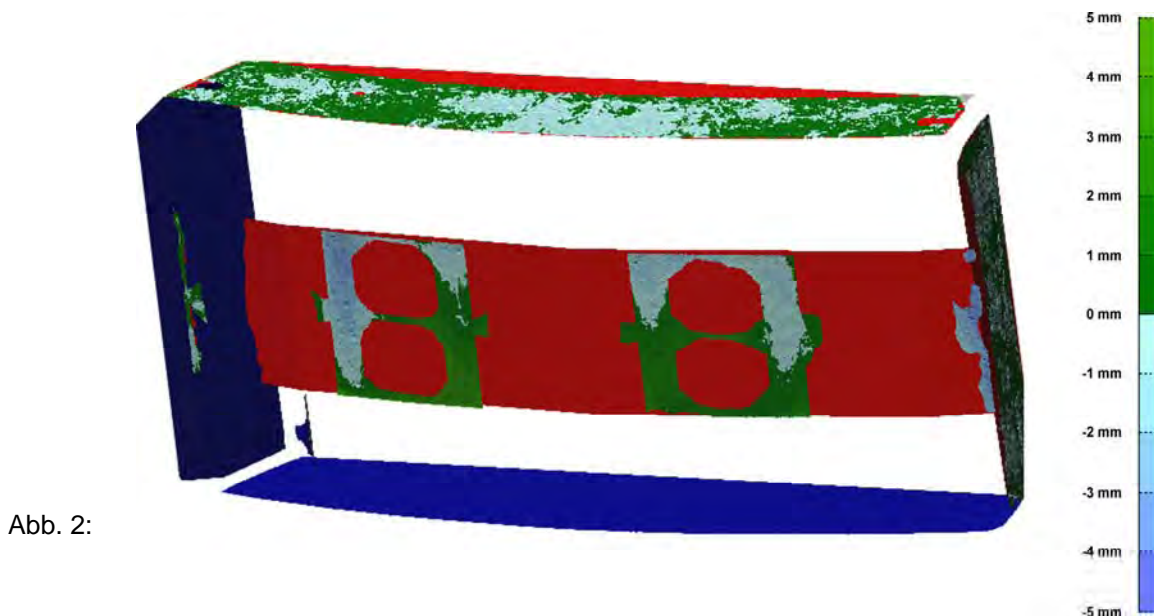


Abb. 2:

Falschfarbendarstellung der Abweichungen des segmentierten Polygonnetzes der Krone (vgl. Abbildung 3) zur Sollgeometrie (rot).

4 Virtuelle Rekonstruktion

Für die virtuelle Rekonstruktion des Denkmals von Valkenauer sind wichtige Informationen durch die geometrische Analyse schon bekannt. Die noch fehlenden Angaben, wie die Anzahl der Stützen der Krone, konnten durch eine Verknüpfung mit den historischen Angaben aus der Abmachung zwischen Kaiser Maximilian und dem Künstler ermittelt werden; beispielsweise ein unbekanntes Säulensegment oberhalb der Figuren. Für die Dimension des Bauwerks enthält der Vertrag Maßangaben in einem alten Schuhmaß. Für die Umrechnung ins metrische System fehlen bei dieser Einheit aus dem 16. Jahrhundert sichere Angaben. Um dennoch diese Informationen für die Rekonstruktion zu nutzen, erfolgte ein Vergleich der verfügbaren Proportionen. Anhand der hochauflösenden dreidimensionalen Dokumentation sowie der daraus ermittelten Sollgeometrien und der historischen Angaben der entsprechenden Bauteile wurde der Umrechnungsfaktor dieser Schuheinheit bestimmt. Somit war die fehlende Höhe des Säulensegments bekannt und das Modulsystem des Denkmals rekonstruiert. Das Schließen der Lächer in den einzelnen Polygonnetzen bildete den Abschluss der Rekonstruktion.

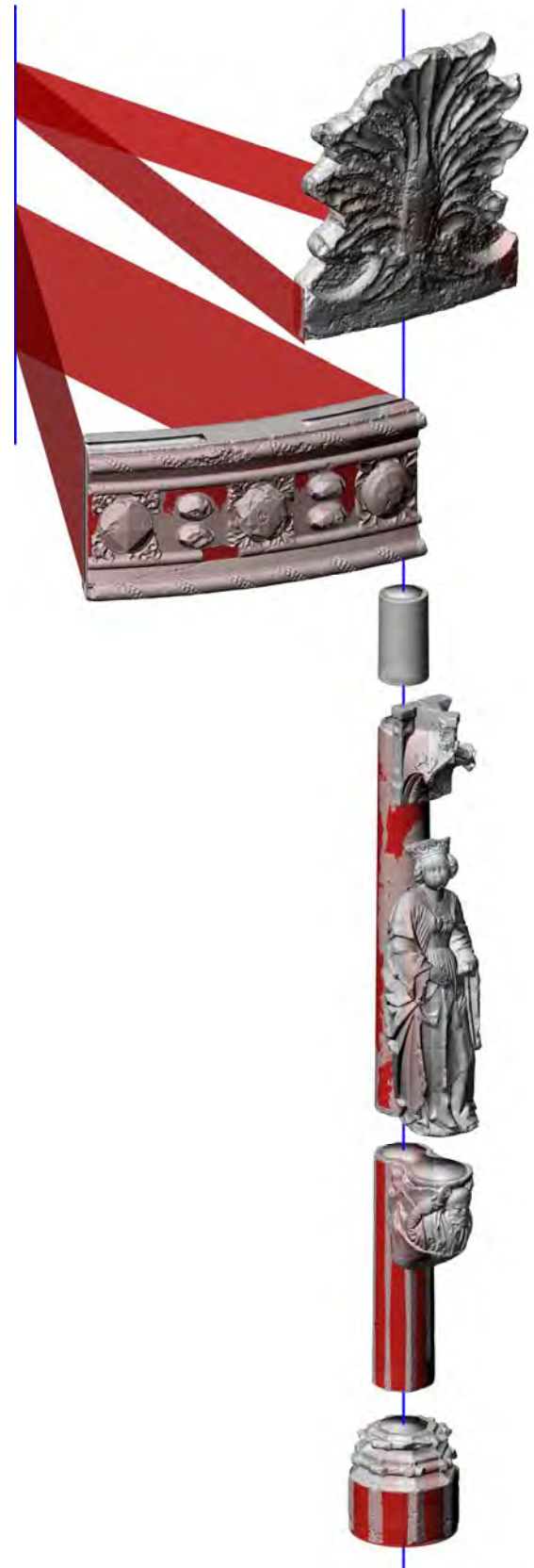


Abb. 3: Ausrichtung der Fragmente und Rekonstruktion des Denkmals mittels der berechneten Sollgeometrie (rot).

5 Vergleichsmessung mit einem Trimble GX

Die parallel durchgeführten Messungen mit einem Trimble GX ermöglichten einen Vergleich der beiden Techniken. Von Interesse war, ob sich die Polygonnetze eines anderen Meßsystems mit einer geringeren Genauigkeit auch für diese geometrischen Analysen eignen würden. Der Trimble GX Scanner verwendet einen fokussierbare Laserstrahl, der eine detaillierte Erfassung von Oberflächen ermöglicht. Bei der kurzen Entfernung zum Objekt und einer gewählten Auflösung von 2 mm liegt die zu erwartende Genauigkeit zwischen 3 bis 5 mm.

Nach der Polygonnetzberechnung werden schon die ersten Unterschiede zu einer hochauflösenden Dokumentation sichtbar. Aufgrund der niedrigeren Rasterweite und des höheren Messrauschens ist die Oberfläche stark strukturiert und die Ecken sind sehr gerundet. Ein weiterer Nachteil sind die großen Lücken in der Dokumentation, die durch den unbeweglichen Standpunkt des Gerätes entstehen. Bei einer komplexen Geometrie mit Hinterschneidungen besitzt die Punktwolke sehr viele Lücken, die auch nicht durch zusätzliche Standpunkte zu schließen sind. Ein weiteres Problem bei einem komplizierten Objekt sind noch die schleifenden Auftreffwinkel des Laserstrahls zur Oberfläche, die eine exakte Modellierung erschweren oder sogar verhindern. Daher sind diese Modelle nur beschränkt für eine Untersuchung der Geometrie einsetzbar und für weiterführende Analysen sollten diese Informationen nicht weiter verwendet werden. Ihr Einsatzgebiet liegt mehr in einer reinen Visualisierung.

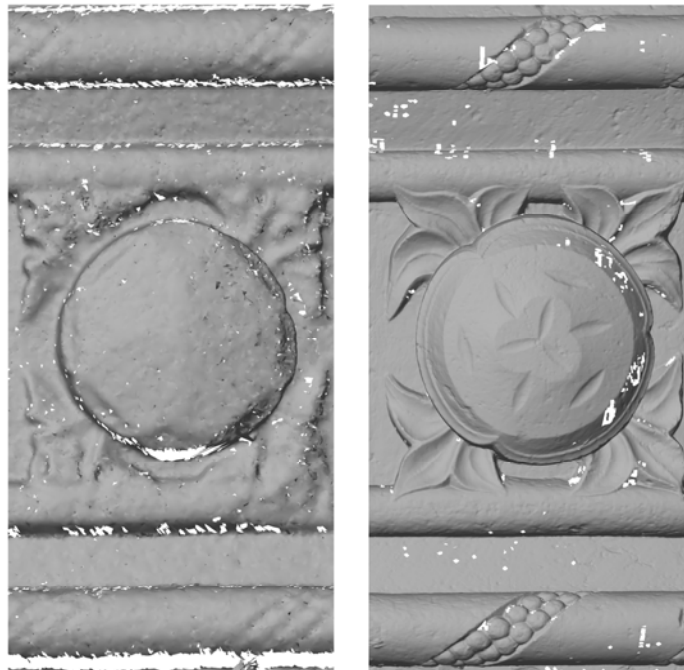


Abb. 4: Vergleich der niedrig zur hoch auflösenden Modellierung

6 Visualisierung

Das rekonstruierte Denkmal besteht aus Originalteilen und ergänzenden Kopien. Die Hälfte der 12 Säulen mit Figuren sind Originale. Das Denkmal wird in Abbildung 5 an der vorgesehenen Position im Dom zu Speyer visualisiert.



Abb. 5: Visualisierung des Denkmals

7 Dank

Der Dank gilt dem Tiroler Wissenschaftsfonds und dem Salzburg Museum (Stadt und Land Salzburg) für die großzügige Förderung sowie der Firma FARO für die ausgezeichnete messtechnische Unterstützung.

8 Literaturverzeichnis

- GRAUERT, H., 1911: Ein vergessenes Kaiserdenkmal. In: Internationale Wochenschrift für Wissenschaft, Kunst und Technik, Jg. 5, Nr. 2.
- CZERNY, W., 1982: Hans Valkenauer und die spätgotische Grabmalplastik in der Diözese Salzbug. Dissertation Wien.
- ALLEN, P., ET AL, 2004: Seeing into the past: creating a 3D modeling pipeline for archaeological visualization In: Proceedings. 2nd International Symposium on 3D Data Processing, Visualization and Transmission, 2004. 3DPVT 2004. ISBN: 0-7695-2223-8 pp. 751- 758
- ENGLISH HERITAGE, 2007: *3D Laser Scanning for Heritage - Advice and guidance to users on laser scanning in archaeology and architecture*. Edited and brought to press by David M Jones, English Heritage Publishing
- HANKE, K., 2000: The photogrammetric contribution to archaeological documentation of prehistory. Proceedings of the ISPRS Congress in Amsterdam. In: *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* Vol. XXXIII Part 5 (2000)
- REMONDINO, F., EL-HAKIM, S., 2006: Image-based 3D modelling: a review. *Photogrammetric Record*, 21(115), pp. 269-291

Das Messverhalten Terrestrischer Laserscanner an Steinoberflächen

PETER DORNINGER¹ & CLEMENS NOTHEGGER¹

Zusammenfassung: Die Punktbestimmung bei Terrestrischen Laser Scannern (TLS) erfolgt polar durch das Messen zweier Winkel (vertikal und horizontal) und einer Entfernung. Diese Messungen sind mit zufälligen und systematischen Fehlern behaftet. Erstere können durch entsprechende Mittelung minimiert werden. Um systematische Fehler zu korrigieren sind entsprechende Fehlermodelle notwendig, die entweder in experimenteller Umgebung (z.B. durch den Hersteller) oder aus Projektdaten bestimmt werden können. Theoretisch geht man davon aus, dass der ausgesandte Laserstrahl an der Objektoberfläche reflektiert wird. Dabei wird im Allgemeinen die Interaktion des Laserstrahles mit der Oberfläche vernachlässigt. Je nach Reflexionseigenschaften kann es im Extremfall zu Absorption oder Totalreflexion des Signales kommen, wodurch eine Punktbestimmung nicht möglich ist. Weitaus schwieriger zu behandeln ist der Fall, dass der Laserstrahl in das Objekt eindringt, dort gebrochen oder mehrfach reflektiert und anschließend wieder zum Scanner zurückgestreut wird. TLS verwenden Laser im sichtbaren oder nahen Infrarotspektrum. Lichtundurchlässige (opake) Materialien (z.B. Sandstein) können daher meist problemlos gemessen werden während lichtdurchlässige Materialien (z.B. Marmor) meist zu systematischen Fehlmessungen auf Grund der beschriebenen Problematik führen. Im Rahmen dieses Beitrages soll das Messverhalten von TLS an unterschiedlichen Steinoberflächen demonstriert werden. Außerdem werden Korrelationen zwischen den systematischen Entfernungsmessfehlern und dem Intensitätsbild des Laserscanners sowie Kamerabildern dargestellt.

1 Einleitung

Zur Erfassung kontinuierlicher Objektoberflächen werden meist Bilddaten oder Laserscanner verwendet. Stereoauswertung von Bilddaten basiert auf der Zuordnung erkennbarer Texturmerkmale an der Oberfläche. Im Gegensatz dazu senden Laserscanner aktiv ein Signal aus um die Entfernung zum Objekt zu bestimmen, wodurch eine von der Oberflächentextur unabhängige Punktbestimmung möglich ist. So genannte Lichtschnittscanner (auch als Triangulationsscanner bezeichnet) projizieren Laserprofile auf die Objektoberfläche und fotografieren diese mit Hilfe einer CCD-Kamera. Sie erzielen höchste Genauigkeiten (Submillimeter), sind allerdings nur für geringe Aufnahmeentfernungen (wenige Meter) und somit für relativ kleine Objekte einsetzbar. Typische Anwendungen sind hochgenaue Detailvermessung einzelner Teilobjekte wie beispielsweise Skulpturen (BERNARDINI et al., 2002). Für große Objekte werden sogenannte Puls-Laufzeit-Scanner oder Phasenvergleichsscanner, im Folgenden als Terrestrische Laserscanner (TLS) bezeichnet, eingesetzt. Durch kontinuierliche Weiterentwicklung ermöglichen aktuelle TLS extrem hohe Messraten (> 1 Mio. Punkte / Sek.) und hohe Messgenauigkeiten (< 3 mm). In der Kulturgutvermessung werden sie typischerweise in den Bereichen Dokumentation, Monitoring

¹ Technische Universität Wien, Christian Doppler Labor „Räumliche Daten aus Laserscanning und Fernerkundung“, Gußhausstraße 27, 1040 Wien, Österreich; pdo@ipf.tuwien.ac.at

(Zeitreihenanalyse) oder zur Datenerfassung für Visualisierungsaufgaben (Public Relations) eingesetzt.

Die Punktbestimmung bei TLS erfolgt polar durch das Messen zweier Winkel (vertikal und horizontal) und einer Entfernung. Im Allgemeinen sind diese Messungen mit zufälligen und systematischen Fehlern behaftet. Erstere können durch entsprechende Mittelung (z.B. NOTHEGGER & DORNINGER, 2009) minimiert werden. Um systematische Fehler zu korrigieren sind entsprechende Fehlermodelle notwendig, die entweder in experimenteller Umgebung (z.B. ABMAYER et al. 2005, LICHTI 2007) oder auch aus Projektdaten (z.B. DORNINGER et al. 2008, GIELSDORF et al. 2004) bestimmt werden können.

Generell wird angenommen, dass der ausgesandte Laserstrahl an der Objektoberfläche gemäß dem Lambertschen Gesetz reflektiert wird. Dabei wird im Allgemeinen die Interaktion des Laserstrahles mit der Oberfläche vernachlässigt. Je nach Reflexionseigenschaften kann es im Extremfall zu Absorption oder Totalreflexion des Signals kommen. In diesen Fällen kann keine Punktbestimmung durchgeführt werden, da keine Energie zum Detektor reflektiert wird. Weitaus schwieriger zu behandeln ist der Fall, dass der Laserstrahl in das Objekt eindringt, dort gebrochen oder mehrfach reflektiert und anschließend wieder zum Scanner zurückgestreut wird. TLS verwenden Laser im sichtbaren oder nahen Infrarotspektrum. Lichtundurchlässige (opake) Materialien (z.B. Sandstein) können daher meist problemlos gemessen werden während lichtdurchlässige Materialien (z.B. Marmor) im Allgemeinen zu systematischen Fehlmessungen auf Grund der genannten Problematik führen.

In der Literatur findet sich keine Untersuchungen, die dieses Messverhalten für praktische Anwendungen näher untersucht, wenngleich das Problem an sich bekannt ist (GODIN et al., 2001). In diesem Beitrag werden die Auswirkungen an Hand von praktischen Beispielen demonstriert. Weiters wird an Hand eines Experiments der Zusammenhang zwischen der sichtbaren Textur und dem Entfernungsmessverhalten an lichtdurchlässigen Materialien (Marmor) untersucht.

2 Problemstellung

Für die folgenden Beispiele und Untersuchungen wurden ausschließlich TLS verwendet, die das Phasenvergleichsprinzip zur Entfernungsmessung anwenden. Diese Geräte senden ein kontinuierliches, amplitudenmoduliertes Signal aus und bestimmen die Entfernung aus der Phasenverschiebung zwischen ausgesandtem und detektiertem Signal. Im Gegensatz zu Puls-Laufzeit-Scannern die im Allgemeinen mehrere Echos pro ausgesandtem Puls detektieren können (z.B. First / Last-Echo) kann mit Phasenvergleichsscannern pro Messung nur eine Entfernung bestimmt werden. Dies ist darin begründet, dass die Überlagerung mehrerer Sinusfunktionen gleicher Frequenz wieder in einer Sinusfunktion resultiert und aus der daraus resultierenden Phasenverschiebung wird die Entfernung bestimmt. Werden zum Beispiel zwei Objekten mit gleicher Reflexionseigenschaft von jeweils 50 % des Footprints (jener Fläche die vom ausgesandten Laserbündel getroffen wird und Energie zum Detektor reflektiert) getroffen, so ist die gemessene Entfernung exakt in der Mitte der beiden Objekte sein. Dieser Effekt führt bei Phasenvergleichs-TLS dazu, dass entlang von Umrisspunkten bis zu den dahinter befindlichen Objekten sogenannte "Koronapunkte" erfasst werden (SOTOODEH 2006). Diese

erscheinen – je nach Verhältnis zwischen Punktdichte und Footprintgröße – als "glatte" Flächen zwischen der Umrisslinie des vorderen Objektes und der polaren Projektion des Umrisses auf das hintere Objekt. Diese Punkte können im Allgemeinen durch im Polarraum angewandte Filter (z.B. große Entfernungsdifferenzen benachbarter Punkte) weitgehend eliminiert werden.

Dasselbe Prinzip führt zu systematisch verfälschten Entfernungsmessungen, wenn der Laserstrahl in das Objekt eindringt, im Material eine Strecke zurücklegt (z.B. Mehrfachreflexion, Doppelbrechung, etc.) und anschließend wieder zum Detektor reflektiert wird. Auch in diesem Fall entspricht die gemessene Entfernung nicht jener zwischen Sender und Objekt oberfläche sondern es werden zu lange Entfernungen gemessen.

Abb. 1 zeigt TLS Daten die mit einem *Faro Photon* Laserscanner an einer ebenen Wand erfasst wurden. Die Wand ist mit einer etwa 2 cm dicken Marmorplatte verkleidet. Die linke Abbildung zeigt die Abstände einer Referenzebene gegenüber den gemessenen Punkten. Rechts ist das Intensitätsbild im Polarraum dargestellt. Bei diesem Beispiel sind insbesondere im rechten, unteren Bereich die Abweichungen auf Grund der Interaktion mit dem Material erkennbar. Die großen Abweichungen im oberen sowie im linken Bereich der dargestellten Wand werden zusätzlich durch Total- bzw. Mehrfachreflexion verursacht. Auf diese Problematik wird im Folgenden nicht näher eingegangen.

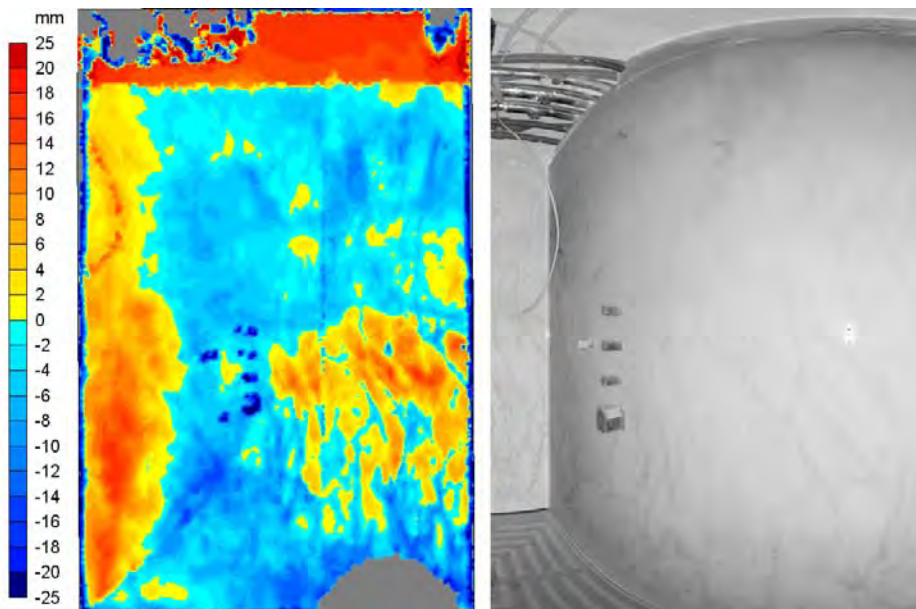


Abb. 1: Wand mit 2 cm dicker ebener Marmorverkleidung. links: Farbkodierte Abstände der TLS Punkte gegenüber vermittelnder Ebene; rechts: Intensitätsbild des TLS im Polarraum.

In Abb. 2 sind Daten die mit einem *Zoller+Fröhlich Imager 5006i* erfasst wurden dargestellt. Das Objekt ist der Hadrianstempel in Ephesos. Die aus Kalkstein errichteten Bruchsteinmauern sind zum Teil mit Marmorplatten verkleidet. Das Modell (linke Abbildung) wurde aus Daten die von verschiedenen Standpunkten aus erfasst wurden ermittelt. Die marmorverkleidete Vorderseite wurde mit drei Scans von unterschiedlichen Standpunkten aus erfasst. Insbesondere in der untersten Plattenreihe können größere systematische Abweichungen festgestellt werden. Die mittleren Einfallswinkel der untersuchten Platten betragen etwa 10°, 45° und 70°. Rechts ist die

Analyse der drei einzelnen Scans dargestellt. Die Farbkodierung zeigt jeweils die Abstände der einzelnen Scans gegenüber einer vermittelnden Ebene. Die maximalen Abweichungen betragen bis zu 15 mm bei nahezu orthogonaler Aufnahme­richtung. Mit abnehmendem Einfallswinkel werden auch die systematischen Messfehler geringer.

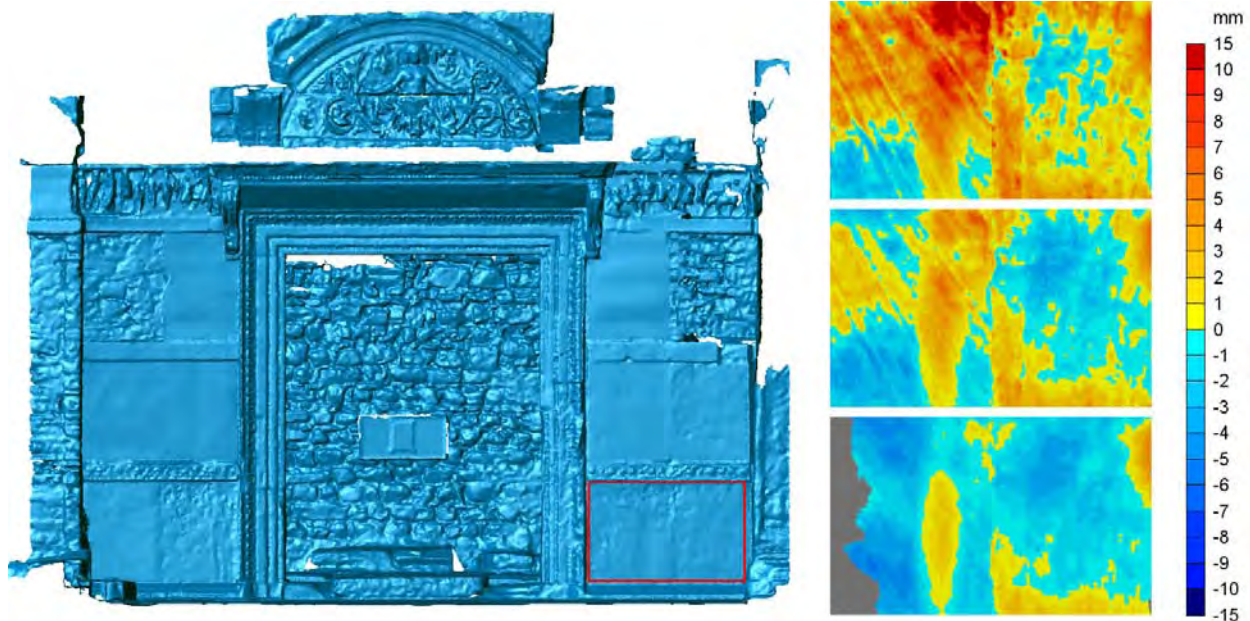


Abb. 2: Hadrian Tempel, Ephesos. links: Triangulierungsmodell erstellt aus mehreren Einzelscans und Testgebiet (rotes Rechteck); rechts: Farbkodierte Darstellung der Abstände von drei Einzelscans gegenüber einer Referenzebene. Mittlerer Einfallswinkel: oben: $\sim 10^\circ$, mitte: $\sim 45^\circ$, unten: $\sim 70^\circ$.

3 Experiment

Wie man an den in Abschnitt 2 gezeigten Beispielen erkennen kann, gibt es eine Vielzahl an Einflussgrößen (Entfernung, Einfallswinkel, etc.) die neben der Materialeigenschaft zu systematischen Fehlmessungen führen. Im folgenden Experiment wird versucht, unter möglichst gleichbleibenden, äußeren Bedingungen den Zusammenhang zwischen der sichtbaren Textur des Materials (RGB-Bilder), dem vom TLS erfassten Intensitätsbild und den systematischen Entfernungsmessfehlern zu untersuchen. Zu diesem Zweck wurden glatte Marmorplatten mit einem *Zoller+Fröhlich Imager 5006i* und mit einer *Canon EOS 350D* erfasst. Die Bilder wurden bei künstlicher Beleuchtung (zwei indirekte Blitze) und in orthogonaler Aufnahme­richtung erfasst. Die Auflösung am Objekt beträgt etwa 0.2 mm pro Pixel. Es wurden Belichtungsserien mit 5 verschiedenen Blendenöffnungen aufgenommen (5.6, 8, 11, 16, 22), um eine möglichst gleichmäßige Erfassung von hellen und dunklen Bereichen zu ermöglichen. Diese jeweils 5 Einzelbilder wurden zu High-Dynamic-Range (HDR)-Bildern mit einer Farbtiefe von 32-bit kombiniert. In Abb. 3 ist die Aufnahmeanordnung der Bilderfassung ersichtlich. Die Passmarken zur Referenzierung von Bild- und TLS-Daten mussten folgenden Anforderungen genügen: Die Fläche muss hinreichend groß und eben sein, um eine Referenzebene (für die Bestimmung der Distanzmessfehler) zu definieren; Das Material muss für den TLS vollständig opak sein, um eine

Interaktion mit dem darunter liegenden Material zu vermeiden; Es müssen entsprechende Markierungen vorhanden sein die in den Bilddaten mit hinreichender Genauigkeit bestimmt werden können.

Die gewählten Passmarken bestehen aus zwei schichten Karton (Untergrund: schwarz, Sichtseite: hellgrau, 300g) mit einer Ausdehnung von 4 x 4 cm (Abb. 3, rechts). Die Opazität wurde mit Hilfe eines hoch-reflektierenden Spektraltargets (Reflektivität: 99%) überprüft. Erst durch Anbringen des schwarzen Untergrundes konnten 100% Opazität sicher gestellt werden.



Abb. 3: Bildaufnahme (links) und Testobjekt mit Passmarken (rechts).

Die Scans wurden mit einem Punktabstand von etwa 0.5 mm am Objekt aufgenommen. Anschließend wurden die Passpunkte manuell in den einzelnen Scans bestimmt. Die Referenzebene ist definiert als vermittelnde Ebene durch diese jeweils vier Punkte. Auf Basis der Referenzebene wurde jeweils ein lokal horizontiertes (in Bezug die Referenzebene) Koordinatensystem definiert. Die Bilddaten wurden in Bezug auf dieses Koordinatensystem unter Verwendung der vier Passpunkte entzerrt. Zusätzlich wurden beleuchtungsbedingte Inhomogenitäten in der Bildhelligkeit rechnerisch entfernt. Um die Korrelation von Bild- und TLS-Daten zu ermöglichen, wurden alle vorhandenen Datensätze in Rasterbilder mit einer Auflösung von 1 mm pro Pixel umgerechnet.

4 Ergebnisse und Diskussion

Im Folgenden werden zwei unterschiedliche Marmorplatten untersucht. Objekt 1 ist ein „Fior di Pesco“. Die Platte ist überwiegend dunkel mit linienhaft verlaufenden, hellen Einschlüssen. Die Orthogonalprojektion des Scannerstandpunktes ist etwa bei Pixel 200 / 350. Das heißt, der Laser trifft nahezu orthogonal auf das Objekt. Visuell betrachtet, kann eine hohe Korrelation zwischen den drei Eingangskanälen (monochromes Bild, Intensitätsbild, Entfernungsbild) festgestellt werden (Abb. 4). Scatterplots (Abb. 5) bestätigen dies auch beim Vergleich von Intensitäts- und

Entfernungsbild (Korrelation: 0.95). Die Korrelation zwischen Monochrom- und Intensitäts- bzw. Entfernungsbild ist geringer (Korrelation: 0.8). Der Grund dafür könnte sein, dass die Auflösung der beiden Aufnahmegeräte, insbesondere der pro „Pixel“ erfasste Bereich (d.h. der Footprint) stark variieren. Entspricht bei der Bilderfassung der erfasste Bereich pro Pixel in etwa der Auflösung (0.2 mm), so ist die Footprintgröße des verwendeten Scanners etwa 3 mm.

In Abb. 6 sind die Ergebnisse einer weiteren erfassten Marmorplatte (Carrara Arabescato) dargestellt. Diese besteht überwiegend aus hellen Bereichen mit dunklen, linienhaft verlaufenden Einschlüssen. Wie zu erwarten, sind auch bei diesem Objekt die Messungen in den hellen Bereichen systematisch länger als in den dunklen Bereichen. Die hohe Korrelation zwischen Intensitäts- und Entfernungsbild ist ebenfalls gegeben. Allerdings ist die Korrelation zwischen Monochrom- und Intensitäts- bzw. Entfernungsbild etwas schlechter als beim vorigen Beispiel. Grund dafür ist die Anordnung des TLS in Bezug auf die Marmorplatte. Während der Einfallswinkel bei Objekt 1 – wie erwähnt – nahezu horizontal ist, wurde Objekt 2 von unten mit einem Einfallswinkel von etwa 30° gescannt.

Tab. 1: Korrelationen nach Pearson (Linear) und Spearman (Rank) zwischen den Variablen Monochrom, Intensität und Distanzfehler in Prozent.

	Monochrom/Intensität		Monochrom/Distanz		Intensität/Distanz	
	Linear	Rank	Linear	Rank	Linear	Rank
<i>Objekt 1 Links</i>	62	74	61	62	95	82
<i>Objekt 1 Mitte</i>	89	88	82	69	96	83
<i>Objekt 1 Rechts</i>	56	70	59	60	94	81
<i>Objekt 2 Links</i>	63	46	63	53	95	94
<i>Objekt 2 Mitte</i>	78	65	78	73	95	94
<i>Objekt 2 Rechts</i>	64	47	59	51	93	92

Die Korrelationen zwischen Monochrom-, Intensitäts- und Entfernungsbild sind in Tab. 1 aufgelistet. Jedes Objekt wurde von 3 Standpunkten aus gescannt, einmal von jeder Seite (ca. 20°) und einmal von vorne. Dabei zeigt sich, dass der Standpunkt – und damit der Einfallswinkel – keine Auswirkung auf die Korrelation zwischen Intensität und Entfernungsbild hat. Die Korrelation zwischen den Bild- und Scannerdaten hingegen ist von der Seite deutlich schlechter als von vorne. Der Grund dafür ist, dass der Laserstrahl in das Material eindringt und durch Strukturen unter der Oberfläche teilweise „abgeschattet“ wird, während die Kamera – auch durch die homogene Beleuchtung – von diesem Phänomen nicht betroffen ist.

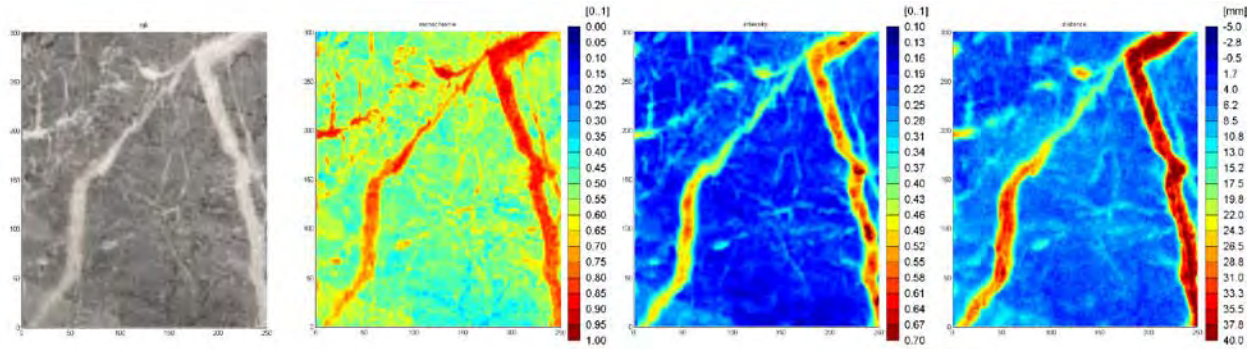


Abb. 4: Objekt 1 (Marmor: Fior di Pesco) – v.l.n.r.: RGB-Bild, monochromes Bild, Intensitätsbild (TLS), Distanz-Bild gegenüber Referenzebene (TLS)

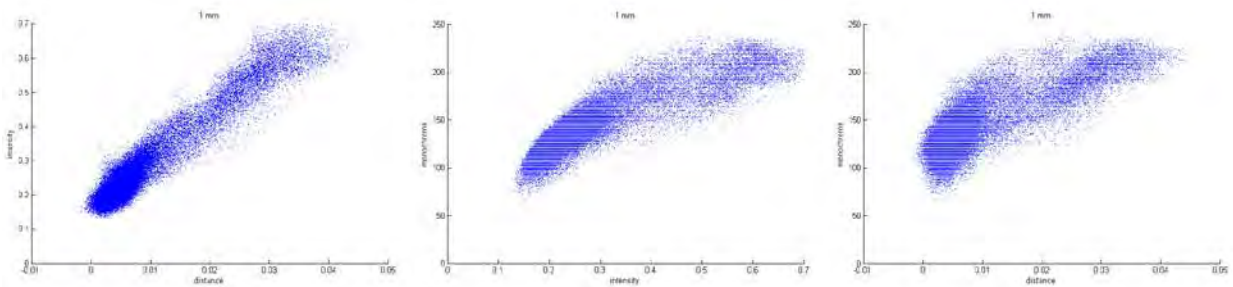


Abb. 5: Objekt 1 – Korrelation von Entfernung und Intensität (links), Intensität und monochromes Bild (mitte) sowie Entfernung und monochromes Bild (rechts)

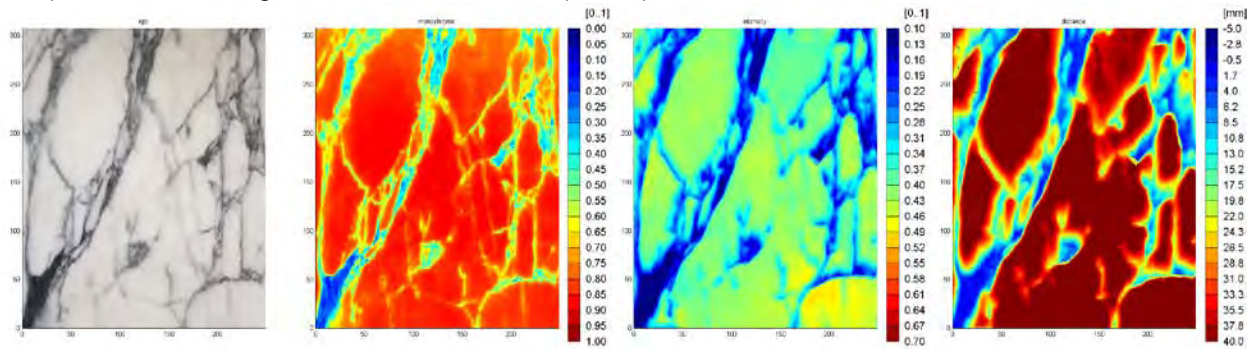


Abb. 6: Objekt 2 (Marmor: Carrara Arabescato) – v.l.n.r.: RGB-Bild, monochromes Bild, Intensitätsbild (TLS), Distanz-Bild gegenüber Referenzebene (TLS)

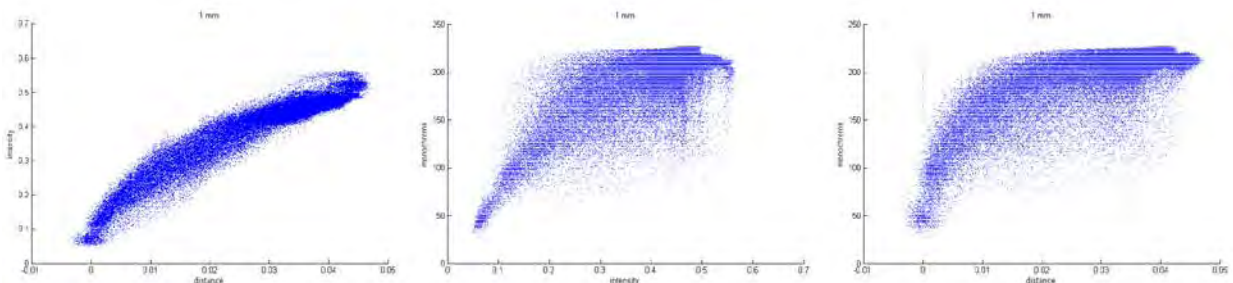


Abb. 7: Objekt 2 – Korrelation von Entfernung und Intensität (links), Intensität und monochromes Bild (mitte) sowie Entfernung und monochromes Bild (rechts)

Dieser Effekt ist auch in Abb. 6 (ganz rechts) zu sehen. Der Scannerstandpunkt ist vertikal unterhalb der Platte. Die Umrisse der dunklen Einschlüsse (blau) sind auf der scannerzugewandten Seite (untere Ränder) wesentlich schärfer als auf der abgewandten Seite (obere Ränder). Der systematische Entfernungsmessfehler ist somit abhängig vom Einfallswinkel.

Es bleibt zu untersuchen, ob es möglich ist, den materialbedingten Entfernungsmessfehler zu modellieren. Zu bestimmen ist unter anderem welche die wesentlichen Einflussgrößen sind (Oberflächenbeschaffenheit, chemische Zusammensetzung, Einfallswinkel, Wellenlänge), und wie zuverlässig sie sich bestimmen lassen, unabhängig von den Daten.

Da sich Licht in festen Materialien langsamer ausbreitet als in Luft, erscheint der Weg, den es in dem Material zurücklegt länger zu sein, als er tatsächlich ist. Bei Calcit (Brechungsindex 1,6) beispielsweise erscheint er etwa 60% länger. Das eindringende Licht wird in der kristallinen Struktur des Materials vielfach gebrochen und breitet sich über ein Volumen aus, dessen Projektion auf die Oberfläche auf ein Vielfaches des Footprints ausgedehnt ist. Dadurch ist es möglich, dass der systematische Entfernungsmessfehler ein Vielfaches der Stärke der Platte ausmachen kann. Wir konnten Fehler von 4 cm feststellen bei einer 0,7 cm starken Platte.

5 Schlussfolgerungen

Wie zahlreiche Praxisbeispiele belegen, sind Terrestrische Laser Scanner gut geeignet, um großflächige Objekte im Subzentimeter-Bereich zu erfassen und daraus Modelle abzuleiten. Was bislang jedoch meist vernachlässigt wird, ist die Interaktion mit dem Material. Jedem Benutzer von Laserscanning Technologie ist bewusst, dass Glasflächen oder Spiegel nicht unmittelbar erfasst werden können. Auch die Problematik von hochreflektierenden Materialien wie Gold oder Chrom sind bekannt. Bislang nicht hinlänglich untersucht sind jedoch lichtdurchlässige Materialien wie z.B. kristalline Gesteine.

An Hand von Anwendungsbeispielen haben wir die Auswirkung der Lichtdurchlässigkeit von Marmor auf die Entfernungsmessung von Laserscannern gezeigt. Im präsentierten Experiment wurde die Korrelation zwischen dem sichtbaren Erscheinungsbild von Marmoroberflächen und den systematischen Entfernungsmessfehlern näher untersucht. Es konnte gezeigt werden, dass eine hohe Korrelation besteht, insbesondere bei visueller Inspektion des Materials. Die konnte auch durch statistische Analysen bewiesen, wenngleich zahlreiche bislang nicht untersuchte Effekte (z.B. Kamera- versus TLS-Footprint) das Ergebnis beeinflussen.

Für den Einsatz von TLS insbesondere im Bereich der Kulturgutvermessung ist es daher unbedingt notwendig, vorab eine Analyse der zu erfassenden Materialien durchzuführen. Sollte Marmor gescannt werden müssen, so kann es unter Umständen möglich sein, die Problematik zu minimieren, indem die Aufnahmekonfiguration (Entfernung, Einfallswinkel, Laserenergie, etc.) entsprechend adaptiert wird. Generell hat sich herausgestellt, dass die Distanzmessfehler mit Helligkeit und Glattheit der erfassten Oberflächen zunimmt. Künstlich aufgeraute, bzw. verwitterte Oberflächen mit homogener Textur verursachen kleinere Fehler.

6 Danksagung

Diese Arbeit wurde von der Firma *Steinmetzbetriebe Bamberger* im Rahmen des Christian Doppler Labors *Räumliche Daten aus Laserscanning und Fernerkundung* unterstützt. Die Daten des Hadriantempels in Ephesos wurden im Rahmen des Projektes *Der Hadrianstempel an der Kuretenstraße in Ephesos*, durchgeführt vom *Österreichischen Archäologischen Institut*, finanziert vom *Fonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung* erfasst (Projekt-Nr. P 20947-G02, Projektleitung: Ursula Quatember, ÖAI Wien, Datenerfassung: Robert Kalasek, TU Wien). Die Steinplattensammlung wurde vom *Institut für Geotechnik, TU Wien*, zur Verfügung gestellt (Andreas Rohatsch).

7 Literaturverzeichnis

- ABMAYR, T., DALTON, G., HÄRTL, F., HINES, D., LIU, R., HIRZINGER, G., AND FRÖHLICH, C.: Standardization and visualization of 2.5D scanning data and color information by inverse mapping; in: Grün, A. and Kahmen, H. (eds.), Proc. of Optical 3-D Measurement Techniques VII, **1**, Vienna, Austria, 2005, 164-173.
- BERNARDINI, F., RUSHMEIER, H., MARTIN, I. M., MITTLEMAN, J., TAUBIN, G.: Building a Digital Model of Michelangelo's Florentine Pieta; IEEE Computer Graphics and Applications, January/February, 2002, 59-67.
- DORNINGER, P., NOTHEGGER, C., PFEIFER, N., MOLNÁR, G.: On-the-job detection and correction of systematic cyclic distance measurement errors of terrestrial laser scanners; Journal of Applied Geodesy, **2** (2008), 4; 191-204.
- GIELSDORF, F., RIETDORF, A., AND GRUENDING, L.: A concept for the calibration of terrestrial laser scanners; in: Proc. of FIG Working Week, Athens, Greece, 2004.
- GODIN, G., RIOUX, M., BERARDIN, J., LEVOY, M., COURNOYER, L., BLAIS, F.: An Assessment of Laser Range Measurement on Marble Surfaces, in Proc. of 5th Conference on Optical 3D Measurement Techniques; 2001, Vienna.
- LICHTI, D. D.: Error modeling, calibration and analysis of an AM-CW terrestrial laser scanner system; ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing **61**, **5** (2007), 307-324.
- NOTHEGGER, C., DORNINGER, P.: 3D Filtering of High-Resolution Terrestrial Laser Scanner Point Clouds for Cultural Heritage Documentation; PFG, **1** (2009), 53-63.
- SOTOODEH, S.: Outlier detection in laser scanner point cloud; in: Proc. of ISPRS Commission V Symposium, Image Engineering and Vision Metrology, Dresden, Germany, 2006.

Dokumentation des Gletscherrückgangs am Gössnitzkees (Schobergruppe, Hohe Tauern) für den Zeitraum 1988-2009 mittels terrestrischer Photogrammetrie

VIKTOR KAUFMANN¹

Zusammenfassung: Ab der Mitte des 19. Jhs. rücken Gletscher verstärkt in den Blickpunkt wissenschaftlicher Untersuchungen. Schon früh begann man Gletscher zu vermessen und in Karten darzustellen. Von besonderem Interesse war die Erfassung und Untersuchung ihrer raum-zeitlichen Veränderung. Als erste wirklich leistungsfähige Methode in der Gletschervermessung etablierte sich die terrestrische Photogrammetrie. Mit dem Aufkommen der Luftbildphotogrammetrie verlor sie jedoch schnell wieder an Bedeutung. Das derzeitige Methodenspektrum in der Gletschererfassung bzw. -kartierung ist breit gestreut und reicht von terrestrischen über flugzeuggestützte bis hin zu satellitengestützten Verfahren. In den vergangenen 10 Jahren eröffneten jedoch kostengünstige digitale Spiegelreflexkameras und leistungsfähige digital-photogrammetrische Arbeitsstationen neue Möglichkeiten des Einsatzes der terrestrischen Photogrammetrie für Zwecke der Gletschervermessung. Diese werden am praktischen Beispiel des Gössnitzkeeses, einem kleinen, stark schuttbedeckten Kargletscher in den Hohen Tauern der österreichischen Alpen, erörtert.

1 Einleitung

Im Zeitraum der letzten 100 Jahre hat sich die mittlere jährliche Lufttemperatur in den Alpen um durchschnittlich 1-2°C erhöht (KUHN, 2004). Die Auswirkungen dieser Klimaerwärmung sind mannigfaltig. Besonders augenscheinlich sind diese im alpinen Raum – die Gletscher schmelzen, mit zurückbleibenden Stein- und Geröllwüsten im nun gletscherfreien Bereich. Drastische Folgewirkungen des Gletscherrückgangs auf den Wasserhaushalt (Abfluss) und auch auf den Tourismus sind absehbar.

Ab etwa dem neuzeitlichen Gletscherhochstand von 1850, auch *Kleine Eiszeit* (engl. *Little Ice Age*) genannt, werden – insbesondere in den Alpen – Veränderungen in der Gletscherausdehnung gezielt messtechnisch erfasst. Das zu jener Zeit gerade junge Messverfahren der terrestrischen Photogrammetrie wurde ausgehend von der Bauaufnahme u.a. zur topographischen Kartierung von Hochgebirgsräumen weiterentwickelt. Einen Höhepunkt erreichte die terrestrische Photogrammetrie in der ersten Hälfte des 20. Jhs., wo im Rahmen von zahlreichen Expeditionen verschiedene Hochgebirgsräume der Erde und somit auch ihre Gletscherwelten kartographisch erfasst wurden (vgl. BRUNNER & WELSCH, 1999; MAYER, 2010). In den von S. Finsterwalder im Jahre 1913 ins Leben gerufenen Gletscherkursen wurde u.a. die terrestrische Photogrammetrie als Messmethode gelehrt (FINSTERWALDER, 1956). Mit der viel leistungsfähigeren Luftbildaufnahme war bald der Einsatz der terrestrischen Photogrammetrie für Hochgebirgs-

¹ Viktor Kaufmann, Institut für Fernerkundung und Photogrammetrie, Technische Universität Graz, Steyrergasse 30, A-8010 Graz; E-Mail: viktor.kaufmann@tugraz.at

anwendungen – bis auf einige Sonderanwendungen – obsolet geworden (KOSTKA, 2004; vgl. dazu auch KÄÄB, 2005). Zum jetzigen Zeitpunkt lassen kostengünstige Digitalkameras und moderne digital-photogrammetrische Auswertegeräte eine Renaissance der terrestrischen Photogrammetrie für Hochgebirgsanwendungen, insbesondere für räumlich beschränkte Gletscherstudien, vermuten (KAJUUTTI et al., 2010). Der vorliegende Beitrag soll diese Aussage untermauern.

2 Motivation

Im Rahmen des Gletschermessdienstes des Österreichischen Alpenvereins (ÖAV) werden derzeit 96 Gletscher in Österreich alljährlich messtechnisch erfasst, wenn auch nur mit meist einfachen Methoden (FISCHER, 2010). Von zahlreichen Gletschern werden auch alljährlich von denselben Photostandpunkten aus Vergleichsaufnahmen gemacht – in einigen Fällen auch bewusst Stereobildpaare (vgl. dazu PATZELT, 2009). Die Idee des Autors besteht nun darin, das momentan eingesetzte Methodenspektrum des österreichischen Gletschermessdienstes um die terrestrische Photogrammetrie zu erweitern. Glaziologisch relevante Parameter, wie z.B. Gletscherlängenänderung, Fließgeschwindigkeit und Eisdickenänderung, könnten durch Methoden der Bildmessung vergleichsweise leicht erfasst werden. Eine mögliche Akzeptanz dieser Messmethode in der Praxis wäre sicherlich mit einer nahezu vollständigen Automatisierung des Auswerteprozesses zu verknüpfen. Am Beispiel des Gössnitzkeeses soll vorerst gezeigt werden, dass die gesuchten Parameter mit ausreichender Genauigkeit aus terrestrisch-photogrammetrischen Aufnahmen handelsüblicher Digitalkameras abgeleitet werden können.

3 Gössnitzkees

3.1 Geographische Aspekte

Das Gössnitzkees ($12^{\circ}45'$ östl. L., $46^{\circ}58'$ nördl. B.) ist ein kleiner, stark schuttbedeckter Kargletscher im Talschluss des Gössnitztales der Schobergruppe, Hohe Tauern, österreichische Alpen (siehe Abb. 1). Die Gletscherfläche betrug 59 ha im Jahre 2006. Das Gössnitzkees weist nahezu kein Nährgebiet auf (vgl. Abb. 2) und wird größtenteils durch Lawinen aus der steilen Karumrahmung ernährt. Weitere Ausführungen zur Geographie des Studiengebietes finden sich in LIEB (1987).

3.2 Gletschergeschichte

Die Gletschergeschichte des Gössnitzkeeses seit 1850 bis 2006 wurde im Rahmen eines gemeinsamen Forschungsprojektes mit dem Institut für Geographie und Raumforschung der Universität Graz aus altem Kartenmaterial (1873, 1929), Luftbildzeitreihen (8 Epochen) und Geländebefunden (Moränenkartierung, Stand 1850) rekonstruiert. Die ermittelten Flächen- und Volumenänderungen werden in KAUFMANN & LIEB (2002) bzw. KAUFMANN & LADSTÄDTER (2008a) mitgeteilt. Die Gletscherausdehnung hat sich seit 1850 um beachtliche 62.2% verringert. Aus den photogrammetrischen Vergleichsmessungen 1997-2006 wurde eine mittlere Höhe der Gleichgewichtslinie (HGL) von 3023 m bestimmt. Der ermittelte Wert weist in eindeutiger Art

und Weise darauf hin, dass bei derzeit gleich bleibenden Klimaverhältnissen das Gössnitzkees noch vor Mitte dieses Jhs. verschwunden sein wird. Der stete Gletscherrückgang seit 1850 wurde u.a. in einer Computeranimation anschaulich visualisiert (KAUFMANN & PLÖSCH, 2001).

3.3 Geodätische Gletscheraufnahmen

Im Jahre 1982 wurde das Gössnitzkees erstmals in das Gletschermessnetz des ÖAV eingebunden (LIEB & KAUFMANN, 1984). Die vergleichsweise einfachen Gletscherlängenmessungen wurden bis heute alljährlich durchgeführt. In den letzten Jahren hat M. Krobath (Institut für Geographie und Raumforschung, Universität Graz) die Messungen ausgeführt.

Eine erste tachymetrische Aufnahme der Gletscherstirn, von Punkten zur Ableitung der Fließgeschwindigkeit und eines repräsentativen Längsprofils erfolgte 1996 in Kooperation mit dem jetzigen Institut für Positionierung und Navigation der TU Graz (KIENAST & KAUFMANN, 2004). Dieses Messprogramm wurde bis heute alljährlich wiederholt und in Teilen sogar im Umfang erweitert. Aus den Messergebnissen können nicht nur glaziologisch relevante Informationen abgeleitet werden, sondern sie dienen auch zur Validierung der Ergebnisse anderer Messverfahren, wie z.B. der terrestrischen Photogrammetrie und des terrestrischen Laserscannings.

4 Terrestrisch-photogrammetrische Aufnahmen

Terrestrisch-photogrammetrische Aufnahmen des Gössnitzkeeses erfolgten 1988, 1997 und ab 2003 im Jahresabstand mit unterschiedlichen analogen und digitalen Kamerasystemen (siehe Tab. 1). Die Erstaufnahme im Jahre 1988 wurde durch Prof. R. Kostka, TU Graz, unter Mitwirkung des Autors mit einem Phototheodoliten TAL von Zeiss durchgeführt. Eine photogrammetrische Standlinie (Basislänge 122 m, Endpunkte L88 und R, vgl. Abb. 1 und Abb. 3) wurde am Gegenhang angelegt, um den zentralen Teil des Gletschers möglichst gut erfassen zu können. Wiederholungsaufnahmen (1997, 2003) erfolgten mit einer semi-metrischen Réseaukamera und dann in weiterer Folge mit vier verschiedenen handelsüblichen, nicht-metrischen Digitalkameras. Die Nikon-Kameras sind kostengünstige Amateurkameras.

Tab. 1: Photographische Aufnahmesysteme

Jahr	Aufnahmesystem	Art	Bildaufzeichnung
1988	TAL (HUBENY, 1948)	metrisch	photographische Glasplatte (6.5 cm x 9 cm)
1997	Rolleimetric 6006	semi-metrisch	Farbpositivfilm (6 cm x 6 cm)
2003 & 2004	Rolleimetric 6006		
	Nikon D100	nicht-metrisch	CCD-Sensor (6 Megapixel)
2005	Nikon D100		
2006	Hasselblad H2D-39	nicht-metrisch	CCD-Sensor (39 Megapixel)
	Nikon D100		
2007	Nikon D80	nicht-metrisch	CCD-Sensor (12 Megapixel)
2008	Nikon D300	nicht-metrisch	CCD-Sensor (12 Megapixel)
2009	Nikon D300		

5 Photogrammetrischer Auswerteprozess

Die photogrammetrische Auswertung des vorliegenden Bildmaterials beruht auf einer Einzelmodellorientierung radiometrisch und geometrisch vorverarbeiteter Bilder auf einer digital-photogrammetrischen Arbeitsstation (ImageStation von Intergraph). Ziel der geometrischen Vorverarbeitung ist es, aus den Originalaufnahmen, welche mit Bildfehlern behaftet sind, ideale zentralperspektivische Bilder abzuleiten. Diese Vorgangsweise erleichtert den photogrammetrischen Orientierungsprozess wesentlich, da die Wiederherstellung der *inneren Orientierung* auf einige Parametereingaben bzw. Messungen (Rahmenmarken der TAL) reduziert werden kann. Die Vorverarbeitungsschritte für die einzelnen Aufnahmesysteme (analog, digital, metrisch, semi-metrisch, nicht-metrisch) sind unterschiedlich und wurden bereits detailliert in mehreren Publikationen (KAUFMANN & LADSTÄDTER, 2004; KAUFMANN & LADSTÄDTER, 2008b; vgl. auch LADSTÄDTER & KAUFMANN, 2004 und 2005) erörtert. Im Rahmen dieser Publikation wird speziell nochmals auf die Kalibrierung der digitalen Aufnahmesysteme hingewiesen.

5.1 Geometrische Vorverarbeitung

Die Hasselblad H2D-39 und die Nikon-Kameras wurden mehrmals einer Testfeldkalibrierung unterzogen. Für den praktischen Einsatz werden Objektive mit festen Brennweiten verwendet. Die Fokussierung erfolgt i. Allg. auf „Anschlag“ (Einstellung auf Unendlich). Kamera-kalibrierungen wurden mit dem 3D-Passpunktfeld von Microsoft Photogrammetry Graz und einem ebenen Passpunktfeld von PhotoModeler (EOS Systems Inc.) durchgeführt (vgl. dazu auch FAUNER et al., 2008). Für die praktische Arbeit hat sich die Kalibrierung mit dem ebenen Passpunktfeld unter Verwendung der Software PhotoModeler 6.0 bewährt. Für die optimale geometrische Korrektur von stark verzeichneten Bildern wird die von PhotoModeler berechnete Verzeichnungsfunktion nachträglich balanciert.

Ein weiterer geometrischer Vorverarbeitungsschritt beinhaltet die Korrektur der chromatischen Aberration. Diese Korrektur kann i. Allg. bereits durch Anwendersoftware (Hasselblad FlexColor, Nikon Capture NX) der Kamerahersteller z.B. bei der Konvertierung von Rohdaten in allgemeine Bildformate berücksichtigt werden. Für die Kamera Nikon D100 wurde die Bildpunktversetzung zufolge chromatischer Aberration für ausgewählte Objektive ermittelt und auch ein entsprechendes geometrisches Korrekturmodell entwickelt (KAUFMANN & LADSTÄDTER, 2005).

Für die geometrische Umbildung der Ausgangsbilder in die gewünschte Sollgeometrie (strenge Zentralprojektion, registrierte Farbkanäle, Bildhauptpunkt in der Bildmitte, quadratische Bildelemente) wurde das institutseigene Programm DISTCORR entwickelt.

5.2 Photogrammetrische Orientierung

Der photogrammetrische Orientierungsvorgang beschränkt sich der Einfachheit halber – wie bereits oben erwähnt – auf einzelne Stereomodelle. Als Referenzmodell dient das Rolleimetric 6006-Stereomodell des Jahres 2003, welches mit den zum selben Zeitpunkt geodätisch gemessenen Passpunkten im Landeskoordinatensystem orientiert wurde. In diesem Modell wurden 55 photogrammetrische Einpasspunkte, das sind stabile Punkte im Gletschervorfeld bzw.

in den Felswänden oberhalb des Gletschers, für die absolute Orientierung der übrigen Stereomodelle gemessen. Da die Modellorientierung über eine Bündelblockausgleichung gerechnet wird, können etwaige Restfehler in der inneren Orientierung gut kompensiert werden. Aufgrund der ungünstigen Modellgeometrie liefert eine Selbstkalibrierung jedoch keine signifikanten Ergebnisse. Abb. 4 zeigt ein orientiertes Stereomodell des Jahres 2007.

5.3 Photogrammetrische Kartierung

Die 3D-Datenerfassung beschränkt sich auf einen für den Gletscher repräsentativen Teil, und zwar vom vorgelagerten Gletschersee über den zentralen Mittelteil des Gletschers bis oberhalb des Bergschrunds (vgl. Abb. 6). Erfasst werden durch interaktive Messung am Stereobildschirm folgende Elemente: sichtbarer Gletscherrand, Bergschrund, markante Höhen- und Tiefenlinien, Oberflächenpunkte im exakten 5m-Raster sowie weitere Einzelpunkte, und eventuell vorhandene Schneeflächen. Diese Daten dienen in weiterer Folge zur Berechnung eines digitalen Geländemodells mit einer Rasterweite von 2.5 m. Für die Berechnung der Fließgeschwindigkeit des Gletschers werden ausgewählte Punkte (Ecken von größeren Felsblöcken) koordinativ erfasst. Während eine 3D-Situationsauswertung im unmittelbaren Gletscherbereich und in den steilen Karwänden ohne Probleme möglich ist, ist im Nahbereich zufolge des flachen Geländes und der großen Tiefenunterschiede eine diesbezügliche Auswertung nahezu unmöglich.

6 Genauigkeitspotential

Das hohe Genauigkeitspotential des vorgestellten terrestrisch-photogrammetrischen Verfahrens wurde mit einer zeitgleichen Luftbildauswertung (1997) und mehreren geodätischen Vergleichsmessungen überprüft. Numerische Zahlenangaben sind der Abb. 5 zu entnehmen. Auffallend ist, dass die photogrammetrisch ermittelten Profillinien (sichtbare Schuttoberfläche) im Vergleich zu den vorgegebenen geodätischen Sollprofilen (Eisoberkante) stets um 10-20 cm zu hoch liegen, was nicht verwunderlich ist. Der RMSE-Wert (Standardabweichung) liegt z.B. bei den Nikon-Kameras bei durchschnittlich $\pm 10-15$ cm.

7 Ergebnisse

Tab. 2: Änderung der Eisdicke und der Gletscherlänge für das Gössnitzkees (Schobergruppe)

Zeitintervall	mittlere Eisdickenänderung ⁺	Gletscherlängenänderung ⁺⁺
1988-1997 ^a	-1.51 m/Jahr	-87.6 m (= -9.7 m/Jahr)
1997-2003 ^b	-2.03 m/Jahr	-60.2 m (= -10.0 m/Jahr)
2003-2007 ^c	-1.52 m/Jahr	-15.9 m (= -4.0 m/Jahr)
2007-2008 ^d	-1.35 m/Jahr	-2.4 m/Jahr
2008-2009 ^e	-1.58 m/Jahr	-2.8 m/Jahr
1988-2009 ^f	-1.60 m/Jahr	-167.7 m (= -8.0 m/Jahr)

^aStereomodelle TAL & Rolleimetric 6006

^bStereomodelle Rolleimetric 6006

^cStereomodelle Nikon D100 & Nikon D80

^dStereomodelle Nikon D80 & Nikon D300

^eStereomodelle Nikon D300

^fStereomodelle TAL & Nikon D300

⁺Höhenzone 2530-2560 m

⁺⁺Messung in Richtung des Längsprofils

Aus den multitemporalen Datensätzen wurden mittlere jährliche Gletscherlängen- und Eisdickenänderungen (vgl. Tab. 2) abgeleitet. Abb. 5 zeigt eine Visualisierung der aus den terrestrisch-photogrammetrisch ermittelten digitalen Geländemodellen interpolierten Profillinien. Eine thematische Karte (Abb. 6) zeigt die Eisdickenänderung flächendeckend für den Zeitraum 1988-2009. Zusätzlich wurden weitere glaziologische Kenngrößen ermittelt (Abb. 7).

8 Resümee und Ausblick

Aus den Genauigkeitsuntersuchungen geht hervor, dass die mittlere jährliche Eisdickenänderung des Gössnitzkeeses z.B. unter Verwendung kostengünstiger Spiegelreflexkameras mit einer Genauigkeit von ca. $\pm 15\text{-}20$ cm möglich ist, was einem Relativfehler (bei anhaltend gleichem Gletscherschwund) von ca. 10% entspricht. Das Anwendungsgebiet der vorgestellten Methode liegt im Monitoring kleinräumiger Gletscher bzw. von ausgewählten Gletscherbereichen wie z.B. von Zungenenden, wobei im Modellbereich genügend viele identische Punkte in stabilen Geländeabschnitten vorhanden sein müssen.

Das Ergebnis der terrestrisch-photogrammetrischen Zeitreihenanalyse zeigt klar auf, dass das Gössnitzkees in den vergangenen 21 Jahren kontinuierlich an Masse verloren hat. Die glaziologisch relevante Gleichgewichtslinie liegt derzeit höhenmäßig oberhalb der gesamten Gletscherfläche. Sollte der aktuelle Trend in der Eisdickenänderung (Mittel bei -1.5 m/Jahr) anhalten, so ist mit dem Verschwinden des Gössnitzkeeses bis zum Jahre 2030 zu rechnen, was auch mit einer nahezu vollständigen Entgletscherung der Schobergruppe einhergehen sollte.

9 Literaturverzeichnis

- BRUNNER, K. & WELSCH, W.M. (Hrsg.), 1999: Hochgebirgs- und Gletscherforschung: Zum 100. Geburtstag von Richard Finsterwalder. Schriftenreihe Studiengang Vermessungswesen, Heft 62, Universität der Bundeswehr München, Neubiberg, 114 S.
- FAUNER, A., LADSTÄDTER, R. & KAUFMANN, V., 2008: Geometric Calibration of the Hasselblad H3D Medium Format Camera. IAPRS, Vol. XXXVII, Part B1, Proceedings of the 21st Congress of ISPRS, Beijing, China, p. 1077-1082.
- FINSTERWALDER, R., 1956: Geschichte der alpinen Gletscherkurse. Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie, Band III, Heft 2, Innsbruck, S. 257-261.
- FISCHER, A., 2010: Gletscherbericht 2008/2009. Bergauf, 2, 2010, Jahrgang 65 (135), S. 24-31.
- HUBENY, K., 1948: Die leichte Feldausrüstung TAL und der Kleinautograph. Alpenfotogrammetrie-Mitteilungen, Heft 3, 37 S.
- KAJUUTTI, K., PITKÄNEN, T., HAGGRÉN, H. & PELLIKKA, P., 2010: Terrestrial photogrammetry in glacier studies. In: PELLIKKA, P. & REES, W.G. (Eds.), 2010: Remote Sensing of Glaciers: Techniques for Topographic, Spatial and Thematic Mapping of Glaciers. CRC Press/Balkema, S. 99-113.
- KÄÄB, A., 2005: Remote Sensing of Mountain Glaciers and Permafrost Creep. Schriftenreihe Physische Geographie Glaziologie und Geomorphodynamik, 48, Universität Zürich, 264 S.
- KAUFMANN, V. & PLÖSCH, R., 2001: Reconstruction and visualization of the retreat of two cirque glaciers in the Austrian Alps since 1850 – From static maps towards dynamic computer animation. Kartographische Bausteine, 18, Technische Universität Dresden, S. 239-253.

- KAUFMANN, V. & LIEB, G.K., 2002: Investigations on the retreat of two small cirque glaciers (Goessnitzkees and Hornkees) in the Austrian Alps, Europe. High-Mountain Remote Sensing Cartography 1998 – Proceedings of the 5th Intl. Symposium of the Use of Remote Sensing Data in Mountain Cartography, Karlstad University Studies 2002:27, p. 75-82.
- KAUFMANN, V. & LADSTÄDTER, R., 2004: Documentation of the retreat of a small debris-covered cirque glacier (Goessnitzkees, Austrian Alps) by means of terrestrial photogrammetry. Proceedings of the 4th ICA Mountain Cartography Workshop, Vall de Núria, Monografies tècniques 8, Institut Cartogràfic de Catalunya, Barcelona, p. 65-76.
- KAUFMANN, V. & LADSTÄDTER, R., 2005: Elimination of color fringes in digital photographs caused by lateral chromatic aberration. Proceedings of the XX Int. Symposium CIPA 2005, Turin, Italy, Vol. 1, p. 403-408.
- KAUFMANN, V. & LADSTÄDTER, R., 2008a: Documentation of the Retreat of Gössnitzkees and Hornkees Glaciers (Hohe Tauern Range, Austria) for the Time Period 1997-2006 by Means of Aerial Photogrammetry. Proceedings of the 6th ICA Mountain Cartography Workshop "Mountain Mapping and Visualisation", Lenk, Switzerland, p. 115-123.
- KAUFMANN, V. & LADSTÄDTER, R., 2008b: Application of Terrestrial Photogrammetry for Glacier Monitoring in Alpine Environments. IAPRS, Vol. XXXVII, Part B8, Proceedings of the 21st Congress of ISPRS, Beijing, China, p. 813-818.
- KIENAST, G. & KAUFMANN, V., 2004: Geodetic measurement on glaciers and rock glaciers in the Hohe Tauern National Park (Austria). Proceedings of the 4th ICA Mountain Cartography Workshop, Vall de Núria, Monografies tècniques 8, Institut Cartogràfic de Catalunya, Barcelona, p. 101-108.
- KOSTKA, R., 2004: Zur Methodik der photogrammetrischen Arbeiten Erwin Schneiders. In: Arbeiten aus Nepal: Erwin Schneider zum Gedächtnis. Hochgebirgsforschung, Band 9, Arbeitsgemeinschaft für Vergleichende Hochgebirgsforschung, München, Universitätsverlag Wagner, Innsbruck, S. 41-65.
- KUHN, M., 2004: Die Reaktion der österreichischen Gletscher und ihres Abflusses auf Änderungen von Temperatur und Niederschlag. Österr. Wasser- und Abfallwirtschaft, O/19, 56 Jg., Heft 1-2, 7 S.
- LADSTÄDTER, R. & KAUFMANN, V., 2004: Change detection of a mountain slope by means of ground-based photogrammetry: A case study in the Austrian Alps. Proceedings of the 4th ICA Mountain Cartography Workshop, Vall de Núria, Monografies tècniques 8, Institut Cartogràfic de Catalunya, Barcelona, p. 77-88.
- LADSTÄDTER, R. & KAUFMANN, V., 2005: Terrestrisch-photogrammetrische Dokumentation des Blockgletschers im Äußeren Hohebenkar. In: CHESI, G. & WEINOLD, TH. (Hrsg.), 2005: Internationale geodätische Woche Obergurgl 2005, Herbert Wichmann Verlag, S. 92-101.
- LIEB, G.K. & KAUFMANN, V., 1985: Vier Jahre Gletschermessung in der Schobergruppe. Kärntner Naturschutzblätter, 24, S. 123-135.
- LIEB, G.K., 1987: Die Gletscher und Blockgletscher im Kärntner Teil der Schobergruppe und ihre Entwicklung seit dem Spätglazial. Unpubl. Doktorarbeit, Universität Graz, 286 S.
- MAYER, CH., 2010: The early history of remote sensing of glaciers. In: PELLIKKA, P. & REES, W.G. (Eds.), 2010: Remote Sensing of Glaciers: Techniques for Topographic, Spatial and Thematic Mapping of Glaciers. CRC Press/Balkema, S. 67-80.
- PATZELT, G., 2009: Gletscherbericht 2007/2008. Bergauf, 2, 2009, Jahrgang 64 (134), S. 18-25.

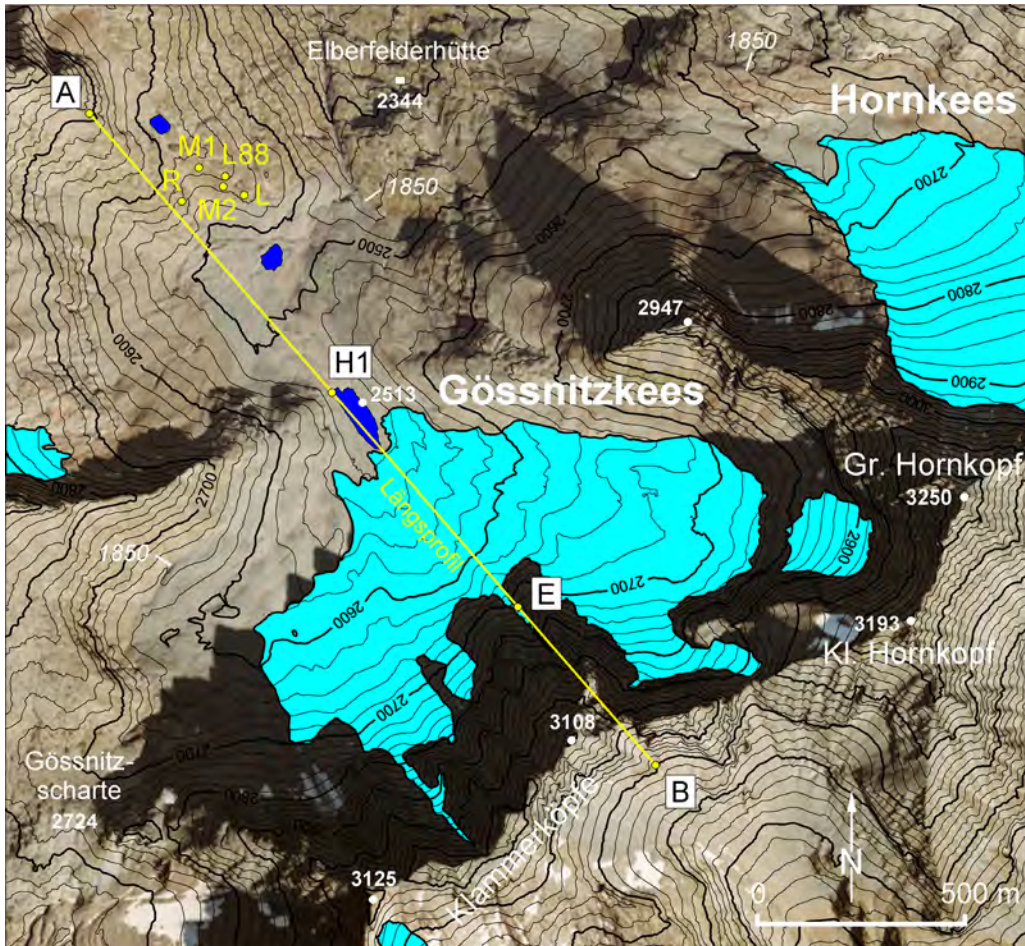


Abb. 1: Orthophoto (21.9.2006, Bildquelle: BEV, Wien) des Talschlusses des Gössnitztales. Gletscherflächen sind in Cyan und Wasserflächen in Blau dargestellt. Der neuzeitliche Gletscherhochstand von 1850 ist angedeutet. Die photogrammetrischen Standpunkte und das Gletscherlängsprofil sind in Gelb gehalten. H1 markiert den Standpunkt für die alljährliche tachymetrische Gletscheraufnahme. Vgl. dazu Abb. 3.

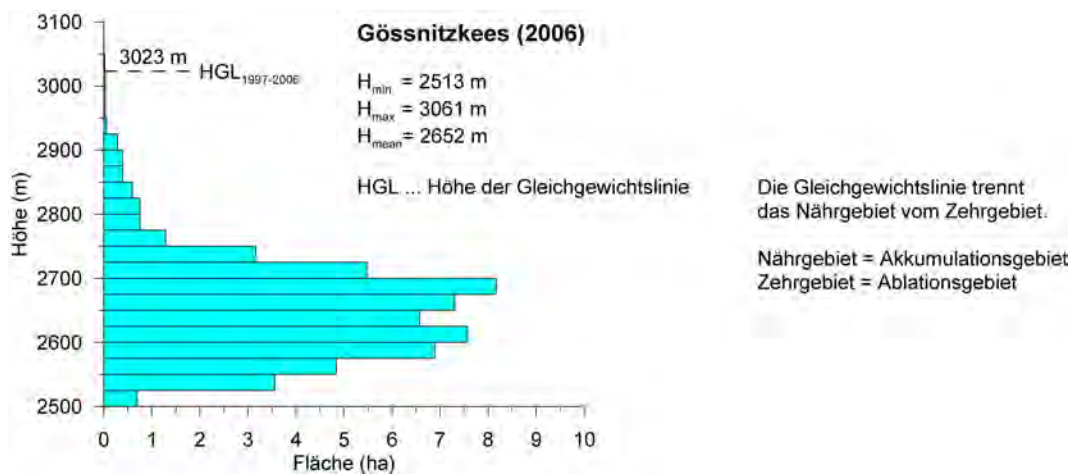


Abb. 2: Flächen-Höhenverteilung des Gössnitzkeeses in 25m-Stufen

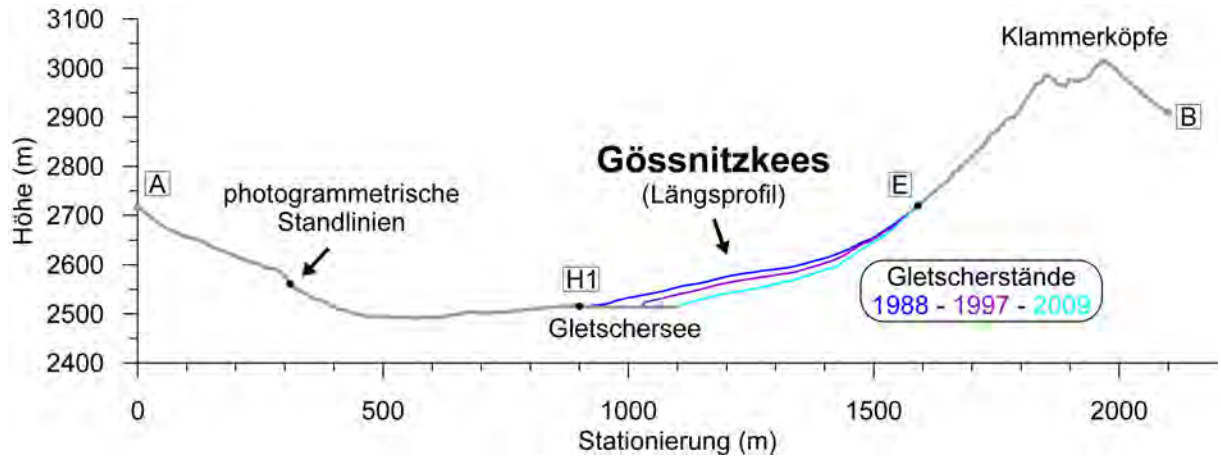


Abb. 3: Darstellung des Längsprofils (Schnitt A-H1-E-B). Die Gletscherstände wurden terrestrisch-photogrammetrisch abgeleitet. Die Geländeinformation stammt aus einer Luftbildauswertung.

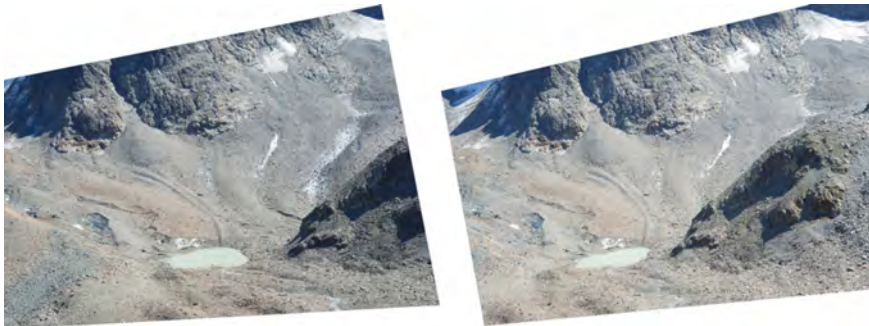


Abb. 4: Stereogramm (25.8.2007, Standlinie M1-R, Kamera Nikon D80 mit 50mm-Objektiv)

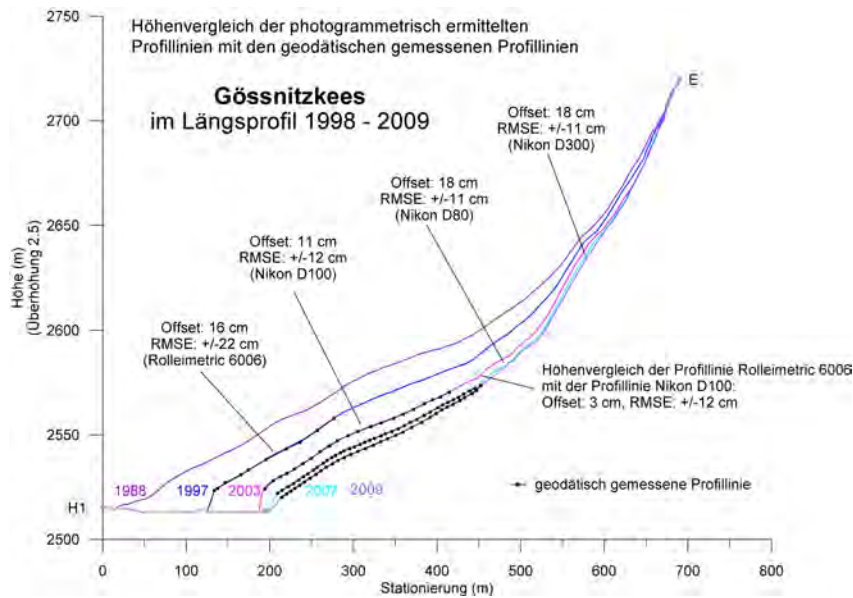


Abb. 5: Darstellung der Eisdickenänderung am Gössnitzkees entlang des Längsprofils (H1-E)

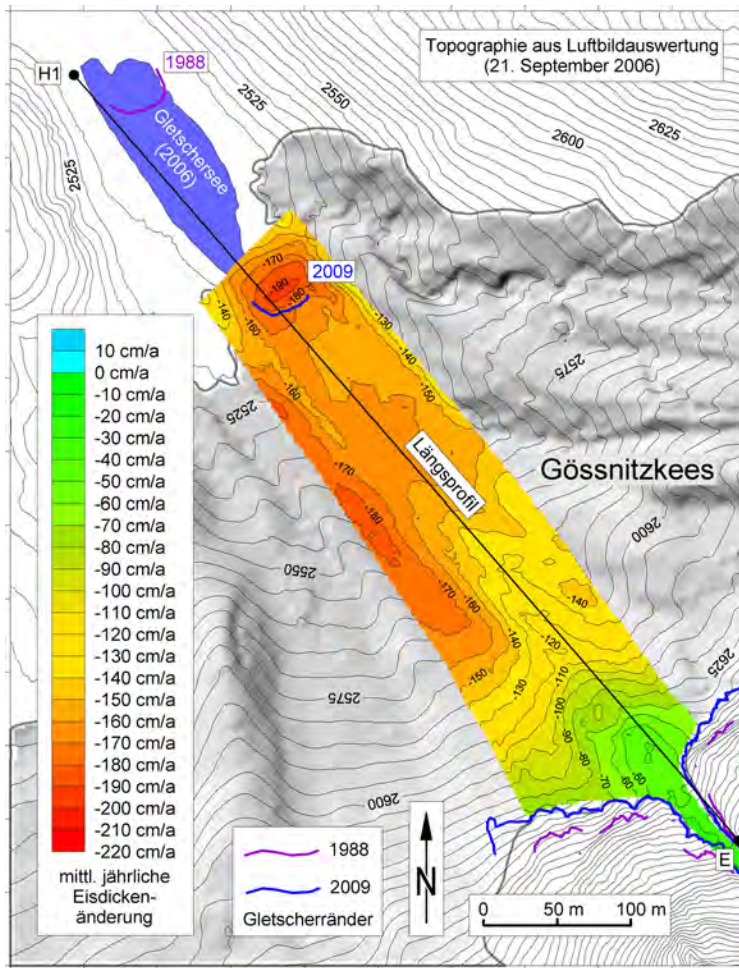


Abb. 6: Thematische Karte der terrestrisch-photogrammetrisch ermittelten Eisdickenänderung am Gössnitzkees für den Zeitraum 1988-2009.

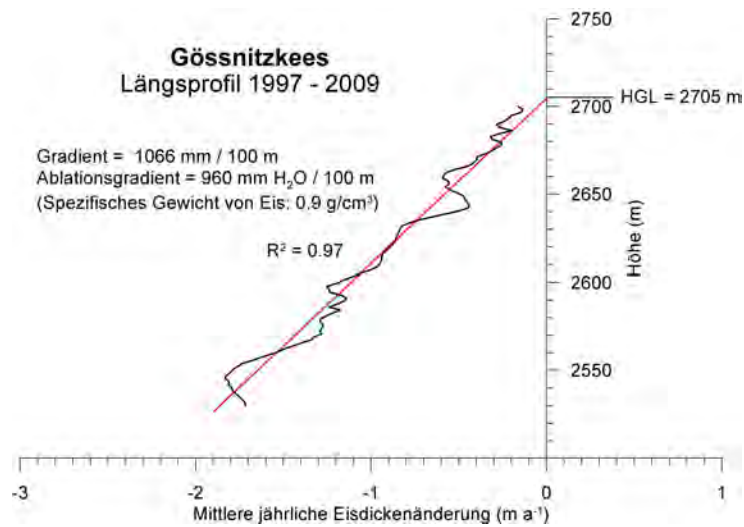


Abb. 7: Berechnung der Höhe der Gleichgewichtslinie (HGL) durch lineare Regression

Processing, geocoding and mosaicking of MiSAR data

CHRISTOPHE MAGNARD¹, MAX FRILOUD¹ & ERICH MEIER¹

EADS MiSAR ist ein Miniatur FM-CW Ka-Band SAR-System, entwickelt für UAV-Plattformen wie dem Deutschen LUNA-System. MiSAR kann Echtzeit ("Video-ähnliche") SAR-Bilder liefern. In diesem Modus werden SAR-Bilder mit einer Rate von ~1 Hz erzeugt, mit einem Überlappungsbereich von ~90% zwischen aufeinander folgenden Bildern. Im vorliegenden Artikel wird ein Ansatz präsentiert, wie aufeinander folgende Bilder sequenziell, mit Hilfe von Flugzeug-Navigationsdaten, einem Geländemodell sowie den Range-Doppler Gleichungen geokodiert werden. Das Resultat der anschließenden Mosaikierung ist ein Bildstreifen beliebiger Länge. Um eine optimale Grundlage für Geokodierung bereitzustellen wurde eigens ein neues, SPECAN-basiertes Fokussierungsverfahren implementiert, welches aus den "range-komprimierten" Daten die benötigten Einzelbilder samt geometrischen Parametern liefert. Die Ergebnisse zeigen eine gute Fokussierungsqualität sowie eine sehr hohe Geokodierungs-Genauigkeit. Die Implementierung erlaubt eine Geokodierung/Mosaikierung auf beliebige geodätische und kartographische Referenzsysteme.

1 Introduction

EADS² MiSAR³ is a miniature FM-CW⁴ Ka-band SAR system developed for Unmanned Aerial Vehicle (UAV) platforms such as the German LUNA system. MiSAR is capable of providing near-real-time ("video-like") SAR images. In this video-like mode, SAR images are generated at a rate of ~1 Hz, with an overlap area of ~90% between successive images.

An approach using coregistration of successive images to reconstruct the whole scene is presented in SAUR et al. 2007. However this method has some limitations: the coregistration does not work well in low-contrast areas. In such cases, coregistration errors in one patch propagate to all the following patches (see Figure 1), and the recovered geometry is not well defined and does not properly account for the topography. Our approach is thus to sequentially geocode the patches using the airplane navigation data, a reference DEM (or a constant height if not available) and the range-Doppler equations. This approach avoids the danger of error propagation and delivers a geocoded image, i.e. an image referenced to a standard map geometry, which is highly desired for operational activities.

1) Remote Sensing Laboratories, Department of Geography, University of Zurich, Winterthurerstrasse 190, CH - 8057 Zurich Switzerland, christophe.magnard@geo.uzh.ch

2) European Aeronautic Defence and Space company

3) Miniature Synthetic Aperture Radar

4) Frequency Modulated Continuous Wave

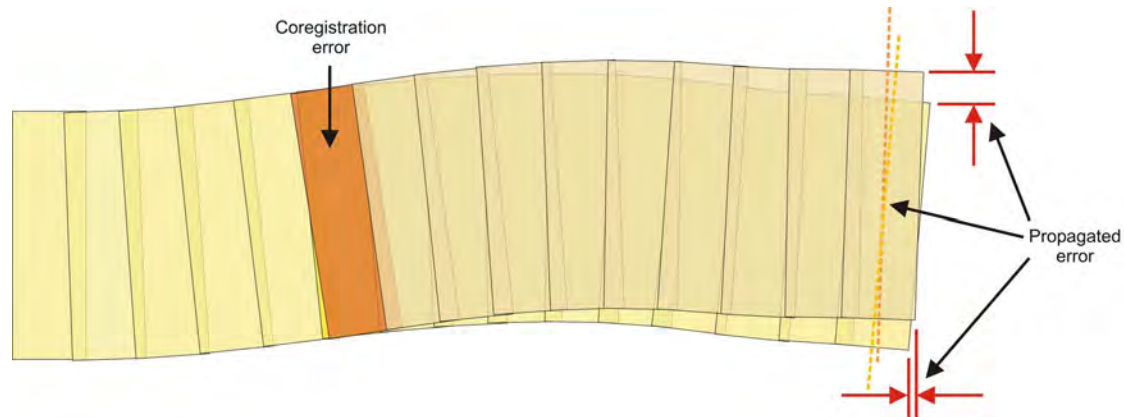


Fig. 1: Propagation of an error using the coregistration technique of assembling successive patches.

2 Method

The segment-wise geocoding approach was first tested on the focused video-like SAR images that were provided. This attempt was unsuccessful since some of the required meta-data used for during the original image processing were missing. Thus, we decided to additionally work with the provided range compressed (RC) data of the whole scene. For this purpose, we had to implement a focusing algorithm comparable to the one used to generate the video-like images, i.e. a SPECAN focusing algorithm (LANARI et al. 1998).

2.1 Navigation data post-processing

The navigation data come from conventional GPS and INS systems. The data from both systems are merged in real-time; we only have access to these partially processed data. These data show some non-linearities, which require smoothing to prevent errors in the motion compensation step. This is achieved using Kalman filtering of the navigation data (KALMAN 1960).

2.2 SPECAN processing algorithm

MiSAR is designed to be used on a UAV, i.e. a very light airborne platform which is strongly influenced by atmospheric turbulence and could be operationally used on non-linear flight tracks. Processing data collected along such irregular flight tracks, and additionally using a very short wavelength such as Ka-band, may range from difficult to impossible with conventional stripmap processing algorithms: motion compensation methods can only handle relatively low departures from a straight flight path and constant velocity. Such data could be processed with a time-domain back projection algorithm, but this method is very time consuming and thus could be very difficult to use for delivering real-time video-like images. Alternatively, the data can be divided into many sub-segments with near-linear flight paths. Those segments can then be separately processed and reassembled in a post-processing step.

The SPECTral ANalysis (SPECAN) algorithm is a computationally efficient method for processing the azimuth segments, and it has the advantage to intrinsically deliver a focused image with a larger azimuth extent compared to the input burst azimuth extent, i.e. delivering a focused image for nearly the entire illuminated region, even in the azimuth dimension. In our case, with bursts smaller than 1 second and MiSAR's azimuth beam-width of about 14° , this extent is more than ten times larger. This permits a large overlap between consecutive focused images without overlap of the input burst. Obtaining comparable images with other stripmap processing methods such as range-Doppler, Ω -k or chirp scaling would be computationally much more complex.

The basics of SPECAN are described e.g. in CUMMING & WONG 2005 or CURLANDER & MCDONOUGH 1991. These references are suited for the processing of SAR configurations with a small antenna beam-width and usually also for a small or even zero squint angle (typically for spaceborne data taken in ScanSAR mode). Very little literature is found about SPECAN applied to airborne SAR processing. Concerning azimuth processing, the most important assumption made in SPECAN is that the Doppler rate f_{Ra} is constant for any target during its whole integration time and that this rate is also the same for all targets at the same slant range. While the Doppler centroid f_{Dc} is deduced from the navigational data, the Doppler rate is taken as its instantaneous value for a target at a given slant range r and a given squint angle θ_{sq} associated with the Doppler centroid relative to the linearized track. At a carrier wavelength λ and for a linearized velocity v and at a slant range r , the Doppler rate is linked to the Doppler centroid as follows:

$$f_{Dc} = \frac{2 \cdot v \cdot \sin(\theta_{sq})}{\lambda} \quad (1)$$

$$f_{Ra} = -\frac{2 \cdot (v \cdot \sin(\theta_{sq}))^2}{\lambda \cdot r} \quad (2)$$

With the previously mentioned constant Doppler rate assumption, all the targets at the same slant range have a similar Doppler history. In a diagram of f_{Dc} versus the azimuth time t_a these histories are represented by straight lines with slope f_{Ra} (ramps). The principle of SPECAN is based on the observation that the position of any target (or equivalently its azimuth time) is uniquely determined by its frequency value at some reference time. This equivalence makes it possible to reduce the processing to 2 steps only, namely the de-ramping and the spectral analysis. The de-ramping transforms the Doppler history into constant frequency lines, and the spectral analysis maps these frequency components to the azimuth time.

In our approach the spectral analysis is performed through a Scaled Fourier Transform as described in LANARI et al. 1998. Compared to the simplest variant of SPECAN using a simple Fourier Transform, this has the advantages of producing images with range-independent azimuth pixel spacing Δa , thus avoiding the need of interpolating the data at the final stage, and of making it possible to adjust Δa through the adjustment of a scale factor.

A flowchart of the SPECAN-based azimuth focusing algorithm used for the processing of MiSAR data is shown in Figure 2. The most important steps prior to the focusing itself are the track linearization i.e. performing a first order motion compensation and the range cell migration correction, which is performed in the range-Doppler domain. The Scaled Fourier Transform is performed via fast-convolution using the Chirp-Z Transform. Filters are used to reduce side-lobe effects. The image is delivered in a nonzero-Doppler centroid geometry.

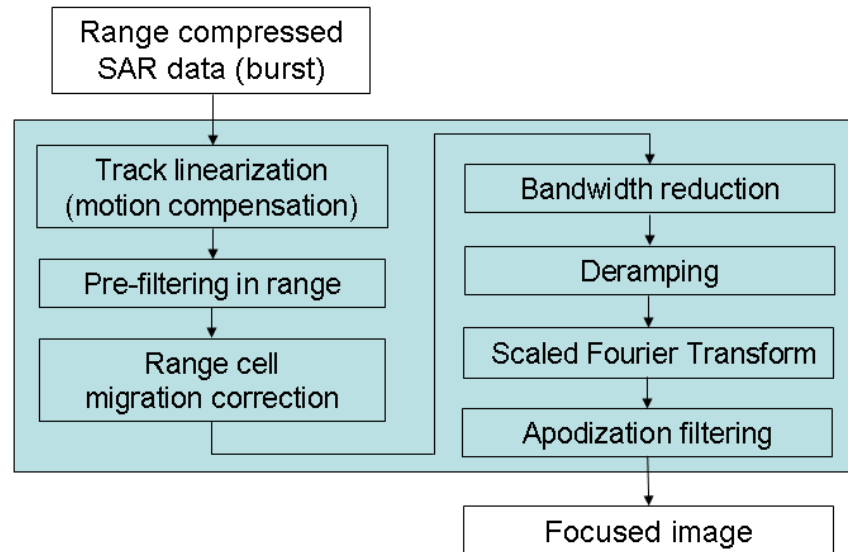


Fig. 2: Flowchart of the SPECAN implementation for azimuth focusing of the range compressed burst data.

2.3 Mosaicking and geocoding

Mosaicking and geocoding proceed as follows:

- A first short burst of data is cut from the RC data, i.e. a pre-determined azimuth segment over the complete range, and focused using the SPECAN algorithm (Fig. 3a and 3b).
- The central azimuth region of the focused sub-image is extracted (Fig. 3c).
- A set of points around the perimeter of this central region is projected into a map geometry using a forward geocoding algorithm (Fig. 3d).
- A region of interest containing the coordinates of the geocoded points plus a margin can then be defined (Fig. 3e).
- A regular grid in local map coordinates is created in this region of interest. The samples are then extracted from the input data using a standard backward geocoding algorithm (Fig. 3f).
- The next burst of the RC data is cut and focused (Fig. 3g). The region of interest is enlarged to contain the new data (position determined through the forward geocoding process). The focused data are geocoded on the enlarged image, and so on until all subsequent patches of RC data have been processed.

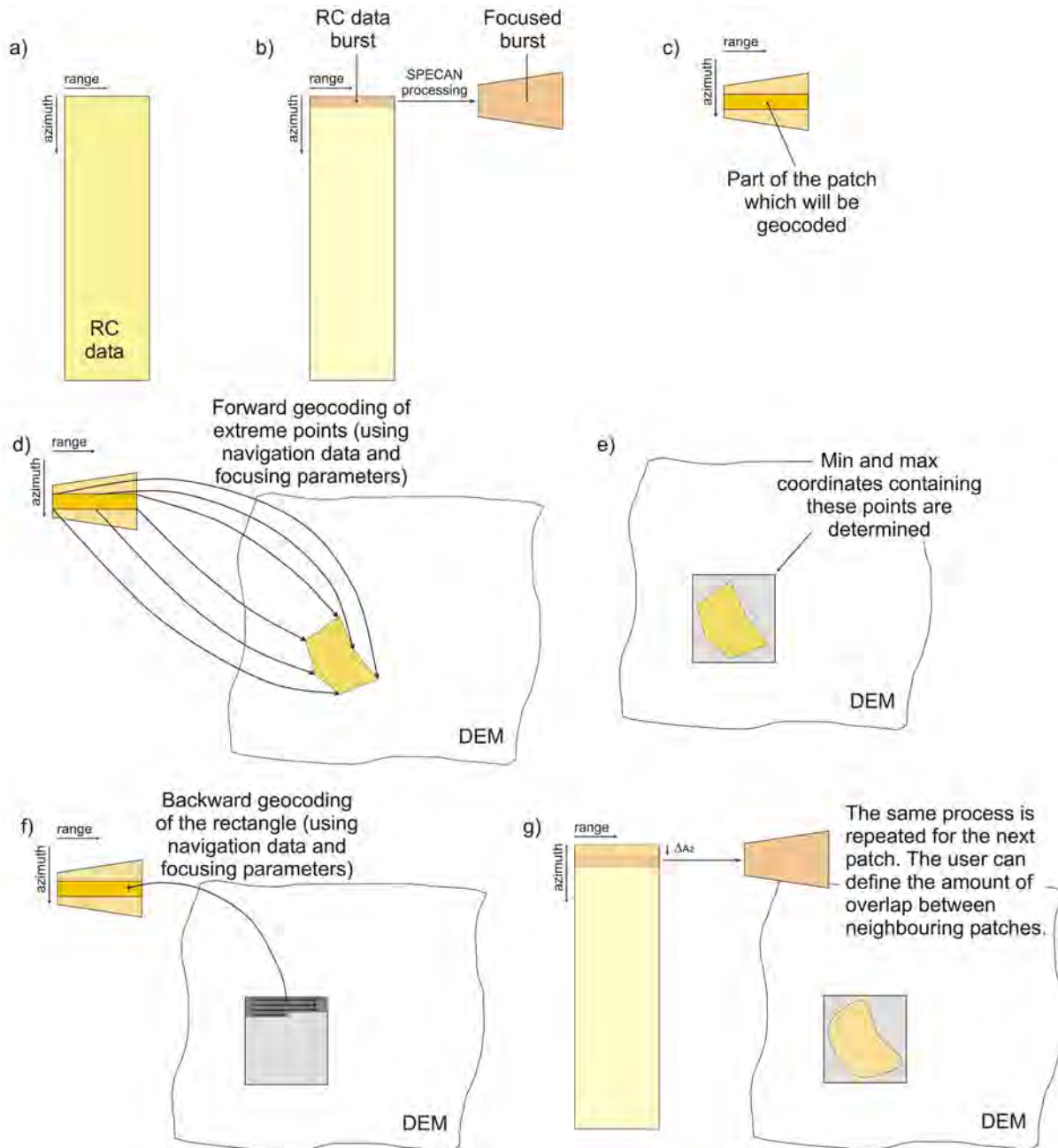


Fig. 3: Schematic description of the mosaicking and geocoding algorithm.

Both backward and forward geocoding processes are based on a standard range-Doppler approach (MEIER et al. 1993). The forward geocoding method starts from a set of range-azimuth coordinates. The corresponding position of the pixel in the chosen cartographic coordinate system is determined using the linearized navigation data corresponding to the segment, a DEM, the range distance to the sensor and the Doppler properties of the pixel. During backward

geocoding, the range-azimuth position of a given cartographic position is calculated using the same information as used above.

The forward geocoding algorithm uses some approximations: calculations are done in map coordinates assuming a flat Earth, thus only generating an approximation of the geographical position. However, since this step is only performed to determine the region of interest, it does not need to be extremely precise. On the contrary, all geometrical calculations in the backward geocoding algorithm are done in global Cartesian coordinates, and thus the retrieved geometry is very reliable. Because fitting a focused SAR image onto a DEM is not a one-to-one operation, the backward geocoding interpolates the pixels in the range-azimuth image. An anti-aliasing averaging filter is sometimes needed before the interpolation to satisfy the Nyquist condition, depending on the input and geocoded pixel spacings.

3 Results

3.1 Focusing MiSAR RC data

Experimental results show a very good focusing quality. Unfortunately, no corner reflectors were used on the provided scene; thus it is not possible to calculate the effective resolution or PSLR¹ values. Images focused with the SPECAN algorithm were compared to the ones delivered by EADS and seem qualitatively very similar. An example of a MiSAR image processed with the SPECAN algorithm is shown in Figure 4.



Fig. 4: Image focused with the SPECAN algorithm. The individual RC data bursts are 0.7 s long (or ~22 m flight distance). The focussed image covers a surface of about 310 m in azimuth x 800 m in range.

1) Peak to SideLobe Ratio

3.2 Mosaicking and geocoding

Results obtained with the mosaicking and geocoding processing method result in a continuous image, i.e. without visible geometrical discontinuities at the segment edges. The geometrical accuracy depends on the accuracy of the navigation data and the near range value. As mentioned in section 2.1, the navigation system consists of the combination of conventional GPS and INS systems without the possibility of differential adjustment. Therefore the positioning accuracy is in the range of a few meters. A similar degree of accuracy exists for the map product used to validate the geocoding quality. With these limitations in mind, the geocoded SAR image nonetheless aligns with the map very well (see Figure 5). Ideally, corner reflectors should be used to assess the geometrical accuracy.

Radiometric discontinuities are hardly visible, but could be still further minimized with improvements during Doppler centroid estimation and through the use of antenna patterns.

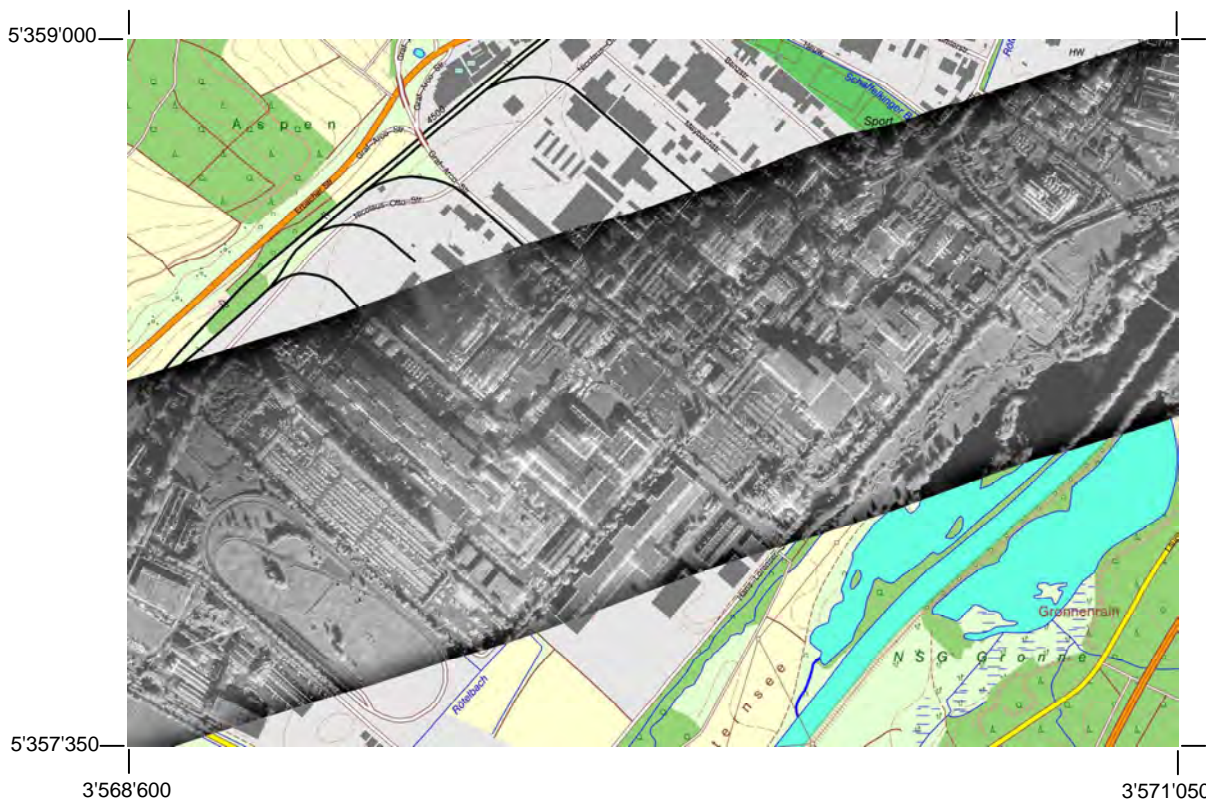


Fig. 5: Extract of the whole geocoded scene (region Ulm, Germany). The image represented here is composed of more than 100 segments. Data are represented in the German *Gauss-Krüger 3 Potsdam* cartographic reference system. Geobasisdaten © Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung Baden-Württemberg (www.lgl-bw.de)

4 Conclusion

The mosaicking and geocoding of MiSAR data approach is shown to be a successful method for reconstructing the whole scene as a continuous image from a video-like diffusion mode. No geometric discontinuities are visible between adjacent patches. The images produced this way are in a user-selected map geometry, contrary to coregistration-based methods which often produce images in poorly-defined geometries and may contain errors caused by patch-to-patch propagation.

The video-like focused images provided to us could not be used directly because some auxiliary data were missing. We therefore used the range-compressed data and implemented our own SPECAN focusing algorithm, which was shown to deliver images of similar high quality.

Improvements in the Doppler centroid estimation are currently being implemented. These will hopefully further improve the radiometric continuity between adjacent patches.

5 References

- SAUR, G., EDRICH, E., HEINZE, N. & KRÜGER, W., Video-like MiSAR image sequence processing. DGPF Tagungsband 16 / 2007 – Dreiländertagung SGPBF, DGPF und OVG, pp. 111-118, 2007.
- LANARI, R., HENSLEY, S. & ROSEN, P., Modified SPECAN algorithm for ScanSAR data processing, Proceedings of IEEE International Symposium on Geoscience and Remote Sensing IGARSS '98, vol. 2, pp. 636-638, 1998.
- KALMAN, R. E., A new approach to linear filtering and prediction problems, Transactions of the ASME – Journal of Basic Engineering, pp. 35-45, 1960.
- CUMMING, I. G. & WONG, F. H., Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data, Algorithms and Implementation, Artech House, Boston, 2005.
- CURLANDER, J. C. & MCDONOUGH, R. N., Synthetic Aperture Radar - Systems and Signal Processing, John Wiley & Sons, New York, 1991, pp. 440-443.
- MEIER, E., FREI, U., NÜESCH, D., SAR Geocoding: Data and Systems, Wichmann, 1993, ch. Precise Terrain Corrected Geocoded Images, pp. 173-186.

InSAR Kartierungsprogramme großflächiger Gebiete

SOWMYA GOPAL¹ & THOMAS DAMOISEAUX¹

Zusammenfassung: Dreidimensionale Daten der Erdoberfläche spielen in allen Phasen heutiger Geoinformatik-Projekte eine wichtige Rolle. Die Datenerfassung hierzu kann beispielsweise mit terrestrischen Messungen, photogrammetrischen Auswertungen oder der Nutzung interferometrischer Radar-Systeme mit synthetischer Apertur (InSAR) realisiert werden. Basierend auf der InSAR Technologie entwickelte Intermap einen Arbeitsablauf, der es ermöglicht, Kartierungsprogramme großflächiger Gebiete effizient abzuwickeln. Dazu stehen vier eigenentwickelte, operationell arbeitende, flugzeuggetragene InSAR-Systeme zur Verfügung. Beispiele solcher Kartierungsprojekte sind die Programme NEXTMap[®] USA sowie NEXTMap[®] Europe, die 2010 abgeschlossen sind und eine Fläche von 10,4 Millionen km² umfassen.

1 Einleitung

Die Problemfelder bisheriger nationaler oder länderübergreifender Höhenmodelle sind vielschichtig. Zur Verfügung stehende Datensätze, beispielsweise SRTM oder ASTER, sind in ihrer Auflösung limitiert und weisen Artefakte wie Datenlücken in Gebirgsregionen auf. Im Allgemeinen ist eine inhomogene Qualität vieler Datensätze, bedingt durch jeweils verschiedene Technologien und Verfahren, Lieferanten und Qualitätsstandards oder Alter und Herkunft, zu verzeichnen. So sind Merkmale wie Blattschnittränder durch Digitalisierung analoger Karten oder unzuverlässige Angleichungen in Grenzgebieten zu beobachten.

Intermaps nationale und länderübergreifende NEXTMap[®] Daten, die aus InSAR Befliegungskampagnen resultieren, sind dagegen aktuell, homogen, verlässlich und hochgenau. Durch Vergabe von Nutzungsrechten stehen die Daten privaten und öffentlichen Anwendern auch kostengünstig zur Verfügung.

Die Erfassung von Höhenmodellen und Bilddaten erfolgt hier mittels flugzeuggetragener InSAR-Systemen. Verglichen mit einer terrestrischen Vermessungs- oder LIDAR-Kampagne ist InSAR für großflächige Gebiete wirtschaftlich effizienter und bietet gegenüber SAR Satelliten-Systemen eine wesentlich höhere Auflösung und ist außerdem nicht von zeitlichen und atmosphärischen Änderungen beeinflusst. Im Verhältnis zu flugzeug- oder satellitengestützten optischen Systemen ist die Radar Technologie planbarer und flexibler, da die Datenaufnahme nicht von Wetter- oder natürlichen Beleuchtungsverhältnissen abhängig ist.

Der Beitrag stellt das NEXTMap[®] Programm und potentielle Anwendungen vor. Dabei wird, basierend auf den technischen Grundlagen, das Hauptaugenmerk auf den Arbeitsablauf, der die Einhaltung der Spezifikationen des NEXTMap[®] Programms garantiert, gelegt.

1) Intermap Technologies GmbH, Heimeranstr. 35, 80339 München;
E-Mail: sgopal@intermap.com & tdamoiseaux@intermap.com

2 Grundlagen und Spezifikationen

2.1 InSAR Technologie

Abbildende Radarsysteme arbeiten in einem Frequenzbereich von 0.3 bis 300 GHz, welcher einer Wellenlänge von 1m bis 1mm entspricht. In dem Frequenzbereich von 0.3 bis 10 GHz werden Nebel, Wolken und Regen nahezu ungehindert durchdrungen, wodurch die Datenaufnahme so gut wie wetterunabhängig ist. Da der Sensor die hochfrequenten Impulse selbst aussendet, ist das System ebenfalls nicht auf natürliche Lichtverhältnisse angewiesen. Für die zweidimensionale Abbildung der Geländeoberfläche durch Radarsysteme mit synthetischer Apertur (SAR) wird die Amplitudeninformation des empfangenen Signals genutzt. Die SAR Interferometrie (InSAR) hingegen verwendet die Phaseninformation des Signals, um eine dreidimensionale Erfassung der Erdoberfläche zu realisieren. Ähnlich wie in der Stereometrie wird dabei die Geländehöhe aus zwei Aufnahmen desselben Gebietes berechnet.

2.2 Radar Systeme

Zur Durchführung der Kartierungsprogramme stehen Intermap vier eigenentwickelte, operationell arbeitende, flugzeuggetragene STAR (Sea, ice, and Terrain Assessment Reconnaissance) X-Band InSAR Systeme zur Verfügung. Die nachfolgende Tabelle fasst die wichtigsten Parameter der Systeme zusammen.

Tab. 1: Parameter STAR InSAR Systeme

System/Parameter	STAR-3i	STAR-4	STAR-5	STAR-6
Plattform	Lear 36	King Air T200	King Air T200	Lear 36
Geschwindigkeit (km/h)	720	430	430	720
Wellenlänge/Polarisation	3 cm/HH	3 cm/HH	3 cm/HH	3 cm/HH
Bandbreite (MHz)	135	135/270	135/270	135
Streifenbreite (km)	8 – 15	6 – 11	6 – 11	8 – 15
Flughöhe (km)	6 – 12	4 – 8,5	4 – 8,5	6 – 12

2.3 Spezifikationen

Aus Tabelle 2 sind die Spezifikationen der Intermap Kernprodukte, dem orthorektifizierten Radarbild (ORI), dem digitalen Oberflächenmodell (DOM) und dem digitalen Geländemodell (DGM), zu entnehmen. Die vertikalen RMSE Werte gelten im offenen Gelände mit Neigungen < 10°. Aufgrund des standardisierten Arbeitsablaufs erfüllen die als Typ II definierten NEXTMap® Kernprodukte hohe Qualitätsstandards.

Tab. 2: Kernprodukt Spezifikationen

Produkt Typ	ORI		DOM		DGM	
	Pixelgröße	RMSE horizontal	Bodenauflösung	RMSE vertikal	Bodenauflösung	RMSE vertikal
I	1,25 m	2,0	5,0 m	0.5	5,0 m	0.7
II	1,25 m	2,0	5,0 m	1	5,0 m	1
III	1,25 m	2,0	5,0 m	3	-	-

Während und nach der Befliegung finden Toleranz- bzw. Akzeptanzprüfungen hinsichtlich Flugzeugbewegung, On Track Genauigkeit und der Radarfunktionen statt. Um Abweichungen des Flugzeuges von der Referenzbahn exakt zu erfassen, werden sehr genaue inertielle Navigationssysteme (INS), die mit differenziellen GPS-Systemen gekoppelt sind, eingesetzt. Diese Systemkonfiguration zeichnet die Position und Lage des Flugzeuges sowie die Winkelmessung der Flugrotation um die drei Raumachsen auf und beschreibt somit die Abweichungen von der Referenzbahn. Die Analyse dieser Flugdaten entscheidet, ob die spezifizierten Genauigkeiten für den vorgesehenen Produkt-Typ eingehalten wurden oder nicht. Ist dies nicht der Fall, erfolgt eine Neubefliegung der Fluglinie oder des entsprechenden Abschnitts.

3.2 Interferometrische Prozessierung

Die interferometrische Prozessierung der Radar Rohdaten ist ein komplexer Vorgang, da verschiedene Plattformen und Produktspezifikationen ein hohes Datenvolumen und ein hoher Datendurchsatz in Einklang gebracht werden müssen. Der auf einer 64 bit Blade Architektur und auf PCs basierte Prozess ist weitestgehend automatisiert, wird mittels firmenintern entwickelten Programmen und Abläufen realisiert und ermöglicht einen maximalen Durchsatz von 400 000 km² pro Monat. Nach der Eingabe der Radar Rohdaten, der Navigationsdaten sowie weiterer Zusatzdaten erfolgt die eigentliche Prozessierung zu den Bild- und Höhendaten gemäß der Produktspezifikationen. Die folgende Abbildung zeigt beispielhaft Abschnitte der Prozessierung des SAR-Bildes. Dazu werden die Signale in zwei Richtungen, entweder im Orts- oder Frequenzbereich mit einer Referenzfunktion, die durch den theoretischen Verlauf des Signals definiert ist, gefaltet. Diese zweidimensionale Faltung bzw. Kreuzkorrelation mit einer Referenzfunktion wird in zwei eindimensionalen Schritten, die jeweils eine Impulskompression bewirken, durchgeführt, und zwar zuerst in Range- (Senkrecht zur Flugrichtung) und dann in Azimutrichtung (Parallel zur Flugrichtung). Während Abbildung 2a einen bereits in Rangerichtung komprimierten Datensatz zeigt, ist auf Abbildung 2b ein fertig prozessiertes SAR-Bild zu sehen.

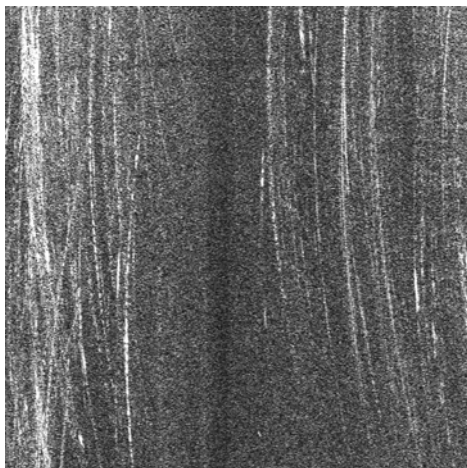


Abb. 2a: Range-komprimierter Datensatz

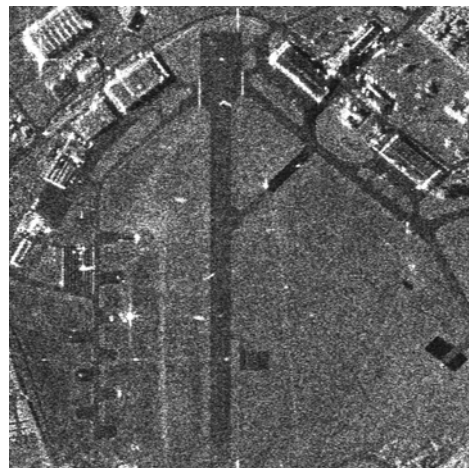


Abb. 2b: Prozessiertes SAR-Bild

Die STAR-Systeme operieren mit einer Wellenlänge von 3 cm, die aufgrund ihrer Kürze nahe der Oberfläche in ein beleuchtetes Objekt eindringen. Demzufolge beschreiben die prozessierten Höhendaten nicht die reliefbezogene Erdoberfläche, sondern das Gelände und sämtliche nicht-reliefbezogene Objekte wie Vegetation oder Gebäude, die Kontakt mit der eigentlichen Geländeoberfläche haben. Insofern ist das prozessierte Höhenmodell als ein digitales Oberflächenmodell zu definieren.

Als Ergebnis der interferometrischen Prozessierung stehen das ORI und das uneditierte DOM in einer Kachelgröße von 7,5' x 7,5' für die Weiterverarbeitung zur Verfügung.

3.3 Editierung

Nach der Prozessierung erfolgt in einem weiteren Verarbeitungsschritt die Editierung bzw. Generierung des DOMs und des DGMs, deren unterschiedliche Charakteristika durch die Profile in Abbildung 3 skizziert sind. Dazu wird das in Stereo Umgebung arbeitende, firmenintern entwickelte „Interferometrische Editierungssystem“ (IES) verwendet.

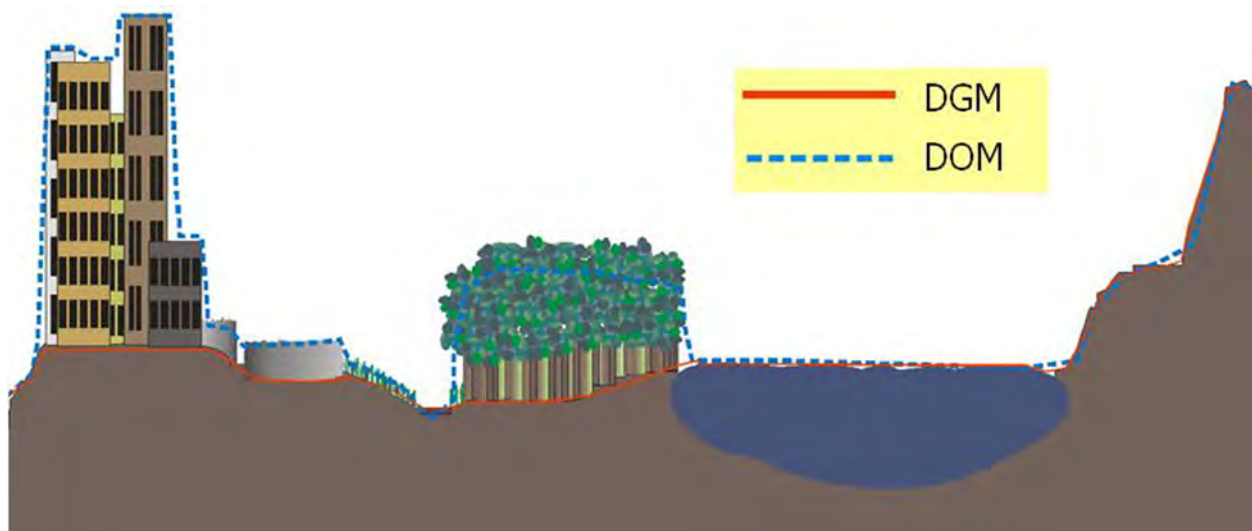


Abb. 3: Charakteristik DGM bzw. DOM

Das Editierungstool nutzt orthorektifizierte Eingangsdaten zur Generierung von Stereobildern, die dann eine dreidimensionale Editierung ermöglichen. Die Operatoren wenden standardisierte Editierregeln für spezifizierte Merkmale an, um eine homogene Editierung der verschiedenen anthropogenen sowie geomorphologischen Einheiten zu gewährleisten. Als Beispiel hierzu ist das Glätten von Gewässerflächen, das Entfernen von Artefakten oder die Eliminierung von Waldflächen im DGM genannt (siehe dazu die folgende Abbildung). Die Editierung stellt die arbeitsintensivste Komponente des gesamten operationellen Arbeitsablaufs dar und ist von verschiedenen Qualitätskontrollen begleitet. Die abschließende Qualitätskontrolle des ORI und des editierten DOM bzw. DGM, jeweils in einer Kachelgröße von 7,5' x 7,5', wird von einer eigenständigen Arbeitsgruppe durchgeführt.



Abb. 4a: ORI

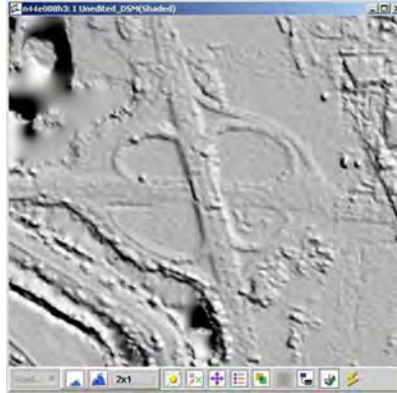


Abb. 4b: DOM uneditiert

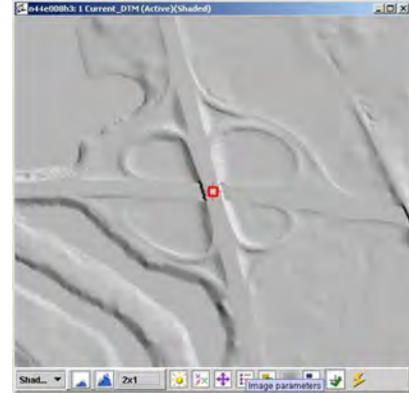


Abb. 4c: DGM editiert

3.4 Qualitätskontrolle (IQC)

Die unabhängige Qualitätskontrolle durch die IQC Arbeitsgruppe findet getrennt vom Produktionsteam statt. Die Aufgabe besteht unter anderem darin, die IES Resultate hinsichtlich der Vollständigkeit der Editierung und der Einhaltung der Produktspezifikationen zu kontrollieren. Die Überprüfung der Spezifikationen erfolgt mittels von Behörden gekauften oder öffentlich verfügbaren GCPs, die beispielsweise in den U.S.A. vom National Geodetic Survey (NGS) bereitgestellt werden. Unvollständig editierte oder nicht den Spezifikationen entsprechende Kacheln gehen zur Verbesserung an das Produktionsteam zurück. Erst von IQC akzeptierte Kacheln stehen dem Intermap-Store zum Einfügen in die Datenbank zur Verfügung.

Im Anschluß daran können die Kunden die Daten mittels der TerrainOnDemand Benutzerschnittstelle online bestellen oder sie mit WMS/WCS in einer OGC-konformen Software, wie beispielsweise Global Mapper, nutzen. Der Web Map Service (WMS) ist ein von dem Open Geospatial Consortium (OGC) eingeführter Standard zum Zugriff auf geocodierte Bilderarchive verschiedenster Formate wie beispielsweise JPEG oder TIFF. Der Web Coverage Service (WCS) ist eine Ergänzung zum WMS, der die Nutzung von Rasterkartenarchiven, sogenannter Coverages, ermöglicht. Zusätzlich können die Nutzer mit Hilfe von Intermap Web Services (IWS) Höhenprofile und -werte sowie Sichtbereiche von angeforderten Koordinaten extrahieren.

4 NEXTMap® Programm

Die eingetragene Marke NEXTMap® repräsentiert das Datenangebot von Intermaps InSAR basierten nationalen und regionalen Kartierungsprogrammen. Das Konzept hierbei ist, die Produkte für nationale und länderübergreifende Gebiete für eine Vielzahl von Anwendungen und Märkten homogen und aktuell zur Verfügung zu stellen. Durch Vergabe von Nutzungsrechten stehen die Daten privaten und öffentlichen Anwendern kostengünstig zur Verfügung. Die Produktspezifikationen garantieren einen Detaillierungsgrad, der an LIDAR oder photogrammetrisch erzeugte Produkte heranreicht und der Datensätze, wie beispielsweise SRTM oder ASTER, deutlich übertrifft.

Die Produkte für das 8 Millionen km² große NEXTMap® USA Gebiet (siehe Abbildung 5) bzw. des 2,4 Million km² umfassenden NEXTMap® Europe Gebiets (siehe Abbildung 6) stehen seit Mai 2010, respektive Mai 2009, im Intermap-Store zur Verfügung.

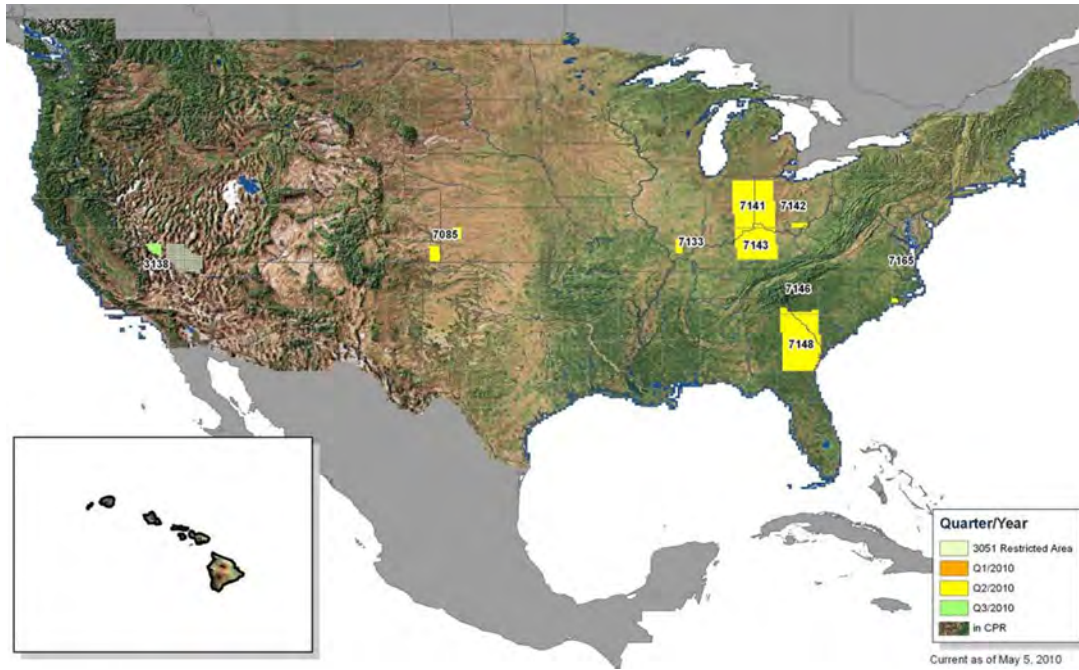


Abb. 5: Abdeckung NEXTMap® USA

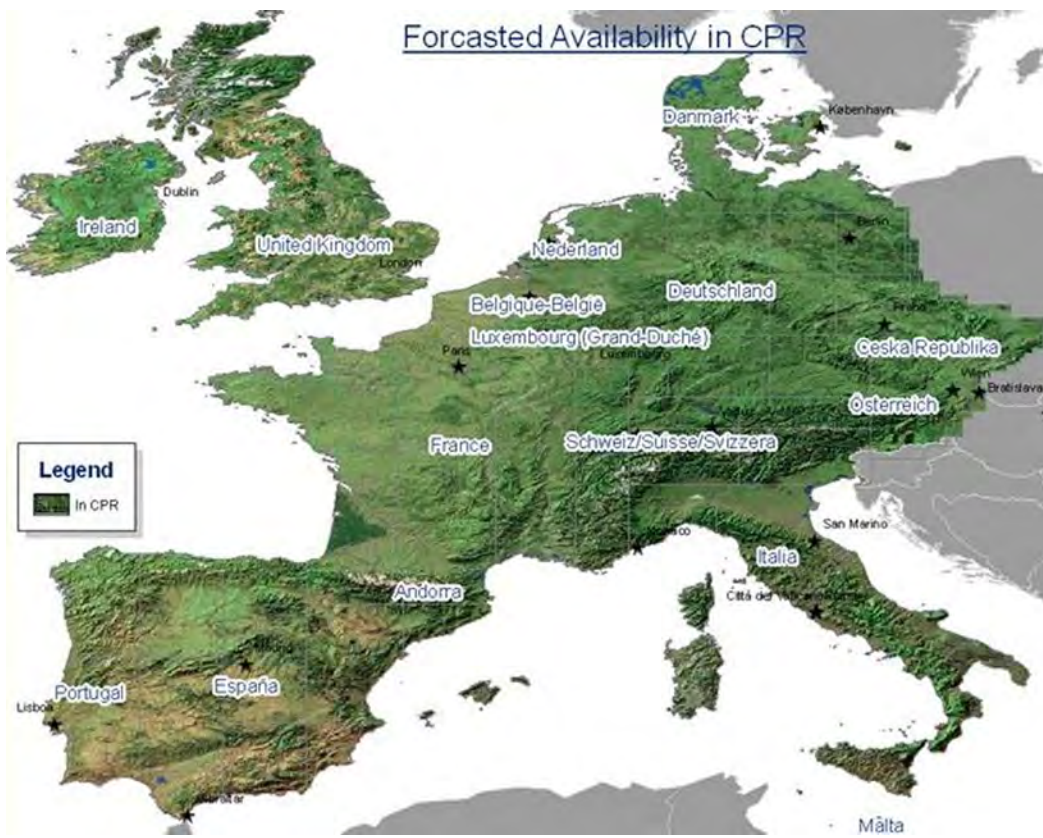


Abb. 6: Abdeckung NEXTMap® Europe

5 Anwendungsbeispiele

5.1 Risikomanagement

Wie aktuelle Naturgefahrenereignisse zeigen, ist das Risikomanagement von Hochwassern wichtiger denn je. Um Schadenpotenziale aus dieser Naturgefahr bestmöglich und zeitnah bewerten und steuern zu können, ist die Verwendung von homogenen, präzisen und landesweit verfügbaren Risikomanagementprodukten erforderlich.

Die Modellierung des Hochwasserrisikos von Überschwemmungs-, Starkregen- und Sturmflutereignissen auf der Basis der NEXTMap® Geländemodelle erfolgt durch Intermap oder deren Partner mittels verschiedener Methoden.

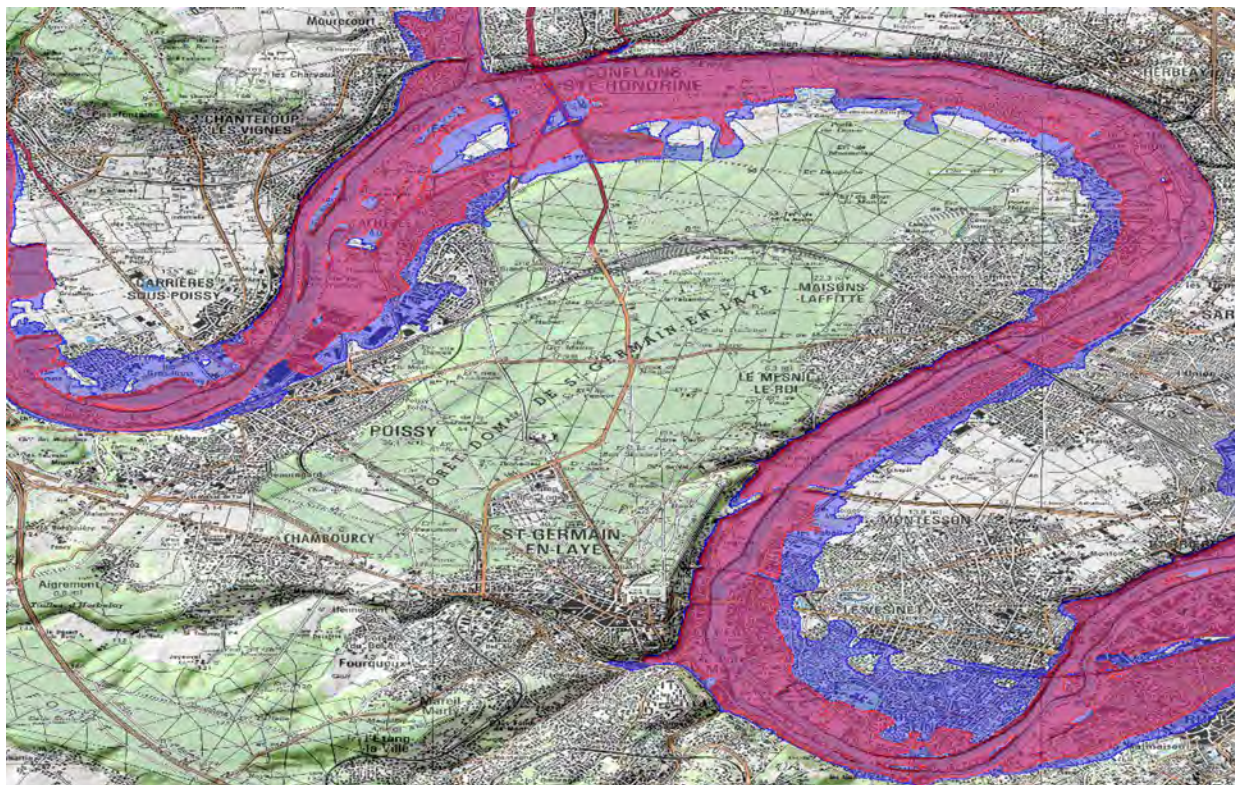


Abb. 7: Zwei Überschwemmungsrisikozonen mit verschiedenen Wiederkehrperioden visualisiert auf einer topographischen Karte (Scan50®-IGN©), unterlegt mit der Reliefschummerung des NEXTMap® DGMS

Im Folgenden ist exemplarisch die Modellierung eines Überschwemmungsereignisses skizziert.

Die Ableitung des Gewässernetzes aus dem NEXTMap® DGM basiert auf Standardtools. Nach der Eliminierung von Senken und Peaks im DGM erfolgt die Bestimmung der Fließrichtung und der Abflusskonzentration. Mit Hilfe eines Schwellwertes findet im Anschluss die Selektion des Gewässernetzes für Einzugsgebiete größer 20 km² statt. Mittels Zusatzdaten wird das Gewässernetz nach der Ableitung semi-automatisch kontrolliert und horizontale Abweichungen von mindestens 50 m auf einer Länge von mehr als 100 m korrigiert. Die Generierung der Überschwemmungsrisikozonen erfolgt dann unter Verwendung des Gewässernetzes und des NEXTMap® DGMS mit einer von Swiss Re entwickelten und kalibrierten Wasserabflussmodellierung.

5.2 Automotive

Genau 3D Straßenvektoren ermöglichen es, einerseits Sicherheitssysteme (ADAS – Advanced Driver Assistance Systems) von Fahrzeugen wie z.B. die Scheinwerfersteuerung oder Kurvengeschwindigkeitswarnung zu verbessern und bieten andererseits Lösungsmöglichkeiten zur Reduktion des Kraftstoffverbrauchs von normalen und hybriden Fahrzeugen an.

Die semi-automatisierte Extraktion der 3D Straßenvektoren mit Hilfe eines firmenintern entwickelten Systems nutzt für die Ermittlung der x- sowie y-Koordinate das Stereo-ORI und der z-Koordinate das DTM. (siehe Abbildung 8).



Abb. 8: 3D Straßenvektoren

Da die Straßengeometriedaten aus den präzisen NEXTMap[®] Höhenmodellen gewonnen werden, bietet der Datensatz für alle Straßenkategorien hochgenaue Informationen hinsichtlich der Mittellinienpositionen und des Straßenniveaus. In Deutschland wurden z. B. über eine Million Straßenkilometer extrahiert, deren Spezifikationen in Tabelle 3 zusammengefasst sind.

Tab. 3: 3D-Straßenvektoren Spezifikationen

Absolut RMS (m)	Horizontal	3,0
	Vertikal	1,0
Relativ RMS (m)	Horizontal	1,0
	Vertikal	0,3

Desweiteren stellt Intermap derzeit 3D-Straßenvektoren für weitere Ländern her, um in naher Zukunft einen ganz Westeuropa umfassenden Datensatz anbieten zu können.

5.3 3D Visualisierung

In vielen Anwendungen tragen 3D-Benutzeroberflächen oder 3D-Geländedaten zur Lesbar- und Verständlichkeit sowie Nutzerfreundlichkeit anderer Produkte bei:

- Visualisierung von Hochwassermodellierungen (Abbildung 7)
- Navigationsysteme mit 3D Straßenvektoren (Abbildung 8)
- mobile Navigationsgeräte (MNG) die genaue Höhen- und Positionsangaben für Wanderwege oder Stadtrundgänge mit Touristenattraktionen anbieten (Abbildung 9).



Abb. 9: 3D Visualisierung auf MNG

Letztendlich sind hochaufgelöste geokodierte Höhenmodelle auch als Referenzdaten für die Zusammenführung verschiedener Datenebenen, wie beispielsweise Wanderwege, Gebäudemodelle oder Landnutzung erforderlich.

6 Literaturverzeichnis

1. Bamler, R. and Hartl, P., 1998. Synthetic aperture radar interferometry, Inv. Probl., Vol. 14, pp. R1–R54, 1998
2. Tennant, J.K. and Coyne, T., 1999. STAR-3i interferometric synthetic aperture radar (INSAR): some lessons learned on the road to commercialization. In: Proceedings of the 4th International Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition/21st Canadian Symposium on Remote Sensing, Ottawa, Canada. 21-24
3. <http://www.opengeospatial.org/standards/wms>
4. © 1998 Schweizerische Rückversicherungs-Gesellschaft, Autor: Peter Hausmann, Cat Perils Division Reinsurance & Risk. 2007 - Überschwemmungen: Ein versicherbares Risiko?
5. http://www.ertico.com/en/activities/safemobility/adasis_forum.htm

LIDAR-Datenpotenziale für hydrodynamisch-numerische Modelluntersuchungen

HERBERT BROCKMANN¹, ANDREAS HAASE², GOTTFRIED MANDLBURGER³ & MICHAEL SCHRÖDER⁴

Zusammenfassung: Für vielfältige Aufgaben der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes werden hydrodynamisch-numerische Modelluntersuchungen ausgeführt. Dazu und auch für weitere Aufgabenstellungen werden als wesentliche Basisdatensätze Digitale Geländemodelle der Wasserläufe und 3D-Bruch-/Geländekanten benötigt. Als Geländedatengrundlage stehen häufig LIDAR-Daten zur Verfügung. In diesem Kontext wurden am Main pilothaft eine LIDAR-Datenverbesserung aufgrund von Streifendifferenzen und eine automatische Ableitung mit interaktiver Nachbearbeitung von 3D-Kanten aus LIDAR-Daten erfolgreich erprobt..

1 Einleitung

Für vielfältige gewässerkundliche, wasserbauliche und wasserwirtschaftliche Aufgabenstellungen werden aktuelle, hoch auflösende, homogene und großräumig erfasste hydrologisch beziehungsweise hydraulisch wirksame 3D-Bruch- und Geländekanten sowie Digitale Geländemodelle der Wasserläufe (DGW-W als 1m-Quadratgitter und TIN) benötigt. Beide sind wesentliche Basisprodukte für hydrodynamisch-numerische Modelluntersuchungen. Zur Bearbeitung derartiger Aufgabenstellungen, z. B. am Main, waren diese pilothaft für die Stauhaltungen Obernau und Kleinostheim (s. Abb. 1) mit einer Fläche von ca. 33 km² vor allem auf der Basis vorliegender LIDAR-Daten zu generieren. Die Ergebnisdienste dienen anschließend als Eingangsgrößen für eine entsprechende hydrodynamisch-numerische Modelluntersuchung.

Die wesentlichen Ziele dieser Pilotanwendung „DGM-W Main-2“ waren insbesondere die Erpro-

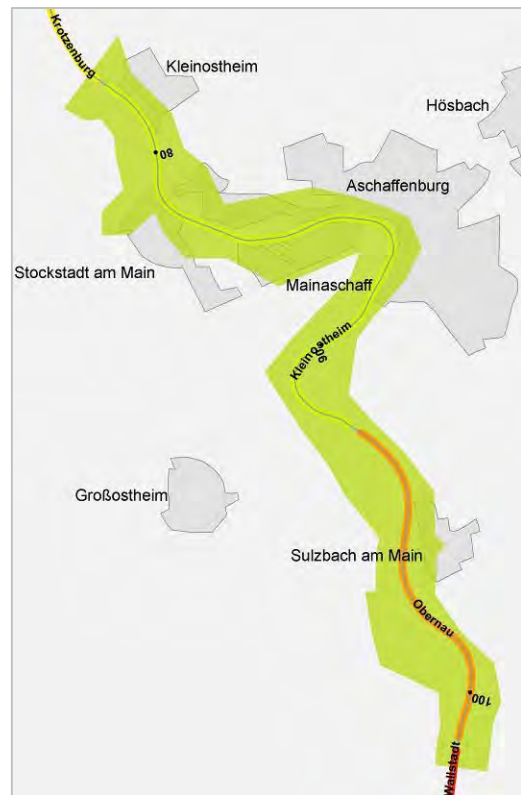


Abb. 1: Bearbeitungsgebiet DGM-W Main-2

- 1) Herbert Brockmann, Bundesanstalt für Gewässerkunde, Am Mainzer Tor 1, 56068 Koblenz, Deutschland; E-Mail: brockmann@bafg.de
- 2) Andreas Haase, RMK, Breite Straße 32, 29221 Celle, Deutschland; E-Mail: haase.FA-RMK@bafg.de
- 3) Gottfried Mandlbürger, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung I.P.F., TU Wien, Gußhausstraße 27-29, 1040 Wien, Österreich; E-Mail: gm@ipf.tuwien.at
- 4) Michael Schröder, Bundesanstalt für Wasserbau, Kußmaulstraße 17, 76178 Karlsruhe; E-Mail: michael.schroeder@baw.de

bung möglicher LIDAR-Datenverbesserungen durch eine Feingeoreferenzierung und einer Methodik zur automatischen robusten Kantenbestimmung sowie die Bewertung, in wie weit das Vorgehen grundsätzlich auf vergleichbare Aufgabenstellungen übertragbar ist.

2 Qualitätskontrolle und -verbesserung der LIDAR-Daten

2.1 Ausgangsdaten

Als Ausgangsdaten standen klassifizierte LIDAR-Punkte einer Befliegung des Bayerischen Landesamtes für Vermessung und Geoinformation (LVG Bayern) kachel- und flugstreifenweise zur Verfügung. Die Daten wurden im Zeitraum vom 20.02.2007 bis 09.04.2007 mit einem Riegl LMSQ240i Scanner aufgezeichnet. Der Flugblock wurde mit einer Streifenüberlappung von 50% angelegt, wobei die Punktdichte im Einzelstreifen etwas mehr als 1 Pkt/m² betrug. Die Punktdichte der nutzbaren Punktwolke betrug im Mittel rd. 2,5 Pkt/m², in Einzelbereichen bis zu 4 Pkt/m².

2.2 Qualitätskontrolle

Da die Kriterien Punktdichte, Durchdringungsrate und gegenseitige Orientierung der einzelnen Laser-Scanner-Streifen ausschlaggebend für eine erfolgreiche automatische Extraktion und Modellierung der Kanten sind, wurde eine entsprechende Qualitätskontrolle durchgeführt.

Die dabei abgeleiteten Punktdichtekarten auf der Basis der Last-Echo-Punktwolke der Flugstreifen ließen Unregelmäßigkeiten in der Flugbewegung, Pitch-Winkel, erkennen, die stellenweise zu Unter- beziehungsweise Überabtastungen führten. Weiterhin wurden für die gesamten Punkte aller Flugstreifen Punktdichtekarten für alle Last-Echo-Punkte und für alle Bodenpunkte berechnet. Die Ergebnisse zeigten, dass die angestrebte 50% Überlappung nicht immer erreicht wurde, sodass Bereiche stellenweise nur durch einen Flugstreifen abgedeckt wurden. Mit Ausklassifizierung der Vegetations- und Gebäudedaten sank die o. g. Punktdichte deutlich.

Generell lag die Punktdichte der nutzbaren Punkte im Mittel besser als 1 Pkt/m² und wurde als ausreichend zur Kantenableitung angesehen.

Zur Überprüfung der gegenseitigen Orientierung der Flugstreifen wurden zunächst auf Basis aller Last-Echo-Punkte Oberflächen- und aus jeweils benachbarten Streifen Differenzmodelle berechnet. Die Zusammenstellung der Streifendifferenzen aller benachbarten Flugstreifen (s. Abb. 2) zeigte, dass

- über das gesamte Projektgebiet hinweg Höhendifferenzen in den Überlappungsbereichen benachbarter Flugstreifen von mehr als 50cm auftreten,
- die Streifendifferenzen vor allem auf einen Versatz in x-Richtung (Flugrichtung, Ost-West) zurückzuführen sind,
- die Abweichungen sich systematisch in y-Richtung, aber insbesondere in x-Richtung ausprägen, was z. B. deutlich an Hausdächern abgelesen werden kann, deren Firstlinien in y-Richtung verlaufen,
- benachbarte Streifenpaare systematische Muster der Differenzen aufweisen, wobei sich jeweils Streifenpaare mit vorwiegend positiven und negativen Differenzen abwechseln,

- die Streifendifferenzen von der Streifenmitte zum Rand hin zunehmen, was auf eine Verkippung der Flugstreifen schließen lässt.

Aufgrund dieser Erkenntnisse wurde für ausgewählte Flugstreifenpaare eine genauere Analyse durchgeführt. Die Flugstreifen wurden dabei in überlappende Segmente von etwa 100m Länge eingeteilt. Für die korrespondierenden Segmente zweier benachbarter Streifen wurden dann mittels Least-Squares-Matching (LSM) 3D-Verschiebungsvektoren für jedes Segment bestimmt. Dadurch können 3D-Verschiebungen entlang eines Flugstreifens ermittelt werden. Die Abb. 3 zeigt exemplarisch die Differenzergebnisse für ein Streifenpaar (23/24). Die über das gesamte Streifenpaar gemittelten 3D-Verschiebungen ergeben sich zu: $\Delta x = -0,89$ m, $\Delta y = +0,23$ m, $\Delta z = \pm 0,00$ m.

Die erheblichen Verschiebungen zwischen den Flugstreifen in x-Richtung deuten auf einen Synchronisationsfehler zwischen GPS/IMU und Laserscanner hin. Die y-Verschiebungen sind zwar wesentlich geringer, zeigen aber systematische Effekte auf. Bei einer Korrektur der Punkte beider Streifen um eine mittlere 3D-Verschiebung wird die o. g. Verkippung der beiden Streifen offensichtlich. Vor dem Hintergrund dieser nicht akzeptablen Mängel wurde eine Feingeoreferenzierung der Flugstreifen für erforderlich gehalten.

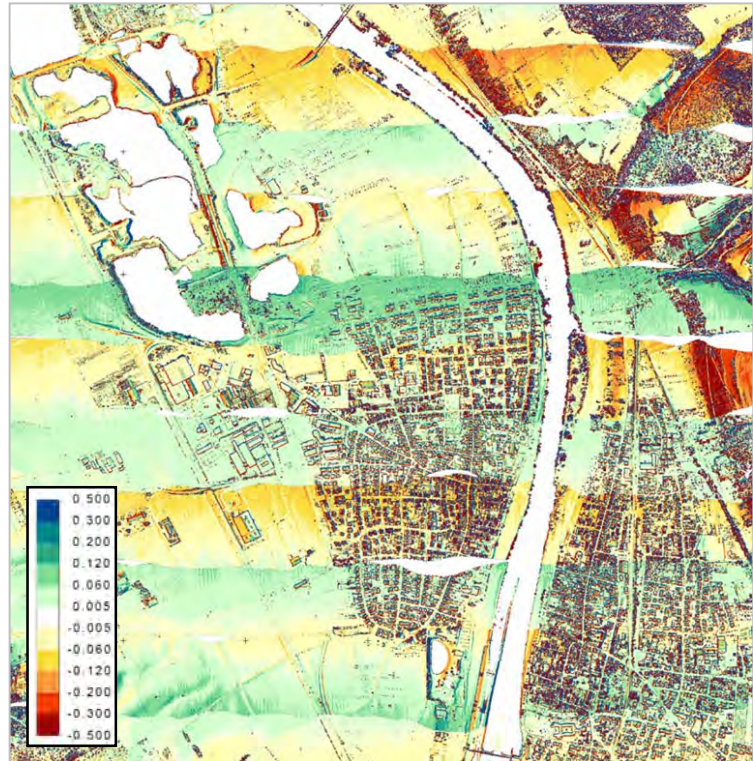


Abb. 2: Streifendifferenzen vor der Feingeoreferenzierung

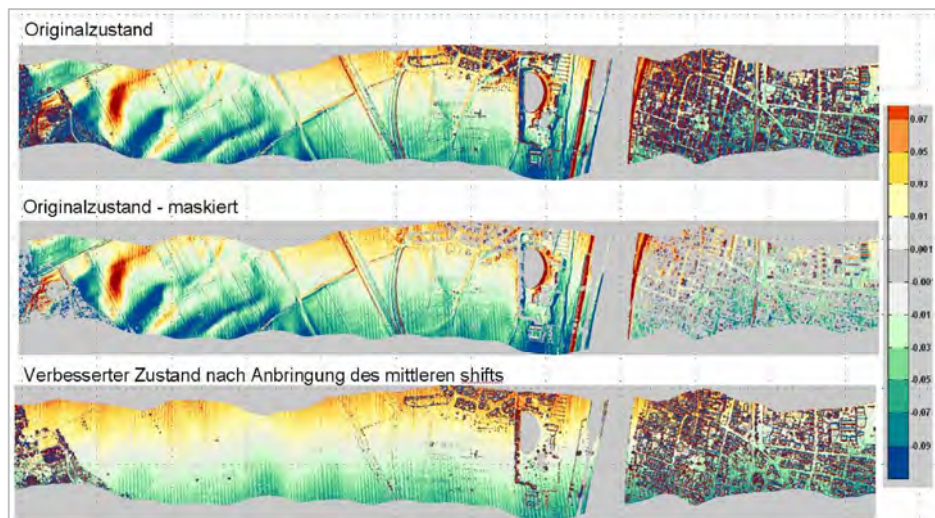


Abb. 3: Streifendifferenzen vor und nach Berücksichtigung der mittleren Verschiebungen

2.3 Feingeoreferenzierung

Die relative Feingeoreferenzierung war für 62 Streifenpaare mit einer Länge von ca. 10 km, Ost-West-Befliegung, auszuführen. Trajektorien und Querstreifen standen nicht zur Verfügung. Lediglich drei horizontale Passflächen konnten genutzt werden.

Aufgrund der Daten- und Softwaresituation wurde letztendlich ein pragmatischer manueller LSM-Ansatz für die Bestimmung von lokalen 3D-Differenzvektoren in den Streifenüberlappungsbereichen entwickelt. Dabei wird eine 3D-Verschiebung für manuell initiierte, möglichst gleichmäßig verteilte, ausgewählte Fenster berechnet, innerhalb derer das Gelände Variationen in Exposition und der Neigung aufweist. (z. B. Häusergruppen). Somit ist gesichert, dass nahezu nur „gute“ LSM-Verschiebungen bestimmt werden und die nachfolgende Ausgleichung robust durchgeführt werden kann.

Im Rahmen einer Varianzkomponentenschätzung wurde nach der Ausgleichung für die gemessenen Verschiebungen eine Genauigkeit von ca. 5cm in x und y sowie 1.5cm in z geschätzt. Die Zellengrößen betragen dabei 101m x 101m. Empirisch wurde vorab getestet, dass bei dieser Fenstergröße immer noch ohne affine Parameter gerechnet werden kann. Da jeder Streifen meistens zwei Nachbarn hat, war jeder Streifen auch zweimal bei dieser manuellen Auswahl beteiligt. In der Summe ergaben sich pro Streifen ca. 10 – 50 korrespondierende Punkte.

Die Analysen der Zwischenergebnisse zeigten neben nicht zulässigen Verschiebungen auch signifikante Abweichungen bedingt durch Rollwinkeleinflüsse um die x-Achse, die deshalb abschließend bei der Ausgleichung mitgeschätzt wurden. Die Abb. 4 zeigt exemplarisch eine Gegenüberstellung der jeweils farbkodierten Streifendifferenzen.

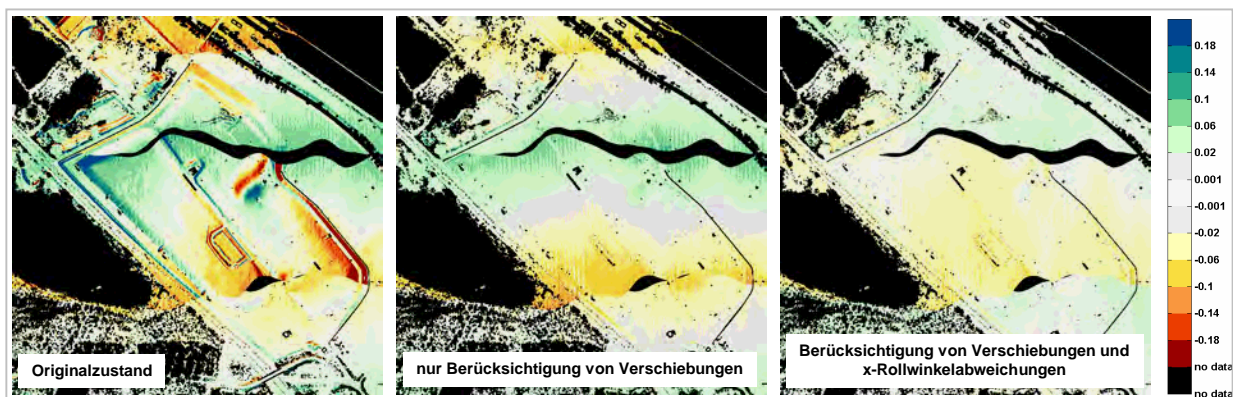


Abb. 4: Gegenüberstellung von Streifendifferenzen vor und nach der Feingeoreferenzierung

Auf der Basis der berechneten Residuen der Verknüpfungspunkte für jeden Streifen, vor und nach der Feingeoreferenzierung, kann ein quantitativer Ergebnisvergleich ausgeführt werden, s. Tab. 1.

Tab. 1: Statistik der Georeferenzierung (61 Streifen, 1625 Residuen pro Koordinatenrichtung, Einheit: m)

Größe	Originalgeoreferenzierung			Feingeoreferenzierung		
	x	y	z	x	y	z
Root Mean Square	0.353	0.127	0.022	0.036	0.036	0.012
max. Abweichung	0.982	0.349	0.219	0.135	0.137	0.221
mittlere Abweichung	-0.067	-0.001	0.000	0.000	0.000	0.000

Mit den erreichten Verbesserungen der LIDAR-Daten waren diese nun in einer notwendigen Datenqualität zur automatischen Ableitung der 3D-Kanten und des DGM-W verfügbar.

3 Ableitung der Bruch- und Geländekanten

3.1 Nutzeranforderungen

Für die hydrodynamisch-numerische Modellierung werden alle hydrologisch wirksamen 3D-Bruch- und Geländekanten benötigt. Als eigenständiger Datensatz sind sie Eingangsdaten für die DGM-W-Modellierung. Insbesondere waren Böschungen, Dämme, Deiche, Brückenwiderlager und wasserführende Gräben zu erfassen. Seitens der Nutzer wurden Genauigkeiten von $U_{x/95} = U_{y/95} \leq 50$ cm in der Lage und $U_{z/95} \leq 20$ cm angestrebt. Die Ableitung der Kanten sollte auf Basis der unregelmäßig verteilten LIDAR-Punktwolke erfolgen und deren volles Potential, vor allem hinsichtlich der Höhengenaugigkeit, ausschöpfen. Die hydraulische Relevanz zur weitestgehenden automatischen Ableitung der Kanten wurde durch folgende Kriterien definiert:

- Änderung der Geländeneigung quer zur Kante von mind. 10° ,
- Höhenunterschied bzw. Lageausdehnung des Körpers (Damm, Deich, Graben, Mauer, etc.) von mind. 50 cm und
- minimale Länge einer Geländekante von 10 m.

3.2 Methodik

Die Ableitung der 3D-Kanten gliedert sich in drei Arbeitsschritte, der Detektion, der eigentlichen Modellierung und des abschließenden Postprocessings.

Als Eingangsgrößen werden neben den LIDAR-Daten Näherungen der Kanten oder zumindest entsprechende Startsegmente zur Kantendetektion benötigt. Diese Startsegmente wurden mit dem Programmsystem STREX (structure line extreaktion) des I.P.F. durch Analyse der Geländekrümmungen abgeleitet. Dabei wird ein Startsegment für den nachfolgenden Prozess der Kantenmodellierung generiert, wenn

- der minimale Krümmungsradius (maximale Krümmung) einen benutzerdefinierbaren Wert unterschreitet,
- das Verhältnis von maximaler zu minimaler Krümmung entsprechend groß ist, wobei nur lineare Elemente gesucht sind und
- die Abweichung der Punkte von der Quadrik (bestangepasste Fläche zweiter Ordnung) kleiner ist als ein benutzerdefinierter Schwellenwert.

Dabei ist der Grundgedanke, dass für jeden n -ten LIDAR-Punkt seine k -nächsten Nachbarn gesucht werden (n, k benutzerdefinierbar). Aus den k Datenpunkten wird dann die Quadrik bestimmt, die je nach Geländeverlauf die Form eines Ellipsoides, eines Paraboloides, eines Hyperboloides oder eines Zylinders annehmen kann. Die Quadrik wird anschließend in ihre Hauptlage transformiert, woraus sich die Hauptkrümmungen (minimale und maximale Krümmung) und deren Richtung berechnen lassen.

Auf Basis der LIDAR-Punkte und der ermittelten Startsegmente erfolgte die Modellierung der 3D-Kanten mit dem Programm *strex modeler* des I.P.F. Ausgehend von einem Startsegment als Näherung für die Geländekante werden die umgebenden LIDAR-Punkte in zwei Klassen, links

oder rechts der Kante, eingeteilt. Die eigentliche Kantenmodellierung erfolgt dann, indem in einem simultanen Ausgleichsprozess zwei bestangepasste ebene Flächen, links und rechts der Kante, geschätzt werden (s. Abb. 5). Die Schnittgerade der beiden Flächen beschreibt eine Tangente an die Geländekante, in deren Mitte dann ein repräsentativer Kantenpunkt bestimmt wird. Anschließend wird sowohl in die Vor- als auch in die Rückrichtung des ersten gefundenen Kantensegmentes extrapoliert und der Prozess solange wiederholt, bis ein Abbruchkriterium, s. Abschn. 3.1, erreicht ist. Die Größe der Flächen-Patches (Breite b , Länge l), sowie das Überlappungsmaß (v) zweier aufeinanderfolgender Patches ist benutzerdefinierbar, wobei im Rahmen dieses Projektes meist mit $l=6\text{m}$, $b=3\text{m}$ und einer Überlappung v von 70% gearbeitet wurde. Die Schätzung der ebenen Teilflächen erfolgt voll automatisch und robust. Etwaig vorhandene Vegetationspunkte werden während der Ausgleichung eliminiert, indem ihr Gewicht von einer Iteration zur nächsten sukzessive verringert wird.

Da in der Regel bei der Kantendetektion zu viele Startsegmente auf ein und derselben Kante generiert werden (s. Abb. 6 und 7) ist im Zuge der Modellierung eine Überprüfung erforderlich, ob das nächste zu prozessierende (Start-)Segment bereits modelliert wurde. Des Weiteren s. BRIESE, B., 2004 und BRIESE, B. & ATTWENGER, M., 2005.

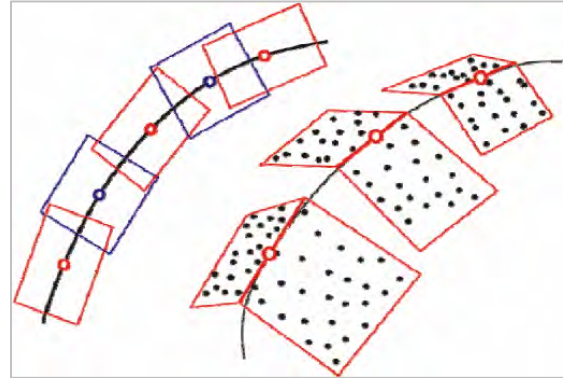


Abb. 5: Prinzip der Kantenmodellierung mittels Verschneiden von Ebenenpaaren



Abb. 6: Automatisch extrahierte Startsegmente

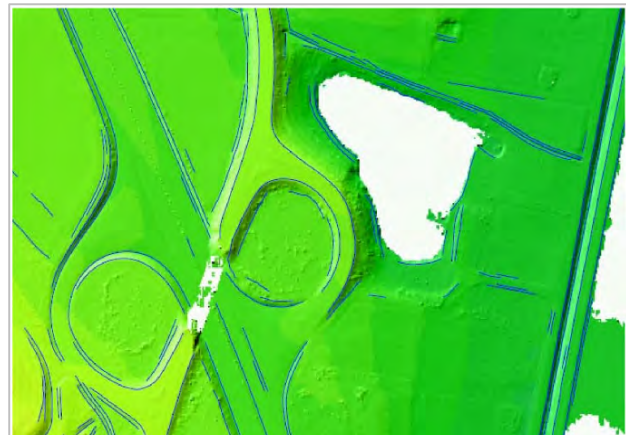


Abb. 7: Automatisch abgeleitete 3D-Kanten

Die automatisch abgeleiteten Kanten weisen von Fall zu Fall Lücken auf. Weiterhin nimmt die Modellierung keine Vereinfachung der 3D-Kanten vor, sondern behält alle erfolgreich gefundenen Kanten-Stützpunkte bei. Daher wurde ein Postprocessing-Modul implementiert, das im Wesentlichen folgende Aufgaben erfüllt:

- Zusammenfassen von Linienteilen,
- Vereinfachung der Linien (Reduktion der Punktmenge),
- Unterdrückung kurzer Linienstücke.

3.3 Ausführung

Auf Basis der bereitgestellten LIDAR-Punktclouden war eine Detektion und Modellierung benachbarter Linienelemente mit einem lagemäßigen Abstand von 1-2m in Abhängigkeit der Punktdichte realistisch. Zur Ableitung der Geländekanten wurden alle Last-Echo-Punkte der Klassen *Boden* und *Boden-oder-Vegetation* herangezogen. Außer den LIDAR-Punkten wurden keinerlei zusätzliche Daten zur Ableitung der Kanten verwendet. Es wurden insgesamt 12.000 Kanten von ca. 900 km Länge abgeleitet.

Abschließend war eine intensive interaktive Nachbearbeitung auf der Basis hydrodynamisch-numerischer Grundkenntnisse unumgänglich. Hier erfolgte neben restlichen Mängelbereinigungen in den Ergebnisdaten (z. B. Schließen von Grabenkanten) zusätzlich eine Kantenattributierung, da für die weitere Bearbeitung nur Deichkanten und wesentliche hydraulisch relevante Kanten benötigt wurden.

3.4 SOLL-IST-Vergleiche

Zur abschließenden Beurteilung der erreichten Genauigkeiten der abgeleiteten Kanten wurden in zwei Teilbereichen vor Ort signifikante Kanten mit einer summarischen Länge von 12 km (3094 Punkte) terrestrisch mit GPS-Techniken erfasst. Die SOLL-IST-Vergleiche an vergleichbaren Kanten ergaben folgende Ergebnisse:

- Lagedifferenzen von $\Delta x/y = 2-3$ dm, in Abhängigkeit von der Definitionsgenauigkeit,
- Höhendifferenzen von $\Delta z < 10$ cm, bei gut definierten Geländekanten (z.B. befestigte Grabenkanten).

Bei natürlichen Geländekanten sind die Differenzwerte nur an konkret erfassten Punkten und gut definierten Kantenverläufen vergleichbar. Insbesondere bei flach verlaufenden Neigungswechseln oder bei starkem Bewuchs (weniger Laserpunkte) traten Lagedifferenzen von $\Delta x/y = 0,5-1$ m und Höhendifferenzen von $\Delta z < 20$ cm auf.

Damit wurden die nutzerseits formulierten Anforderungen, s. Abschn. 3.1, erfüllt.

4 Prozessierung des Wasserlauf-DGM

4.1 Nutzeranforderungen

Neben den LIDAR-Punktclouden standen insbesondere die abgeleiteten 3D-Kanten, Fächerlotdaten als 1m-Quadratgitter, 25m- und 100m-Querprofile mit Landanschlüssen, digitale Gebäudeinformationen der bayerischen Flur- und Gebäudeflurkarte sowie analoge Bestandsunterlagen zur DGM-W-Modellierung zur Verfügung. Nutzerseits waren drei DGM-Varianten des Mainwasserlaufs zu prozessieren: 1m-Quadratgitter, Irreguläre Dreiecksgitternetze (TIN, hybrides Modell) mit ausgesparten Gebäudeflächen und ausgedünnt nach morphologischen Kriterien.

4.2 Methodik und Ausführung

Zur Trennung der LIDAR-Geländepunkte von denen der Gewässeroberfläche war im Vorfeld die Wasser-Land-Grenze abzuleiten. Im 1. Schritt wurde ein Differenzenmodell aus einer modellierten Gelände- und einer modellierten Wasseroberfläche gerechnet (s. BROCKMANN, H. & MANDLBURGER, G., 2001). Aufgrund von überstehender Vegetation im Uferbereich und geringer Punktzahl auf der Wasseroberfläche war das Ergebnis interaktiv nachzuarbeiten.

Der Aufwand der interaktiven Nachbearbeitung zur Bestimmung der Wasser-Land-Grenze war vertretbar. Die DGM-W-Modellierung sollte mit der Software SCOP++ des I.P.F. erfolgen. Es waren alle vorgenannten Daten einzubeziehen. Zur Berücksichtigung der Wasserwechselzone waren die Querprofile soweit möglich morphistisch zu verdichten (s. MANDLBURGER, G., 2000). Die zu berücksichtigenden Bauwerke wurden vorab aus analogen Bestandsunterlagen konstruiert. Ebenfalls wurden die nicht mit dem Main verbundenen Gewässer mit einer Böschungeneigung von 1:5 und einer angenommenen Wassertiefe von 2m konstruiert. Bei Häfen und dgl. wurde die Fahrrinntiefe eingearbeitet.

Als Basis-DGM-W für die Prozessierung der geforderten Modellvarianten wurde ein hybrides Modell mit einer Gitterweite von 1 m und eingeketteten Kanteninformationen erzeugt, s. Abb. 8. Zur Glättung der zufälligen Abweichungen wurde ein mittlerer Filterbetrag von 15 cm angesetzt.

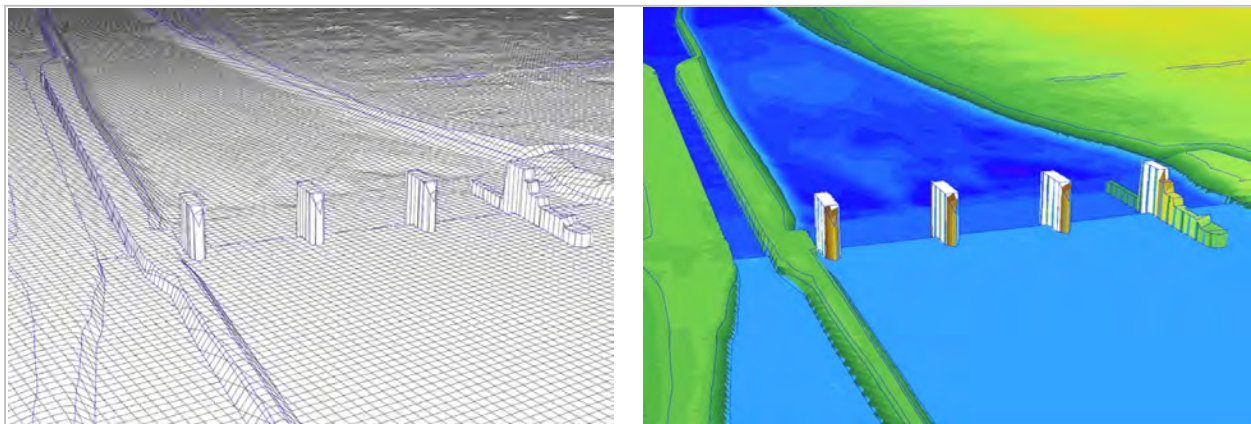


Abb. 8: DGM-W (hybrides Modell, ausgedünnt) im Bereich der Wehr- und Kraftwerksanlage Wallstadt

5 Hydrodynamisch-numerische Modellierung

5.1 Anforderungen an Modelle

Künstliche und natürliche Gewässer, wie frei fließende oder staugeregelte Flüsse, Kanäle, Talsperren, Seen und Küstengewässer, dienen in einer modernen Industriegesellschaft vielfältigen Zwecken (Zielke, 1999). An den großen deutschen Flüssen ist dies insbesondere die Nutzung als umweltfreundlicher Verkehrsträger, bei dessen Ausbau und Unterhaltung die zum Teil widerstreitenden Anforderungen Dritter zu berücksichtigen sind, wie z.B. die Interessen des Naturschutzes und Hochwasserschutzes. Um den unterschiedlichen Ansprüchen bei einem möglichst breiten Konsens der Anfordernden gerecht zu werden, sind verlässliche Modelluntersuchungen erforderlich, mit denen detaillierte Kenntnisse über Wasserstände, Strömungs- und Transportprozesse erhalten werden (s. Abb. 9). Zu diesem Zweck werden heute überwiegend mathematische, hydrodynamisch-numerische Modelle (HN-Modelle) eingesetzt, die aufgrund der kontinuierlich wachsenden Leistung von Supercomputern einen immer höheren räumlichen wie zeitlichen Detaillierungsgrad aufweisen. Damit sind aber auch die Anforderungen an die Qualität und Auflösung der für Modellerstellung und -betrieb erforderlichen Daten stetig gewachsen, so dass heute für Digitale Geländemodelle von Wasserläufen (DGM-W) LIDAR-Daten mit einer Auflösung von mehreren Punkten je Quadratmeter in Kombination mit photogrammetrisch oder anderweitig bestimmten Bruchkanten benötigt werden. Die für HN-Modelle darüber hinaus benö-

tigten hydrologischen, hydraulischen und sedimentologischen Daten seien an dieser Stelle der Vollständigkeit halber nur erwähnt.

5.2 Berechnungsgitter für numerische Modelle

Die hydrodynamischen Gleichungen zur Berechnung von Strömungen, die Navier-Stokes-Gleichungen, sind nicht geschlossenen analytisch lösbar.

Es können nur Näherungslösungen an den diskreten Punkten eines Gitters berechnet werden, wobei Güte und Genauigkeit der Berechnung mit der Auflösung des Gitters zunehmen. Die verschiedenen mathematisch-numerischen Näherungsverfahren, wie Methode der Finiten Differenzen oder Methode der Finiten Elemente, erfordern jeweils unterschiedliche Berechnungsgitter. Die Strömung in Flüssen und Küstengewässern lässt sich in erster Näherung meist durch zweidimensionale tiefenintegrierte Strömungsgleichungen (Flachwassergleichungen) beschreiben. Die hierfür erforderlichen Berechnungsgitter sind dementsprechend ebenfalls zweidimensional, und die räumliche Information der Geländehöhe wird durch einen Parameter an den Knotenpunkten des Berechnungsgitters repräsentiert.

5.3 Numerische Anforderungen an unstrukturierte Berechnungsgitter

Von den verschiedenen numerischen Näherungsverfahren haben sich die Methoden durchgesetzt, die auf unstrukturierten Berechnungsgittern beruhen, da sie eine sehr genaue Abbildung der Geländegeometrie bei einem Minimum an diskreten Berechnungspunkten erlauben. Die verschiedenen numerischen Methoden stellen sehr unterschiedliche Anforderungen an die Berechnungsgitter. Im Rahmen dieses Artikels werden daher nur ein paar allgemeine Aussagen getroffen, die mehr oder weniger restriktiv für die meisten Berechnungsverfahren gelten:

- keine Unstetigkeiten an Geländesprüngen (endliche Sohlgradienten),
- kompakte Elemente (z.B. Verhältnis kürzeste ÷ längste Seite größer als $1 \div 10$),
- Vermeidung stumpfwinkliger Dreieckselemente (z.B. größter Innenwinkel $< 135^\circ$) und
- keine sprunghafte Änderung der Diskretisierung (z.B. Flächenverhältnis von zwei benachbarten Elementen $A_1 \div A_2 < 5$, wobei $A_1 > A_2$ gilt).

5.4 Gittergenerierung auf der Basis eines DGM-W mit Bruchkanten

Die aufgeführten numerischen Anforderungen werden im Allgemeinen von triangulierten Digitalen Geländemodellen nicht erfüllt, so dass eine Optimierung oder auch eine Neuerstellung des Berechnungsgitters notwendig ist. Bei einer Gitternetzoptimierung wird das DGM sukzessive verändert, indem Gitterpunkte entfernt werden, die aus morphologischen Gründen überflüssig sind, und Gitterpunkte hinzugefügt werden, die aufgrund der numerischen Anforderungen des Berechnungsverfahrens (s. Abschnitt 5.3) erforderlich sind. Eine derartige Gitternetzoptimierung

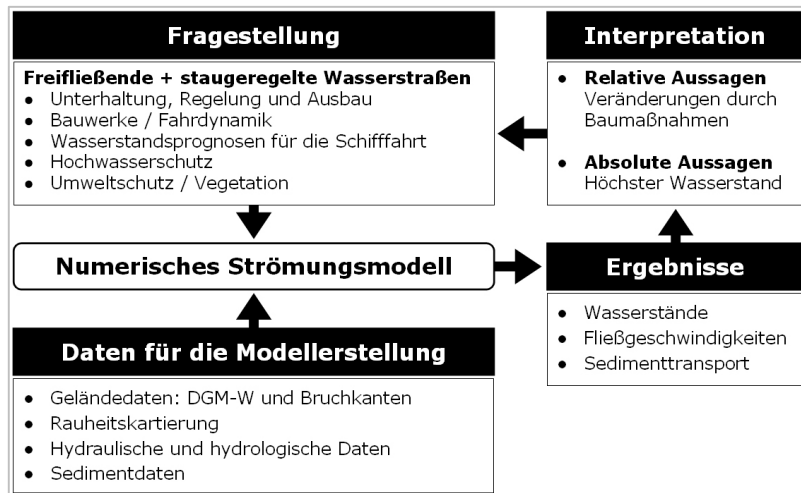


Abb. 9: Ablauf einer modelltechnischen Untersuchung

ist aufwändig, und es können nicht immer sämtliche numerischen Anforderungen vollständig erfüllt werden. Eine andere Methode zur Generierung von Berechnungsgittern beruht auf einer Optimierung der Bruchkanten, die z.B. durch eine photogrammetrische Auswertung von Luftbildern oder wie im vorliegenden Beispiel aus LIDAR-Daten ermittelt wurden. Durch eine geeignete weitestgehend manuelle Bearbeitung wird der Punktabstand auf den Bruchkanten an die vom Modellierer gewünschte Diskretisierung angepasst (s. Abb. 10). Das aus Dreieckselementen bestehende Berechnungsgitter kann dann anschließend mithilfe eines Frontgenerierungsalgorithmus erstellt werden, wobei in Abhängigkeit von der Aufbereitung der Bruchkanten die numerischen Anforderungen verhältnismäßig einfach vollständig erfüllt werden können.

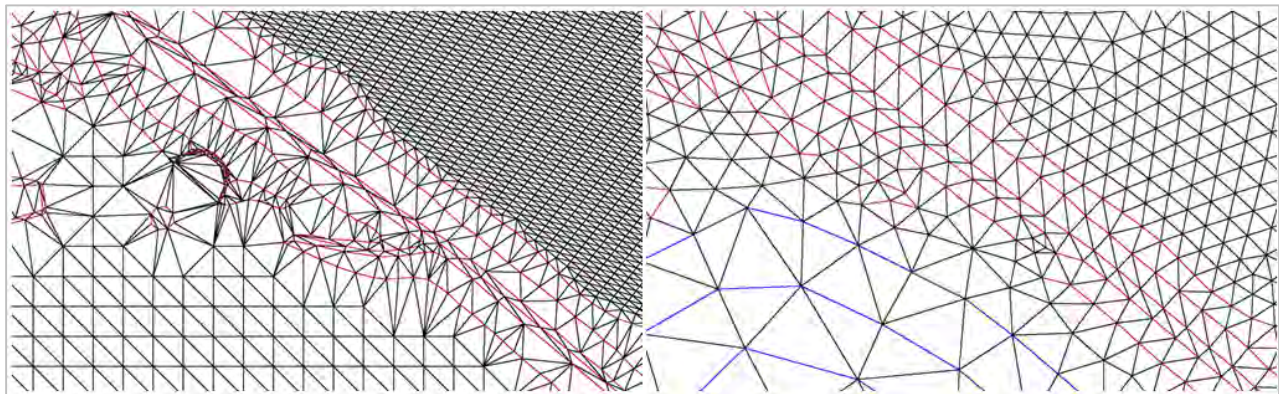


Abb. 10: Aufbereitung von Bruchkanten zur Erstellung eines Berechnungsgitters (links: Bruchkanten im DGM-W; rechts: Bruchkanten in einem Finite-Elemente Gitter)

6 Literaturverzeichnis

- BRIESE, C, 2004: "[Breakline Modelling from Airborne Laser Scanner Data](#)"; Reviewer: K. Kraus, H. Maas; Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung
- BRIESE, C. & ATTWENGER, M., 2005: Modellierung dreidimensionaler hydrologisch und hydraulisch relevanter Geländekanten aus hochauflösenden Laser-Scanner-Daten, BfG-Kolloquium, Praxisorientierte und vielseitig nutzbare Fernerkundungseinsätze an der Elbe, Magdeburg (invited); 09-30-2004; in: "Praxisorientierte und vielseitig nutzbare Fernerkundungseinsätze an der Elbe", Bundesanstalt für Gewässerkunde, 1 (2005), 35 - 45
- BROCKMANN, H. & MANDLBURGER, G., 2001: Aufbau eines Digitalen Geländemodells vom Wasserlauf der Grenzoder. Publikation der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung, Band 10, 2001, S. 199 - 208Mod
- MANDLBURGER, G., 2000: Verdichtung von Echolot Querprofilen unter Berücksichtigung der Flussmorphologie. Österreichische Zeitschrift für Vermessung & Geoinformation, 88. Jahrgang, Heft 4, 2000, S. 211 - 214
- ZIELKE, W. et al. (1999): Numerische Modelle von Flüssen, Seen und Küstengewässern, DVWK-Schriften, Band 127, Bonn, ISBN 3-89554-099-4

Waldlückenerfassung aus ALS Daten mittels α -Shapes

L. EYSN¹, M. HOLLAUS¹, W. MÜCKE¹, M. VETTER^{1,2} & N. PFEIFER¹

1) TU Wien, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, Gußhausstraße 27 – 29, 1040 Wien;

2) TU Wien, Centre for Water Resource Systems, Karlsplatz 13, 1040 Wien;

E-Mail: le@ipf.tuwien.ac.at

Für die Aufnahme von topographischen Informationen wird verstärkt flugzeuggetragenes Laserscanning (engl. Airborne Laser Scanning, ALS) eingesetzt. Dabei eignet sich ALS als aktive Fernerkundungsmethode besonders für die Abtastung von bewaldeten Gebieten. Speziell in Forstanwendungen ist die aus ALS Daten abgeleitete Höheninformation der Vegetation eine fundamentale Eingangsgröße, die der Berechnung vieler Forstparameter (Baumhöhen, Stammvolumen, Biomasse) zugrunde liegt. Zusätzlich haben sich ALS Daten als Input für eine, auf Objekthöhen basierte, Waldabgrenzung bereits bewährt. Bis dato werden hauptsächlich Orthophotos für eine manuelle bzw. semi-automatisierte Waldabgrenzung verwendet, wobei schattige Bereiche die Detektierung von Waldrändern und vor allem Waldlücken stark beeinträchtigen. Hier zeigt ALS ein großes Potential und bietet in den meisten Fällen gegenüber einer manuellen Bildinterpretation deutliche Vorteile. Im Rahmen dieser Arbeit wird ein vollautomatischer Ansatz präsentiert der Waldlücken in einem automatisierten Prozess aus ALS Daten extrahiert. Die Abgrenzung der Waldlücken erfolgt durch eine Kombination aus Rasteroperationen und einer Punkt-basierten α -Shape Ableitung, die mit Open Source Software realisiert wurde. Die Methode wird für ein rund 5 km² großes Waldgebiet am Achensee in Tirol angewandt. Die automatisch ausgewiesenen Waldlücken zeigen eine sehr gute Übereinstimmung mit manuell abgrenzbaren Waldlücken und zeigen das hohe Potential der vorgestellten Methode für eine großflächige automatische und damit objektivere Waldlückenerfassung.

1 Einleitung

In der Forstwirtschaft ist die Erfassung und Überwachung der horizontalen Bestandesstruktur essentiell für die Bewertung und Analyse des Waldlebensraumes. Dabei sind Informationen über die räumliche Verteilung und Struktur von Waldlücken ein wesentlicher Bestandteil für die Zustandsbewertung (MAIER UND HOLLAUS, 2006; 2008). Die Gründe für das Entstehen von Waldlücken bzw. Löchern im Kronendach sind vielfältig, wie zum Beispiele durch Schlägerung, Windwurf oder Schädlingsbefall, ihr Auftreten gibt aber Auskunft über die dynamischen Prozesse, denen der Wald unterworfen ist. Diese Waldlücken ermöglichen einen verstärkten Lichteinfall, was folglich zu einer Verjüngung des Bestandes führt. Ebenso erhalten Spezies, die zuvor durch Lichtmangel unterdrückt waren, die Chance sich durchzusetzen. In waldökologischen Untersuchungen und in Biodiversitätsstudien, welche sich mit Entwaldung, Fragmentierung oder Degradation des Waldes beschäftigen, nehmen die Waldlücken eine wichtige Indikatorenstellung ein (EUROPEAN COMMISSION, 2008). Durch großflächigen Schädlingsbefall oder lokale Windwurfschäden kann das natürliche Schutzpotenzial eines alpinen Waldes negativ beeinflusst werden, was zu Förderung von Hangrutschungen, Steinschlägen oder der Ausbreitung von Lawinenabrissgebieten im Wald führen kann (MAIER ET AL., 2006). Die terrestrische Erfassung und Überwachung solcher Gebiete vor allem im Hochalpinen Raum ist

nur unter großem manuellen Aufwand möglich und mit erheblichen finanziellen Belastungen durch Personaleinsatz verbunden. Eine zeit- und kosteneffiziente Kartierung und Quantifizierung von Waldlücken über große Gebiete kann daher nur mit Methoden der Fernerkundung aus der Luft erfolgen. Der Großteil der entwickelten oder praktisch erprobten Ansätze stützt sich dabei auf die Auswertung und Interpretation von Luftbildern bzw. Orthophotos, zumeist im sichtbaren, aber auch im infraroten Teil des Spektrums (z.B. BLASCHKE UND HAY, 2001; GREENHILL ET AL., 2003). Die Abhängigkeit der Luftbilder vom Sonnenstand und der sich daraus ergebende Texturverlust in abgeschatteten Bereichen sind besonders bei der Kartierung von Waldlücken nachteilig. Hohe Bäume am Rand der Lücken werfen abhängig von der Aufnahmesituation besonders lange Schatten und machen eine Interpretation oder Auswertung in diesen Bereichen schwierig bis unmöglich. Flugzeuggetragenes Laserscanning (engl. Airborne Laser Scanning, ALS) zeigt gerade in diesen Gebieten seine besondere Stärke. Als aktive Messmethode kommt ALS ohne die Inanspruchnahme von Sonnenlicht aus und ist daher nicht durch Schattenwirkung eingeschränkt (KRAUS, 2003). Durch die direkte Messung von Objekthöhen und seine Fähigkeit zur Durchdringung der Baumkrone durch kleine Öffnungen im Blätterdach, ist ALS sehr gut für die strukturelle Erfassung von Vegetation geeignet. Aufgrund dieser Vorteile hat sich ALS unter anderem in der Forstwirtschaft als gängige Methode zur großflächigen Datenaufnahme etabliert (HOLLAUS ET AL., 2009; NÆSSET, 2004; NÆSSET ET AL., 2004). Zusätzlich haben sich ALS Daten als Basis für die auf Objekthöhen basierte Waldabgrenzung bereits bewährt (KOUKOULAS UND BLACKBURN, 2004).

In der vorliegenden Arbeit wird ein Ansatz zur vollautomatischen Erfassung von Waldlücken aus ALS Daten präsentiert. Diese Arbeit ist Teil des Forschungsprojektes Laser-Wood (Abschätzung der oberirdischen Waldbiomasse aus Laserscanning- und Waldinventurdaten), finanziert durch den Österreichischen Klima- und Energiefonds. In Kapitel 2 wird das Untersuchungsgebiet sowie die vorliegenden ALS Daten beschrieben, in Kapitel 3 wird die entwickelte Methode erläutert und in Kapitel 4 werden die Resultate dargestellt und diskutiert. Abschließend beinhaltet Kapitel 5 eine qualitative Bewertung der Ergebnisse und gibt einen Ausblick über mögliche Verbesserungen und Entwicklungen.

2 Testgebiet

Als Testgebiet steht der Bezirk Schwaz in Tirol mit einer Fläche von 1843 km² zur Verfügung. Für die vorliegenden Untersuchungen wird ein rund 5 km² großes Waldgebiet an der südöstlichen Seite des Achensees analysiert. Dieses Teiluntersuchungsgebiet liegt im Rofengebirge und ist Teil der nördlichen Kalkalpen. Dominierende Baumarten im Untersuchungsgebiet sind die Fichte, die Weißkiefer und die Rotbuche, wobei im Bereich der Waldgrenze ausgedehnte, auf felsigen Boden wachsende Latschenbestände vorherrschen. Die Seehöhe variiert zwischen 980 m ü.A. im Bereich des Achensees und 2041 m ü.A. des Klobenjochs. Das Gebiet ist geprägt durch steile Hänge (mittlere Neigung ca. 35°) hin zum Achensee, schroffen Gesteinsformationen und mehreren eingeschnittenen Wildbächen (siehe Abb. 1.). Im Uferbereich des Achensees sind am Fuße dieser Wildbäche deutlich Schwemmfächer erkennbar. Der im Tal dichte, überwiegend mit hohem Nadelgehölz bestockte Wald wird mit zunehmender Seehöhe lockerer und geht in einen dichten Latschenbestand über der bis in die Kampfzone ragt (siehe Abb. 1.).

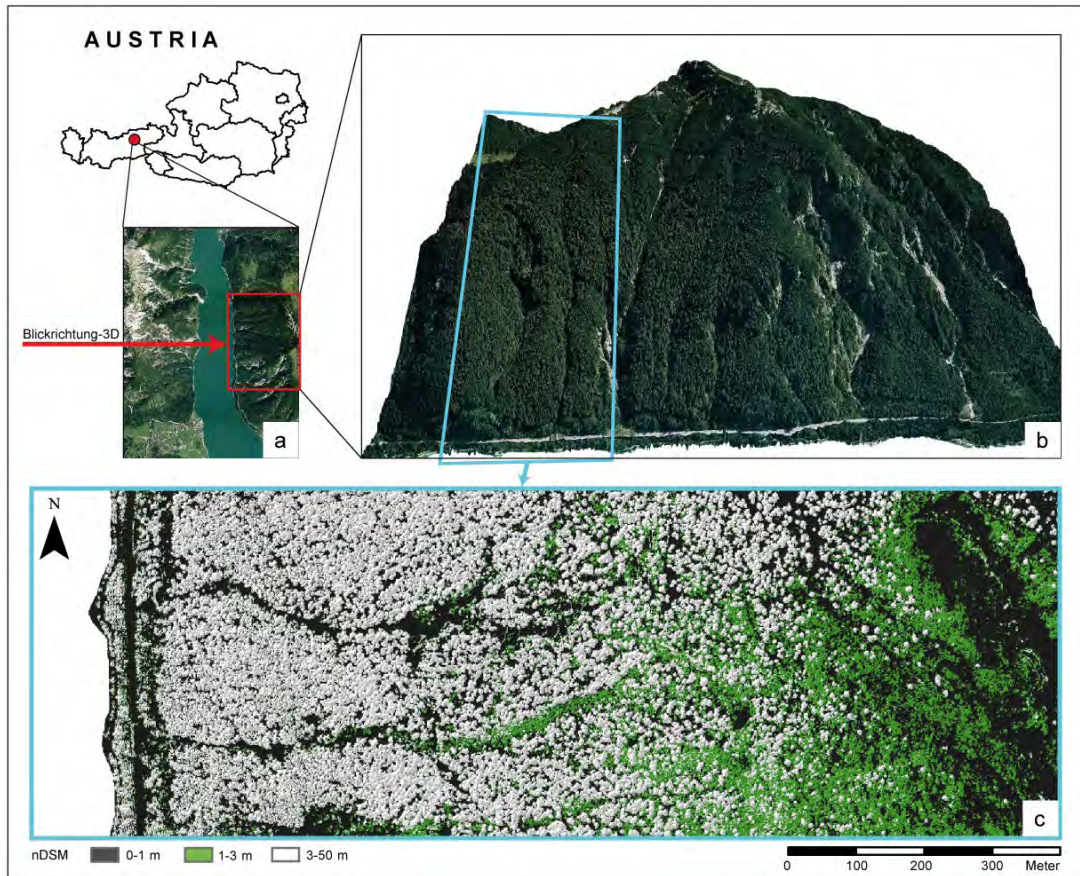


Abb. 1: Übersicht über das Testgebiet Achensee. a) Luftbild des Achensees – Das Testgebiet (rot umrandet) befindet sich im Osten des Sees (Bildquelle Google Maps); b) 3-D Ansicht des Testgebietes (Blick Richtung Osten); c) farbcodiertes nDSM eines Ausschnitts des Testgebietes. Bestockte Flächen über 3 m Höhe (weiß codiert) werden von Westen nach Osten hin lockerer und gehen in geschlossene Latschenbestände (grün codiert) über.

Im Rahmen des Projektes Laser-Wood wurden die georeferenzierten ALS Punktwolken sowie die mittels hierarchisch robuster Filterung berechneten Geländemodelle (engl. digital terrain model, DTM) mit 1 m Gitterweite vom Amt der Tiroler Landesregierung zur Verfügung gestellt. Die Aufnahme der Laserdaten erfolgte im Mai 2007 mit einem ALTM 3100 Laserscanner der Firma Optech. Dieses Messsystem sendet Laserpulse mit einer maximalen Frequenz von 167 kHz im infraroten Bereich des Spektrums (1064 nm) und kann dabei bis zu vier diskrete, aufeinanderfolgende Reflexionen detektieren. Im Testgebiet betrug die durchschnittliche Flughöhe über Grund 1200 m und die durchschnittliche Punktdichte 5.4 Pkt/m².

Aus den Punktwolken wurde ein Oberflächenmodell (engl. digital surface model, DSM) mit einer Gitterweite von 1 m berechnet. Dabei wurde abhängig von der Oberflächenrauigkeit der höchste Punkt pro Rasterzelle ermittelt bzw. gleitende Schrägebenen durch eine lokale Punktwolke geschätzt (HOLLAUS ET AL., 2010). In einem weiteren Schritt wurde ein normalisiertes Oberflächenmodell (engl. normalized digital surface model, nDSM) mit einer Auflösung von 1 m als Basis für die Abgrenzung der Waldlücken berechnet (siehe Abb. 1). Die Berechnung des DSMs und des nDSMs erfolgte mittels OPALS (2010).

3 Methode

Weltweit gibt es viele unterschiedliche, regional angepasste Definitionen für Waldflächen und Waldlücken. Dies führt bei der Abgrenzung von Waldflächen sowie bei der Detektion von Waldlücken zum Teil zu stark voneinander abweichenden Ergebnissen die eine nationale Vergleichbarkeit erschweren bzw. verhindern. Im folgenden Kapitel wird auf die in der vorliegenden Arbeit angewandten Definitionen näher eingegangen. In Kapitel 3.2 wird die angewandte Methode zur Waldlückenerfassung beschrieben. Für die Umsetzung der beschriebenen Schritte werden die Open Source Software Module GRASS und CGAL angewandt (GRASS DEVELOPMENT TEAM 2010, CGAL 2010).

3.1 Definitionen

Waldfläche

Zur Ableitung der potentiellen Waldmaske kommt die Walddefinition der österreichischen Waldinventur (ÖWI) in einer stark vereinfachten Form zur Anwendung. Laut ÖWI muss eine als Wald deklarierte Fläche folgende Kriterien erfüllen: Mindestfläche 500 m², Mindestbreite 10 m, Mindestüberschirmung 30%, Mindesthöhe 2-7 m. Zusätzlich hängt die Waldklassifizierung von der vorliegenden Nutzung (z.B. Forststraße) ab. Diese Abhängigkeit wird für die folgenden Analysen vernachlässigt. Folgende Parameter zur Waldflächen-abgrenzung werden festgesetzt:

- *Mindesthöhe:* Im östlichen Teil des Testgebietes findet man felsige Strukturen und ein Latschenfeld vor, die in dieser Arbeit als Vereinfachung vernachlässigt werden. Die im nDSM ersichtliche Bewuchshöhe dieses Bereiches liegt bei ca. 3 m. Die Mindesthöhe wird aus diesem Grund auf 3 m festgesetzt. Es sei jedoch darauf hingewiesen, dass Latschen- und Grünerlenbestände unter Einhaltung der in der ÖWI vorgegebenen Kriterien normalerweise als Wald zu zählen sind.
- *Mindestfläche:* Die in der ÖWI angegebene Waldmindestfläche von 500 m² wird berücksichtigt.
- *Überschirmungsgrad:* Es wird ein Mindestüberschirmungsgrad von 30% festgelegt, wobei die Berechnung des Überschirmungsgrades mit einer vereinfachten Beziehung zwischen Baumhöhe und maximal erlaubtem Baumabstand erfolgt (siehe Kapitel 3.2).

Waldlücke

Als grundlegende Definition einer Wald- bzw. Bestandeslücke dient die Definition der ÖWI, wobei die Wuchsklasse "Lücke" als eine lokal abgrenzbare flächige Öffnung im Kronenschluss bezeichnet wird. Die Abgrenzung einer Lücke zum benachbarten geschlossenen Wald erfolgt laut ÖWI mit dem abgeloteten Trauf der Krone (HAUK UND SCHADAUER, 2009). Die zulässige Fläche einer Lücke muss zwischen 50 m² und 500 m² liegen. Zusätzlich muss ein Überschirmungsgrad von kleiner 30% gegeben sein. In der vorliegenden Arbeit wird folgender Parameter berücksichtigt:

- *Mindestfläche:* Neben der Definition nach ÖWI werden für Versuchszwecke noch zwei weitere Klassen eingeführt (500 m² bis 1 ha bzw. 1 ha bis ∞).

3.2 Waldlückenerfassung

Die vorgestellte Waldlückenerfassung setzt sich aus den folgenden zwei Arbeitsschritten zusammen:

- Im ersten Arbeitsschritt wird eine „potentielle Waldmaske“ abgeleitet um eine Grundlage für die weiterführende Waldlückenerfassung zu schaffen.
- Im zweiten Arbeitsschritt werden Waldlücken innerhalb der abgeleiteten potentiellen Waldmaske extrahiert und nach ihrer Größe klassifiziert.

3.2.1 Potentielle Waldmaske

Wie in Kapitel 3.1 definiert wird eine Fläche unter Berücksichtigung mehrerer Parameter als Wald klassifiziert. Aktuell wird die operationelle, manuelle Abgrenzung von Wald unter Zuhilfenahme von Tabellenwerken vorgenommen, wobei ein Mindestüberschirmungsgrad von 30% durch einen maximal zulässigen Baumabstand (welcher wiederum abhängig von Baumart und Kronendurchmesser ist) gewährleistet wird. Im Rahmen des Projektes Laser-Wood wurde die Beziehung Überschirmungsgrad versus maximal zulässiger Baumabstand (Stammabstand) durch das Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft (BFW) in einer vereinfachten Formel, Baumartenunabhängig auf die Baumhöhe umgelegt, wobei die Baumhöhen (die aus ALS-Daten zuverlässig ermittelt werden können) als Eingangsgröße für die Berechnung der maximal zulässigen Baumabstände herangezogen werden. Bezogen auf den Überschirmungsgrad bedeutet dies, dass bei Baumabständen kleiner als der jeweils maximal erlaubte Baumabstand ein Überschirmungsgrad größer 30% stets gegeben ist. Als Vereinfachung wird die im Untersuchungsgebiet vorherrschende mittlere Baumhöhe von ca. 25 m herangezogen um den maximalen Stammabstand von 24 m zu berechnen.

Für die Ermittlung der Stammabstände im Testgebiet werden zunächst lokale Maxima im nDSM detektiert und diese als Stammpositionen angenommen. Bei der lokalen Maximumsuche wird die definierte Mindesthöhe von 3 m berücksichtigt. Die exportierten Koordinatentripel (Stammpositionen) werden mittels CGAL (Delaunay-Triangulation) trianguliert und mittels α -Shape zu Waldpolygonen aggregiert. Das Ergebnis des α -Shape ist ein Flächenpolygon, das der Kontur der Punktwolke (=Stammpositionen) folgt. Abhängig vom α -Wert (definiert den Radius eines Kreises) folgt das Polygon Einbuchtungen und innenliegenden Löchern mit unterschiedlichem Detail. (EDELSBRUNNER UND MÜCKE, 1994). Im Prinzip werden bei der α -Shape-Berechnung Kanten benachbarter Punktpaare (Kanten aus der Triangulierung), die größer als der Kreis des α -Shapes sind, eliminiert. Für die vorliegende Waldabgrenzung wird ein α -Wert von 12 m angewandt um den maximalen Stammabstand und damit den Mindestüberschirmungsgrad zu gewährleisten. Abschließend werden Flächenpolygone unter 500 m² eliminiert. Das Ergebnis ist eine stark generalisierte Waldmaske die als Grundlage für die weiterführende Waldlückendetektion dient.

3.2.2 Waldlückendetektion

Um die Waldlücken zu detektieren wird in einem ersten Schritt eine binäre Karte aus dem nDSM generiert, wobei potentielle Waldlückenpixel (nDSM <3 m) den Wert eins erhalten. Da laut Definition Waldlücken nur in einer als Wald ausgewiesenen Fläche auftreten können wird die Binärkarte mit der in Kapitel 3.2.1 ermittelten potentiellen Waldmaske verschnitten, wobei

Bereiche außerhalb der Waldmaske eliminiert werden. Im nächsten Schritt werden im Binärbild alle zusammenhängenden Bereiche von potentiellen Waldlückenpixeln mit einer ID versehen, wobei für jede ID die Anzahl der zusammenhängenden Pixel ermittelt wird. Da eine Zelle 1 m² entspricht, kann die Anzahl der gezählten Zellen pro ID als Fläche dieses Bereiches umgelegt werden. Nun wird eine Reklassifizierung aller zusammenhängenden Bereiche hinsichtlich ihrer Fläche vorgenommen. Alle IDs mit Flächen zwischen 50 m² und 500 m² werden der Klasse 0, alle zwischen 500 m² und 1 ha der Klasse 1 und alle größer 1 ha der Klasse 2 zugeordnet. Flächen kleiner 50 m² werden vernachlässigt. In einem weiteren Schritt werden die Koordinaten der Pixelzentren sowie deren Klasse als ASCII-Files, sortiert nach Klassen, exportiert. Die Punktwolke jeder Klasse wird abschließend mittels α -Shape vektorisiert und zu Flächenpolygonen umgewandelt. Dabei werden klassenabhängige α -Werte angewandt um eine klassenabhängige Generalisierung der gefundenen Bereiche zu erzielen. Flächen zwischen 50 m² und 500 m² werden wenig generalisiert und erhalten einen empirisch ermittelten α -Wert (Radius) von 1 m (entspricht der doppelten Pixelgröße). Flächen zwischen 500 m² und 1 ha sowie größer 1 ha werden stärker generalisiert und erhalten einen empirisch ermittelten α -Wert von 4 m (achtfache Pixelgröße).

4 Resultate und Diskussion

Die Lage der anhand des nDSMs gefundenen Stammpositionen wurde visuell mit dem Orthophoto verglichen. Speziell im Bereich der Waldgrenze liegt eine sehr hohe Übereinstimmung mit den visuell am Orthophoto detektierten Stammpositionen vor (siehe Abb. 2,a). Im Bereich von Latschen, Felsen und anthropogenen Objekten mit einer Objekthöhe über 3 m werden im Zuge der lokalen Maximumsuche fälschlicherweise vereinzelt Stammpositionen gefunden. Da der Fokus der vorliegenden Arbeit auf der Waldlückenerfassung liegt, werden diese Verfälschungen vernachlässigt. Die mittels α -Shape automatisch abgeleiteten Flächenpolygone stimmen weitgehend mit der im Orthophoto ersichtlichen Waldfläche überein. An der oberen Waldgrenze werden einzeln stehende Bäume mit Baumabständen größer 24 m mittels α -Shape zuverlässig abgegrenzt (siehe Abb. 2,b).

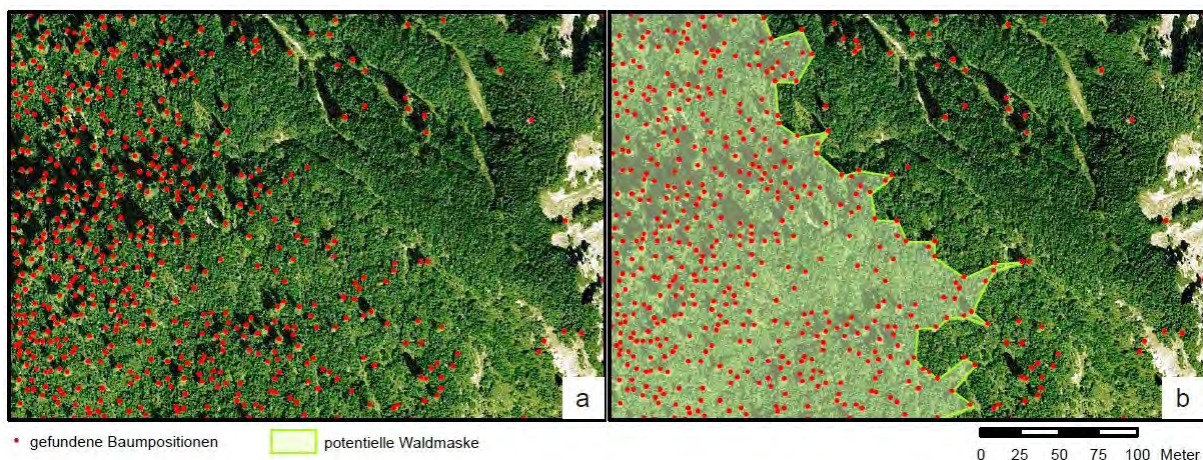


Abb. 2: Automatisch extrahierte Stammpositionen (a) und abgeleitete Waldmaske (b) an der oberen Waldgrenze, überlagert einem Orthophoto (Bildquelle: Google Maps).

Im Vergleich zu einer manuellen Waldabgrenzung im Bereich der oberen Waldgrenze mittels Orthophotos führt die vorgestellte vollautomatische Methode (unter Vernachlässigung der Nutzungsklassifizierung) zu reproduzierbaren Ergebnissen und zu einer deutlichen Reduktion der Auswertekosten. Die abgeleitete Waldmaske wurde als Grundlage für die Waldlückendetektion herangezogen. Die in Abb. 3,b in rot dargestellten Waldlücken repräsentieren die automatisch gefundenen Lücken mit einer Größe zwischen 50 m² und 500 m² die der Definition laut ÖWI entsprechen. Wie zu erwarten nimmt die Anzahl der Lücken mit steigender Seehöhe zu, wobei ab einer Höhe von rund 1700 m ü.A. der Wald unter Vernachlässigung der Latschenfelder in eine lockeren, offenen Bestand übergeht und nur noch vereinzelt Lücken in dieser Klasse detektiert werden können. Die in blau (500 m² - 1 ha) und rosarot (>1 ha) dargestellten Lücken wurden durch die Vektorisierung mittels α -Shape im Gegensatz zu den Lücken der ersten Klasse stärker generalisiert und überbrücken teilweise einzelne Bäume innerhalb der Lücken (siehe Abb. 3,b). Deutlich zu erkennen sind die beiden Wildbäche innerhalb der Waldfläche sowie ein vermehrtes Auftreten der Lücken der mittleren Klasse (500 m² - 1 ha) an der oberen Waldgrenze. Die größten Waldlücken (>1 ha) treten hauptsächlich an der oberen Waldgrenze auf und stellen durch das nach oben hin offene Intervall eine Art Restfläche dar.

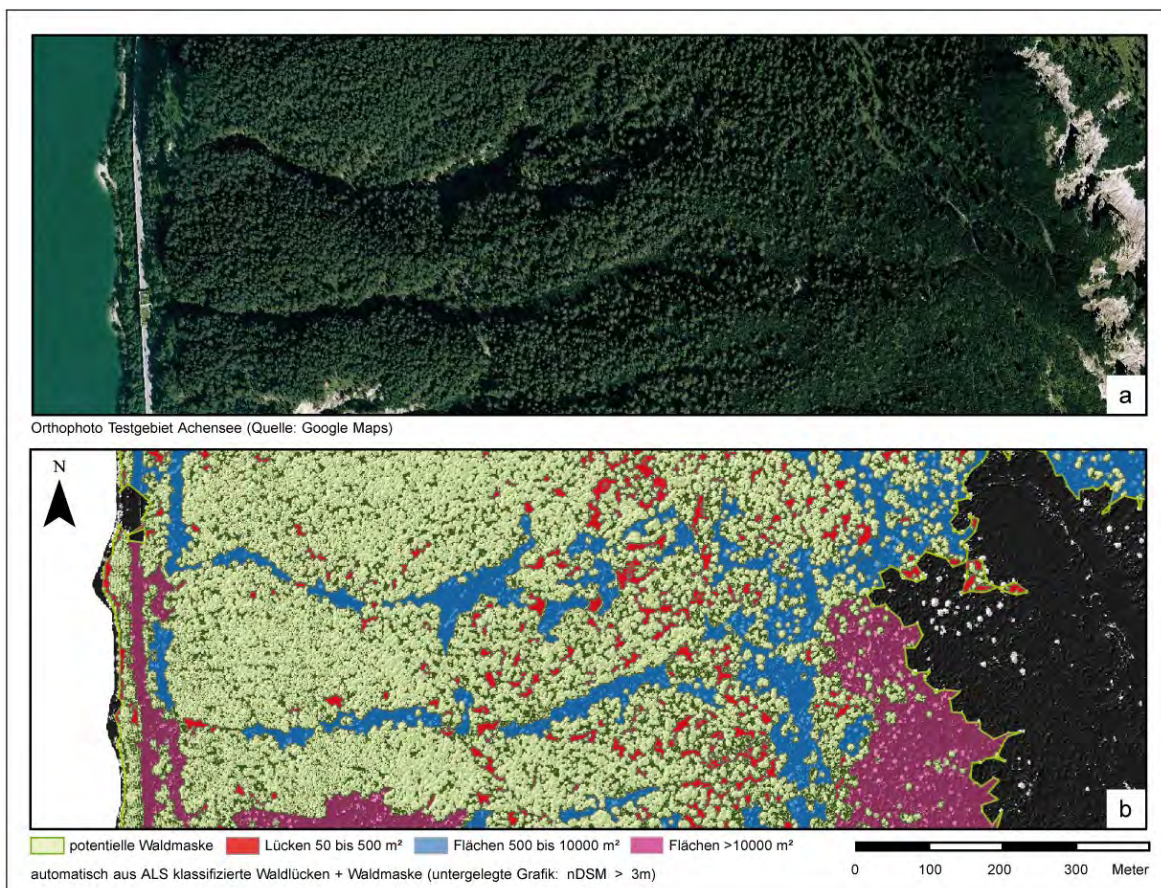


Abb. 3: Ergebnis der automatischen Waldabgrenzung und der Waldlückendetektion. a) Orthophoto (Bildquelle: Google Maps); b) automatisch aus ALS klassifizierte Waldlücken mit unterlegtem, farbcodiertem nDSM und automatisch abgeleiteter, potentieller Waldmaske. In Rot sind Lücken mit einer Größe zwischen 50 m² und 500 m², in Blau jene zwischen 500 m² und 1 ha und in Rosarot jene >1 ha dargestellt.

Generell gilt zu sagen, dass die beiden Waldlückenklassen ($>500 \text{ m}^2$) nicht der Definition der ÖWI unterliegen. Die ÖWI sieht für solche Flächen die Klassifizierung als Freifläche vor.

Die manuelle Auswertung von Waldlücken anhand von Orthophotos ist speziell unterhalb der oberen Waldgrenze aufgrund von vermehrten Objektschatten sehr schwierig bis unmöglich und setzt ein geschultes Expertenwissen voraus. Hier zeigen sich die deutlichen Vorteile der ALS Daten und des vollautomatischen Ansatzes zur Waldabgrenzung und Waldlückendetektion. Es kommt dabei zu einer deutlichen Zeit- und Kostenreduktion bei der Auswertung. Letztendlich werden durch die automatische Auswertung reproduzierbare und objektivere Ergebnisse erzielt.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die in der vorgestellte Methode gezeigte vollautomatische Abgrenzung von Waldflächen und Waldlücken aus ALS Daten zeigt deutliche Vorteile gegenüber einer manuellen Abgrenzung aus Orthophotos und erzielt unter Berücksichtigung der in Punkt 3.1 beschriebenen Vereinfachungen reproduzierbare Ergebnisse. Eine hohe Übereinstimmung mit den im Orthophoto ersichtlichen Waldflächen bzw. Waldlücken wird erzielt. Speziell in schattigen Bereichen des Orthophotos sowie an der oberen Waldgrenze bietet die vollautomatische Abgrenzung aus ALS Daten klare Vorteile. Die Waldlückenklasse 50 m^2 bis 500 m^2 laut Definition nach ÖWI zeigt ein vermehrtes Auftreten der Waldlücken mit steigender Seehöhe. Die stark generalisierte Waldlückenklasse 500 m^2 bis 1 ha zeigt im Bereich des dicht bestockten Bestandes klar den Verlauf der beiden Wildbäche. Eine Kombination dieser Klasse mit der lokalen Geländeneigung, Exposition und Rauigkeit kann in weiterer Folge für Naturgefahrenanalysen herangezogen werden.

Eine Verbesserung der automatischen Waldabgrenzung wird durch eine baumhöhen- und baumartenabhängige Methode angestrebt, wobei weiterführend eine baumartenabhängige Beziehung zwischen Baumhöhe und maximalem Baumabstand notwendig ist. Dies kann durch Verwendung von gewichteten α -Shapes erzielt werden. Dabei werden die Gewichte von den Baumhöhen abgeleitet. Für eine weiterführende Analyse der Dynamik der Waldlücken ist die Verwendung von multitemporalen ALS-Daten notwendig. Durch die Verwendung von full-waveform ALS-Daten samt physikalischer Parameter wird beispielsweise die Baumartendetektion, eine Unterscheidung zwischen anthropogenen und natürlichen Objekten oder eine Klassifikation von Felswänden erleichtert. Für die Definition von Waldlücken nach ÖWI ist eine Erweiterung des zulässigen Flächenintervalls von 50 m^2 bis 500 m^2 um eine weitere Klasse (z.B. 500 m^2 bis 1 ha) sowie die Einführung eines Geometrieparameters (z.B. Mindestbreite) empfehlenswert, da eine 500 m lange und 1 m breite Lücke laut aktueller Definition ebenfalls als Lücke klassifiziert wird. Für eine weiterführende Entwicklung der gezeigten Methode wird eine Überprüfung von Waldmaske und Waldlücken mit manuell aus Orthophotos abgegrenzten Flächen sowie Forstinventurdaten angestrebt.

Danksagung

Die vorliegende Arbeit ist Teil des Projekts LASER-WOOD (822030) und wird finanziert durch den Österreichischen *Klima- und Energiefonds* im Rahmen des Programms "NEUE ENERGIEN 2020". Die Laserdaten wurden vom Amt der Tiroler Landesregierung, Abteilung Geoinformation zur Verfügung gestellt.

6 Literaturverzeichnis

- BLASCHKE, T., & HAY, G. 2001. Object-oriented image analysis and scale-space: Theory and methods for modeling and evaluating multi-scale landscape structure. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* vol. 34, 4\W5: 22-29.
- CGAL 2010. Computational Geometry Algorithms Library. www.cgal.org (accessed 1.6.2010).
- EDELSBRUNNER, H., MÜCKE, E., 1994: Tree-dimensional alpha shapes. – *ACM Transactions* 13(1): 43-72.
- EUROPEAN COMMISSION. 2008. The economics of ecosystems and biodiversity interim report. From: http://ec.europa.eu/environment/nature/biodiversity/economics/pdf/teeb_report.pdf
- GRASS DEVELOPMENT TEAM 2010. GRASS 6.5 User Manual. www.grass.itc.it (accessed 1.6.2010).
- GREENHILL, D. R., RIPKE, L. T., HITCHMAN, A. P., JONES, G. A., & G. WILKINSON, G. 2003. Characterization of Suburban Areas for Land Use Planning Using Landscape Ecological Indicators Derived From Ikonos-2 Multispectral Imagery. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 41: 2015-2021.
- HAUK, E., SCHADAUER, K., 2009: Instruktion für die Feldarbeit der Österreichischen Waldinventur 2007-2009 (Fassung 18.03.2009), 41-51
- HOLLAUS, M., DORIGO, W., WAGNER, W., SCHADAUER, K., HÖFLE, B. AND MAIER, B., 2009: Operational wide-area stem bolume estimation based on airborne laser scanning and national forest inventory data. *International Journal of Remote Sensing* 30 (19), 5159-5175.
- HOLLAUS M., MANDLBURGER G., PFEIFER N., MÜCKE W., 2010. Land cover dependent derivation of digital surface models from airborne laser scanning data. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and the Spatial Information Sciences. PCV 2010, Paris, France, Vol. 39(3)*. pp. 6.
- KOUKOULAS, S. AND BLACKBURN, G.A., 2004: Quantifying the spatial properties of forest canopy gaps using LIDAR imagery and GIS. *International Journal of Remote Sensing* 25 (15), 3049-3071.
- KRAUS, K., 2003: Laser-Scanning - ein Paradigmawechsel in der Photogrammetrie. *Bulletin SEV/VSE (invited)* 9, 19-22.
- MAIER, B. AND HOLLAUS, M., 2006: Laserscanning - Ein Wald aus Punkten. *Bündner Wald* 59, 47-53.
- MAIER, B. AND HOLLAUS, M., 2008: Waldstrukturerfassung mittels Laserscanning im Schutzwald. *Die kleine Waldzeitung* 3, 9-11.
- MAIER, B., TIEDE, D. AND DORREN, L.K.A., 2006: Assessing Mountain Forest Strucutre Using Airborne Laser Scanning and Landscape Metrics. In: (Eds.): *Object-based Image Analysis (OBIA06)*, July 4-5, Salzburg, Austria, 6.
- NÆSSET, E., 2004: Accuracy of Forest Inventory Using Airborne Laser scanning: Evaluating the First Nordic Full-scale Operational Project. *Scandinavian Journal of Forest Research* 19, 554-557.
- NÆSSET, E., GOBAKKEN, T., HOLMGREN, J., HYYPPÄ, H., HYYPPÄ, J., MALTAMO, M., NILSSON, M., OLSSON, H., PERSSON, Å. AND SÖDERMAN, U., 2004: Laser scanning of forest resources: the Nordic experience. *Scandinavian Journal of Forest Research* 19 (6), 482-499.
- OPALS, 2010. OPALS - Orientation and Processing of Airborne Laser Scanning Data, <http://www.ipf.tuwien.ac.at/opals/>. Last accessed June 2010.

Maßstabsabhängige Modellierung von Strukturlinien aus Airborne Laser Scanning Daten

CHRISTIAN BRIESE¹, GOTTFRIED MANDLBURGER¹ & WERNER MÜCKE²

Zusammenfassung: Digitale Geländemodelle (DGM) stellen eine wichtige Datengrundlage für viele unterschiedliche Anwendungen dar. Für die Erstellung hochgenauer DGM werden typischerweise gemessene individuelle Stützpunkte und linienhaft erfasste Geländestrukturen genutzt. Im Rahmen dieses Beitrags wird eine Methode und Software zur vollautomatischen Ableitung von Strukturlinien aus Airborne Laser Scanning (ALS) Daten vorgestellt. Anhand unterschiedlicher Datensätze werden im Rahmen dieser Publikation die automatisch erzielten Ergebnisse vorgestellt, diskutiert und mit unabhängigen Referenzdaten verglichen. Es wird vor allem auch auf die maßstabsabhängige Ableitung von Strukturlinien für unterschiedliche DGM Auflösungen eingegangen. Es gelingt durch entsprechende Ausdünnung der Oberflächenpunkte, die Generalisierung der automatisch generierten Strukturlinien einer manuellen photogrammetrischen Auswertung anzunähern.

1 Einleitung

Digitale Geländemodelle (DGM) stellen eine wichtige Datengrundlage für viele unterschiedliche Anwendungsbereiche, wie z.B. der Hydrologie, Forstwirtschaft und Stadtplanung, dar. Für die Erstellung hochgenauer DGM werden typischerweise gemessene individuelle Stützpunkte und linienhaft erfasste Geländestrukturen genutzt. Während früher großflächige Geländemodelle vor allem anhand von Daten, die mittels manueller photogrammetrischer Stereoauswertung gewonnen wurden, erstellt wurden, haben sich in den letzten Jahren automatisierte Datenerfassungsmethoden, wie das luftgestützte Laserscanning (engl. Airborne Laser Scanning, ALS) und die automatische Bildkorrelation (engl. image matching) immer mehr bewehrt. Im Gegensatz zu den manuellen Datenerfassungsmethoden ist es allerdings bei diesen Methoden notwendig die dichte automatisch generierte Punktwolke, die unterschiedliche Objekte (die Geländeoberfläche aber auch künstliche und natürliche Objekte auf dem Gelände) repräsentiert, in geländemodellrelevante Punkte zu klassifizieren. Für diese Klassifizierung, die oft auch als Filterung bezeichnet wird, stehen viele unterschiedliche Verfahren zur Verfügung (vgl. BRIESE, 2010). Anhand der klassifizierten Bodenpunkte können sehr detaillierte DGM erstellt werden. Im Gegensatz zum DGM aus manuell erfassten Daten beinhalten diese Modelle keinerlei Strukturlinieninformation. Diesem Nachteil wirkt die zumeist sehr dichte automatisierte Datenerfassung entgegen wodurch Linien (Grate, Böschungslinien, etc.) implizit im DGM repräsentiert werden. Für bestimmte Anwendungen (z.B. in der Hydraulik) oder für die

¹ Christian Briese, Gottfried Mandlbürger, Christian Doppler Labor "Spatial Data from Laser Scanning and Remote Sensing", Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, Technische Universität Wien, Gußhausstraße 27-29, A-1040 Wien; E-Mail: {cb, gm}@ipf.tuwien.ac.at

² Werner Mücke, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, Technische Universität Wien, Gußhausstraße 27-29, A-1040 Wien; E-Mail: wm@ipf.tuwien.ac.at

Datenreduktion der sehr dichten DGM kann allerdings eine explizite Bestimmung von Strukturlinien gewünscht werden.

Im Rahmen dieses Beitrags wird die am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung (I.P.F.) der Technischen Universität Wien entwickelte Methode und Software zur vollautomatischen Ableitung von Strukturlinien aus ALS Punktwolken vorgestellt (Abschnitt 2). Diese Methode besteht aus drei Schritten: 1. Näherungsweise Detektion von potentiellen Linienpunkten, 2. Modellierung von Strukturlinien anhand der potentiellen Linienpunkte und 3. Überarbeitung der Modellierungsergebnisse. Im Abschnitt 3 werden Ergebnisse dieser Strukturlinienmodellierung anhand verschiedener Datensätze mit unterschiedlicher Punktdichte vorgestellt (Main Fluss (3.1), städtisches Gebiet (3.2) und alpines Gebiet (3.3)). Die Ergebnisse werden diskutiert und zudem mit unabhängigen Referenzdaten verglichen. Anschließend wird auf die maßstabsabhängige Ableitung von Strukturlinien für unterschiedliche DGM Auflösungen eingegangen. Dabei werden die Ergebnisse für unterschiedliche Auflösungen der Oberflächenpunktwolke vorgestellt und den photogrammetrisch manuell erfassten Strukturlinien des österreichweiten DGM (10m Gitter mit Strukturlinien) des Bundesamts für Eich- und Vermessungswesen gegenübergestellt.

2 Vollautomatische Modellierung von Strukturlinien

Für die Modellierung von Strukturlinien aus ALS Daten wurden einige rasterbasierte Verfahren vorgestellt (vgl. BRÜGELMANN (2000), GOMES-PEREIRA & WICHERSON (1999) und SUI (2002)). Diese Verfahren bestimmen typischerweise anhand eines bereits erstellten DGM im ersten Schritt mittels unterschiedlicher Rasteroperationen 2D Linienpixel, aus denen anschließend 2D Linien mittels eines Vektorisierungsalgorithmus erstellt werden. Im letzten Schritt wird die Höhe der Linien typischerweise aus dem gegebenen DGM interpoliert. WEHR & DUZELOVIC (2009) beschreiben hingegen ein Verfahren, das anhand eines gefilterten TIN (Triangulated Irregular Network) eine Detektion von Liniensegmenten (Dreieckskanten) durchführt. In einem weiteren Schritt verbessern WEHR & DUZELOVIC (2009) den Linienvorlauf durch einen lokalen Verschnitt von Geraden quer zur initialen Liniengerichtung. Im Gegensatz zu diesen Verfahrenen wird in der Publikation BRIESE (2004) ein semi-automatisches Verfahren zur Strukturlinienbestimmung direkt anhand der ALS Punktwolke vorgestellt. Dieses Verfahren basiert auf der lokalen Verschnidung von robust bestimmten Ebenenpaaren, die anhand der ursprünglich irregulär verteilten ALS Punktwolke bestimmt werden. Dieses Verfahren, das Schritt für Schritt erweitert wurde (z.B. bis hin zur Anwendung für terrestrische Laserscanner Daten, vgl. BRIESE & PFEIFER, 2008) bildet die Basis des hier vorgestellten Verfahrens zur vollautomatischen Strukturlinienbestimmung.

In den folgenden Abschnitten wird das Verfahren und die softwaremäßige Umsetzung im Programmpaket STREX (STRucture line EXtractor) zur vollautomatischen Strukturlinienbestimmung vorgestellt. Das Verfahren besteht aus drei Schritten: Zunächst werden potentielle Liniensegmente detektiert (Abschnitt 2.1), anhand dieser Liniensegmente erfolgt die Modellierung der Strukturlinien (Abschnitt 2.2) und das Modellierungsergebnis wird in einem finalen 3. Schritt verbessert (Abschnitt 2.3). Im Gegensatz zu anderen publizierten Verfahren, zeichnet sich diese Methode dadurch aus, dass sie eine simultane 2.5D bzw. 3D Bestimmung der Linien ermöglicht und zudem vor der Klassifizierung der ALS Daten in Boden und Nicht-Bodenpunkte angewandt werden kann bzw. soll. Vorab ist keine DGM Erstellung

(Raster, Gitter oder TIN) erforderlich. Das Verfahren benötigt als Eingabe nur die unklassifizierte ALS-Punktwolke. Erst im Rahmen der Modellierung erfolgt eine lokale Filterung (Klassifizierung in Boden- und Nicht-Bodenpunkte), wodurch Vegetationspunkte im Bereich der Strukturlinie keinen signifikanten Beitrag zum 3D Linienverlauf liefern. Anschließend können die ermittelten Linien die Klassifikation der Punktwolke in diesen Bereichen unterstützen. Dies ist von besonderem Vorteil, da ohne das Wissen einer vorliegenden Strukturlinie oftmals Klassifizierungsfehler durch ungerechtfertigtes Ausrunden auftreten können (vgl. SITHOLE & VOSSSELMAN, 2004).

2.1 Detektion von potentiellen Liniensegmenten

Für die Detektion von initialen Linienpunkten wurden unterschiedliche rasterbasierte Methoden publiziert. Rasterbasierte Verfahren haben den Vorteil, dass sobald das Raster vorliegt die Rechenzeiten aufgrund der Rastertopologie typischerweise gering sind. Allerdings kann durch die Modellbildung Information über Oberflächendetails verloren gehen (AXELSSON, 1999) und die Erstellung des Modelles benötigt auch einen gewissen Rechenaufwand (in Abhängigkeit von der Interpolationsmethode).

Um die im vorigen Absatz erwähnten Nachteile zu umgehen und möglichst die gesamte Information der ALS Punktwolke zu nutzen, wurde im Rahmen dieser Forschungsaktivitäten eine Methode basierend auf einer lokalen Untersuchung der geometrischen Eigenschaft benachbarter ALS-Punkte entwickelt. Dieser Ansatz basiert auf der Analyse der Hauptkrümmung κ_{\min} und κ_{\max} einer ausgleichenden Quadrik (Fläche zweiter Ordnung), die für einen ALS-Punkt anhand seiner benachbarten Punkte bestimmt werden kann. Die lokalen Werte für die Hauptkrümmung und die jeweiligen Hauptkrümmungsrichtungen können nach der Ausgleichung anhand der allgemein liegenden Quadrik mittels Hauptachsentransformation bestimmt werden. Um zu entscheiden, ob in der Nähe des zu untersuchenden Punktes ein Liniensegment liegt, kann man einerseits den Wert für die maximale Hauptkrümmung κ_{\max} und andererseits das Verhältnis zwischen minimaler und maximaler Hauptkrümmung $\kappa_{\min}/\kappa_{\max}$ untersuchen. Ein großer Wert für κ_{\max} weist auf eine signifikante Krümmung der Quadrik bzw. der lokalen Oberfläche hin während das Verhältnis zwischen κ_{\min} und κ_{\max} ein Maß für die „Linienhaftigkeit“ (großer Unterschied zwischen den beiden Werten: linienhafte Struktur, ähnliche Größenordnung beider Werte: Paraboloid) darstellt. Neben den Krümmungswerten ermöglicht die Hauptachsentransformation auch noch die Bestimmung der Krümmungsrichtungen und die Position des Symmetriepunktes, der zur lokalen Verbesserung der Position des Liniensegmentes genutzt werden kann. Als Ergebnis dieses Prozesses steht der jeweilige Symmetriepunkt und die lokale Strukturlinienrichtung (zu κ_{\min} zugehörige Krümmungsrichtung) in Form eines Liniensegmentes zur Verfügung.

Die softwaremäßige Umsetzung dieser Methode erfolgte im Kommandozeilenprogramm STREXdetector. Neben der Angabe der Ein- und Ausgabedateien kann die Methode zur Selektion der Nachbarn (2D Fenster oder n-Nachbarn), die Fenstergröße bzw. die jeweilige Anzahl der benachbarten Punkte, Schwellwerte für das σ_0 der Ausgleichung und der maximalen Krümmung κ_{\max} sowie die Berechnungsmethode (2.5D, 3D oder polar) gewählt werden. Weiters lässt sich steuern ob die Berechnung für jeden oder nur für jeden n-ten Punkt erfolgen soll. Für die interne Verwaltung der Daten kommt ein sogenannter DataManager (vgl. OPALS, 2010) zum Einsatz, der einen besonders effizienten Zugriff auf große Punktmengen und den jeweiligen Nachbarn ermöglicht.

2.2 Modellierung von Strukturlinien

Basierend auf den initialen Strukturliniensegmenten ist es in der Folge notwendig, gesamte Linienzüge zu bestimmen. Dies könnte durch eine Verbindung von Liniensegmenten erfolgen, wobei allerdings berücksichtigt werden müsste, dass nahe einer Position mehrere geringfügig versetzte Segmente mit leicht streuender Segmentrichtung existieren. Zudem kann es durchaus auch passieren, dass stellenweise, z.B. aufgrund lokal zu geringer Punktdichte oder hervorgerufen durch Vegetation, keine Strukturliniensegmente detektiert werden konnten. Um diese Probleme zu umgehen beruht das entwickelte Konzept auf der von BRIESE (2004) vorgestellten Methode zur semi-automatischen Linienbestimmung durch Linienwachsen anhand von robust bestimmten Ebenenpaaren. In diesem Prozess werden, ausgehend von einem initialen Segment, schrittweise in beide Linienrichtungen, anhand der umliegenden ALS Punkte, weitere Linienpunkte bestimmt.

Im Gegensatz zu der semi-automatischen Methode BRIESE (2004) kann mit Hilfe automatisch bestimmten Strukturliniensegmente ein vollautomatischer Prozess ausgehend von den detektierten Liniensegmenten zur Modellierung von Strukturlinien erreicht werden. Beginnend mit dem ersten detektierten Segment erfolgt ein Linienwachsen, solange benutzerspezifizierte Anforderungen (Schnittwinkel der Ebenen, Ausgleichsgenauigkeit, etc.) eingehalten sind. Nach der automatischen Bestimmung der Linie setzt der Prozess der Modellierung mit dem nächsten detektierten Segment fort. Im Gegensatz zu dem semi-automatischen Ansatz, bei dem die Ableitung von mehreren Linien vom Benutzer gesteuert werden kann bzw. muss, ist es im Rahmen der vollautomatischen Abarbeitung (bei dem zwischen Bruch- und Sprunglinien automatisch unterschieden werden kann) notwendig bereits modellierte Strukturlinien zu berücksichtigen, um ein abermaliges Modellieren einer bereits bestimmten Linie zu verhindern. Dieses Problem trifft in der Praxis recht häufig auf, da üblicherweise im Rahmen der Detektion viele Liniensegmente entlang einer Linie bestimmt werden. Im Rahmen der praktischen Implementierung im Kommandozeilenprogramm STREXmodeller wird dieses Problem mit einem räumlichen Index (im speziellen Fall einem R*-Baum) gelöst, der alle bereits bestimmten Linienzüge speichert. Im Rahmen der Prozessierung wird unmittelbar vor jedem neuen (Start)-Liniensegment überprüft, inwiefern in der unmittelbaren Nähe eine Linie bereits modelliert wurde. Diese Überprüfung wird fortlaufend während des Linienwachstums durchgeführt. Mit Hilfe der Detektion aus dem Abschnitt 2.1 und der erweiterten Modellierung der Strukturlinien ist eine großflächige vollautomatische Bestimmung der Linien möglich.

2.3 Überarbeitung der Modellierungsergebnisse

Nach der Analyse der Ergebnisse der vollautomatischen Linienbestimmung gemäß Abschnitt 2.2. konnten einige offene Problembereiche identifiziert werden, die mittels einiger einfacher Regeln automatisch korrigiert werden können. Diese Probleme sind einerseits das Schließen kleiner Löcher zwischen benachbarten Linien mit annähernd parallelem Linienverlauf oder aber auch das Entfernen kurzer Linienzüge, die aufgrund ihrer geringen Länge für die Folgeanwendung keine weitere Relevanz haben. Diese Nachprozessierungsschritte sind in dem Kommandozeilenprogramm STREXpostProcessor implementiert, wobei die lokale Nachbarschaftsanalyse der Linien wiederum mittels eines räumlichen Index gelöst wurde. Dieser zusätzliche Prozessierungsschritt ermöglicht eine signifikante Reduktion der notwendigen manuellen Nachbearbeitung der automatisch generierten Strukturlinien.

3 Anwendungsbeispiele

In diesem Abschnitt werden praktische Ergebnisse der automatischen Linienmodellierung anhand unterschiedlicher Einsatzgebiete basierend auf ALS mit variierender Punktdichte vorgestellt.

3.1 Uferbereich „Main“

Im Rahmen des Projektes „Wasserlauf DGM Main-2“, das am I.P.F. im Auftrag und in Zusammenarbeit mit der Deutschen Bundesanstalt für Gewässerkunde abgewickelt worden ist war eine der Aufgabenstellungen die Extraktion von relevanten Strukturlinien entlang des Flusses Main (BROCKMANN et al., 2010). Der zur Verfügung stehende ALS Datensatz bestand aus 61 Flugstreifen (Streifenüberlappung ~ 50%) und umfasste ein Gebiet der Größe 10km (Ost-West) * 17km (Nord-Süd). Die Punktdichte lag bei ca. 4 letzten Echo Punkten/m². Um eine höchstmögliche Genauigkeit zu erzielen, wurde vor der Strukturlinienbestimmung eine Fein-Georeferenzierung aller Flugstreifen durchgeführt (Ressl et al., 2009). Nach der Fein-Georeferenzierung wurden die im Abschnitt 2 vorgestellten Methoden zur Bestimmung von Strukturlinien angewandt. Insgesamt wurden ca. 12000 Linien mit einer Gesamtlänge von mehr als 500km vollautomatisch berechnet. Das Ergebnis der Detektion von Liniensegmenten und das Ergebnis der anschließenden vollautomatischen Modellierung der Linien für einen kleinen Ausschnitt des Projektgebietes sind der Abbildung 1 zu entnehmen. Für die anschließende hydraulische Modellierung wurden die Linien visuell kontrolliert und gegebenenfalls nachbearbeitet. Weitere Details sind auch der Publikation BROCKMANN et al. (2010) zu entnehmen.

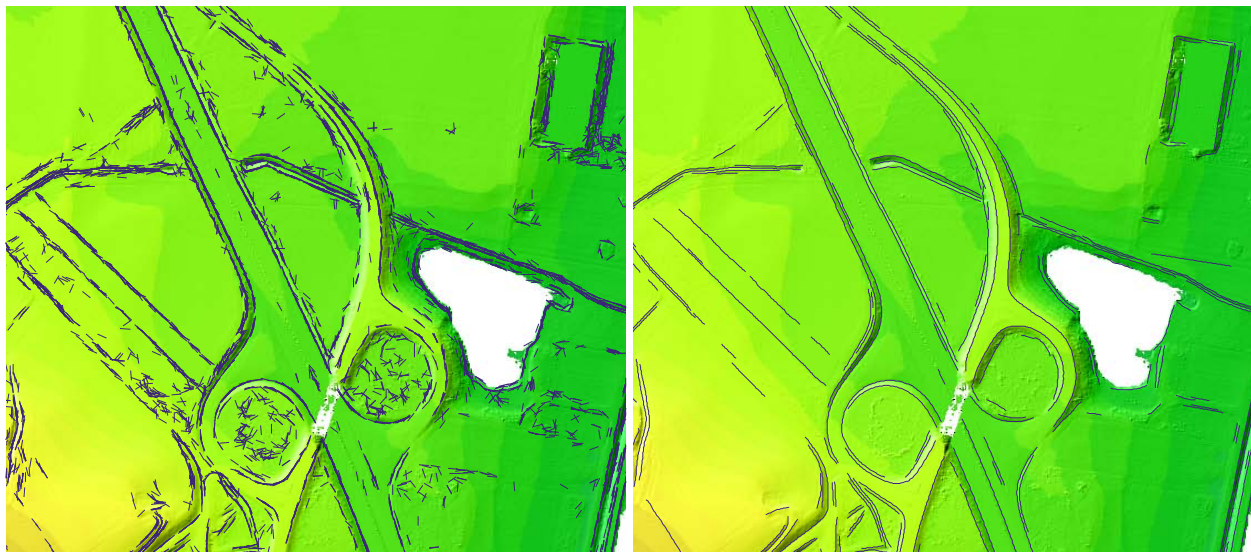


Abb. 1: Automatische Strukturlinienextraktion; Links: Automatisch detektierte Liniensegmente; Rechts: Vollautomatisch modellierte Strukturlinien; Im Hintergrund ist jeweils die Höhenkodierung des DGM visualisiert; Ausschnitt: ca. 550m*480m.

3.2 Städtisches Gebiet

Das gesamte Wiener Stadtgebiet wurde Ende 2006/Anfang 2007 von der Fa. Diamond Airborne Sensing mit einem Riegl full-waveform Scanner LMS-Q560 mit einer Punktdichte größer als 20

letzte Echo Punkte/m² erfasst. Die Überlappung der Flugstreifen betrug mehr als 50%. Auch im Rahmen dieses Projektes wurde eine Fein-Georeferenzierung der ALS-Daten (in diesem Fall mit der Software RiPROCESS der Fa. RiegI) durchgeführt. Die vorgestellte Methode zur Strukturlinienmodellierung wurde auch anhand dieses hochauflösenden Datensatzes unter Verwendung aller letzten Echo Punkte erprobt. Die Ergebnisse wurden vorhandenen photogrammetrisch und terrestrisch bestimmten Strukturlinien der Stadtvermessung Wien (MA41) gegenübergestellt. Das Ergebnis dieser Gegenüberstellung ist in Abbildung 2 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass ein Großteil der relevanten Strukturlinien anhand der ALS Daten bestimmt werden konnte. Als fehlend können v.a. Situationlinien, die sich kaum als geländeverlaufsrelevant herausstellen, und Linien unter Brücken identifiziert werden. Ein Genauigkeitsvergleich ausgewählter Linien (Abstand der jeweiligen Lotfußpunkte) ergab eine Standardabweichung der 3D Differenzen von $\pm 0.28\text{m}$ und eine mittlere 3D Differenz von 0.53m . Die doch relativ niedrige Standardabweichung gibt ein Maß für die Streuung der automatischen Linienpunkte um die Referenzlinien an, während die doch relativ große mittlere Differenz auf systematische Unterschiede hindeutet. Diese systematischen Differenzen beinhalten neben unterschiedlichen lokalen Liniendefinitionen (aufgrund der visuellen Analyse die Hauptursache) auch Fehlereinflüsse, die auf Restdiskrepanzen der Georeferenzierung der beiden Datensätze hindeuten.

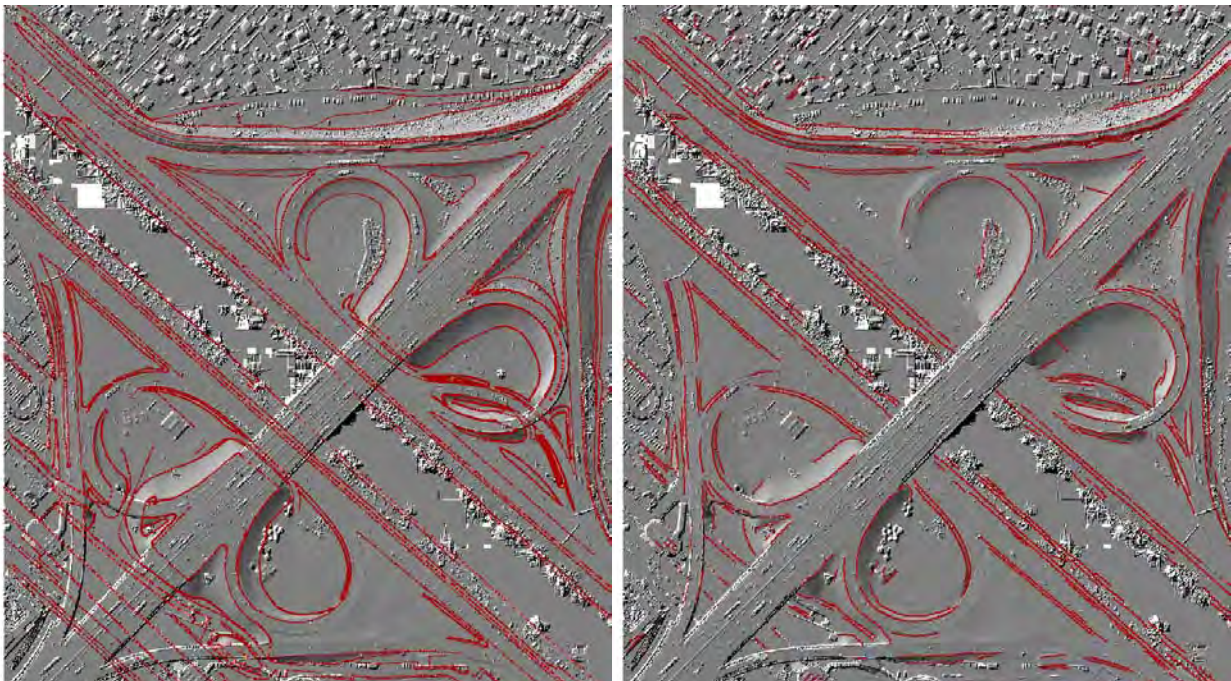


Abb. 2: Automatische Strukturlinienextraktion anhand eines sehr dichten ALS Datensatzes der Stadt Wien im Bereich eines Autobahnknotens verglichen mit einem Referenzdatensatz; Links: Photogrammetrisch und terrestrische Referenzdaten der Stadt Wien (Stadtvermessung, MA 41); Rechts: Vollautomatisch modellierte Strukturlinien; Ausschnitt: ca. 510m*558m.

3.3 Alpines Gebiet

Im Rahmen eines Projektes mit dem österreichischen Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen (BEV) wurde anhand von ALS Daten des Landes Vorarlberg (Punktdichte ca. 1 letzter Echo Punkt/m²) die automatische Ableitung von Strukturlinien auch im alpinen

Gelände getestet. Neben der vollautomatischen Ableitung aus ALS Daten wurde auch eine semi-automatische Bestimmung anhand der vorhandenen BEV Linien als Start-Liniensegmente untersucht. Die Ergebnisse der Linienmodellierung wurden mit den manuell erfassten Strukturlinien des österreichweiten DGM (10m Gitter mit Strukturlinien) des Bundesamts für Eich- und Vermessungswesen verglichen. Eine Gegenüberstellung der semi-automatisch bestimmten Linien mit den photogrammetrischen Linien des BEV ist der Abbildung 3 zu entnehmen. Beim Versuch, aus den ALS Daten des alpinen Gebietes vollautomatisch Strukturlinien abzuleiten, stellte sich heraus, dass eine Vielzahl von teilweise sehr kurzen Linien bestimmt wurde. Die Summe der Linien ergab zwar ein ähnliches Bild wie das der BEV Linien, allerdings gab es kaum längere Linienzüge, da die Detailliertheit der ALS Daten in dem stark bewegten felsigen Gebiet eine generalisiertere Modellierung verhinderte (weitere Untersuchungen: siehe Abschnitt 4).

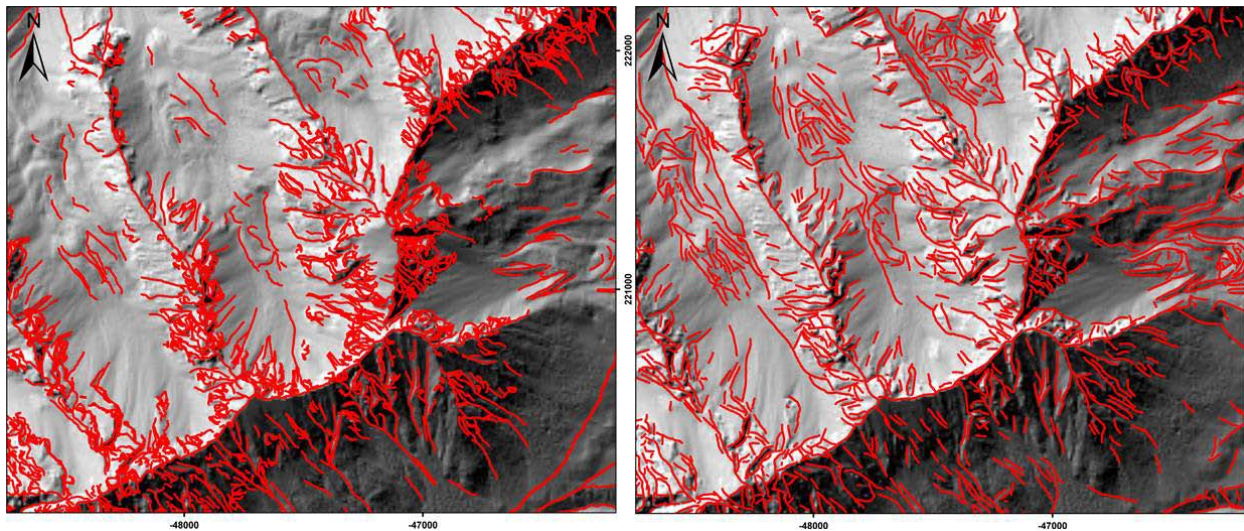


Abb. 3: Semi-automatische Strukturlinienextraktion im alpinen Gebiet; Links: Photogrammetrische Referenzdaten des BEV; Rechts: Semi-automatisch modellierte Strukturlinien.

4 Maßstabsabhängige Modellierung von Strukturlinien

Um in dem im Abschnitt 3.3. vorgestellten alpinen Gebiet eine vollautomatische mit dem BEV-Datensatz vergleichbare generalisierte Liniendarstellung zu erhalten, wurde die maßstabsabhängige Modellierung von Strukturlinien untersucht. Durch Ausdünnung der ALS Daten wurde versucht, eine stärker generalisierte Oberflächenbeschreibung als Eingangsdatensatz für die vollautomatische Liniensextraktion bereitzustellen (Datenpyramide). Die Ausdünnung der ALS Daten erfolgte mittels eines regelmäßigen Rasters, wobei in jeder Rasterzelle nur ein ALS Punkt akzeptiert wurde (in diesem Fall jener Punkt, der der Rasterzellenmitte am nächsten lag). Mit Hilfe dieses Prozesses wurden ein 5m und 10m ALS Datenpyramidenlevel generiert. Anhand dieser beiden Datensätze wurde der Prozess zur vollautomatischen Strukturlinienmodellierung angewendet. Die Ergebnisse für den bereits in der Abbildung 3 visualisierten Bereich sind der Abbildung 4 (etwas größerer Bereich) zu entnehmen. Es zeigte sich, dass durch die Datenpyramiden eine mehr oder weniger starke Generalisierung der Linien erreicht wurde. Während die Linien, die anhand der 5m ALS Punktwolke erstellt

wurden, einen ähnlichen Generalisierungsgrad wie die semi-automatisch bestimmten Strukturlinien aufweisen, führt die stärkere Generalisierung der 10m Daten zu deutlich stärker generalisierten Linienverläufen. Es zeigt sich, dass durch entsprechende Ausdünnung der Oberflächenpunkte, die Generalisierung der automatisch generierten Strukturlinien der manuellen Auswertung, die einen bestimmten Zielmaßstab dienen soll, angenähert werden kann.

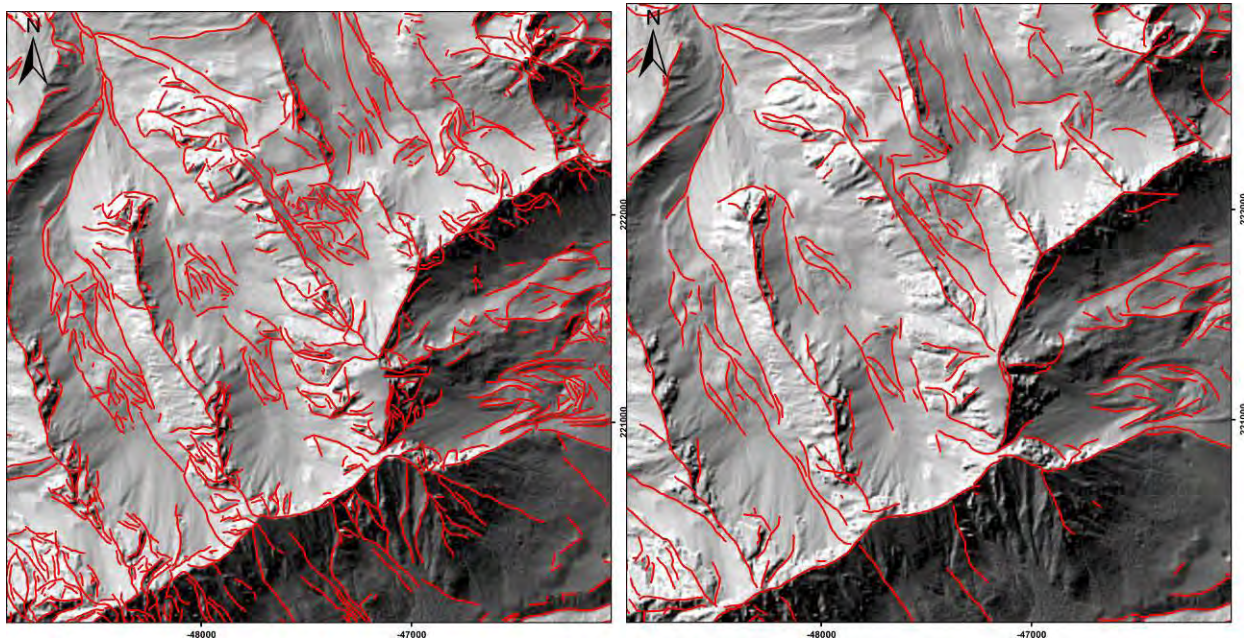


Abb. 4: Vollautomatische Strukturlinienextraktion im alpinen Gebiet anhand von unterschiedlichen ALS Datenpyramiden; Links: Ausdünnung der ALS Punkte anhand eines 5m Rasters; Rechts: Ausdünnung der ALS Punkte anhand eines 10m Rasters.

5 Zusammenfassung

Die Publikation stellt ein vollautomatisches Verfahren zur Strukturlinienmodellierung aus (ALS) Punktwolken vor. Durch praktische Beispiele wird weiters die großflächige praktische Anwendbarkeit der Methoden demonstriert. Ein jeweiliger Vergleich mit unabhängigen Referenzdaten ermöglicht eine Validierung der automatischen Ergebnisse, wemgleich auch die jeweilige Aktualität der Daten, der Zweck der Daten und die Datenerfassungsmethode (terrestrisch vs. luftgestützt) berücksichtigt werden muss.

Mit dem vollautomatischen Ansatz ist eine objektive Möglichkeit (anhand geometrischer Kriterien) zur Bestimmung von Linieninformationen gegeben, und die Auswahl der relevanten Linien obliegt nicht mehr nur dem jeweiligen Auswerter. Für eine praktische Nutzung der automatischen Ergebnisse ist eine manuelle Validierung und eine eventuelle Ergänzung oder Korrektur unerlässlich. Vor allem stellt die noch nicht gelöste Bestimmung der Linientopologie (im Moment wird jede Linie einzeln behandelt) eine interessante Forschungsfrage für die Zukunft dar.

6 Danksagung

Die Autoren bedanken sich bei der Deutschen Bundesanstalt für Gewässerkunde, der Stadtvermessung Wien, dem Österreichischen Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen und dem Landesvermessungsamt Vorarlberg für die Bereitstellung der ALS Daten sowie der Referenzdaten.

7 Literaturverzeichnis

- AXELSSON, P., 1999: Processing of laser scanner data - algorithms and applications. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 54, S. 138–147.
- BRIESE, C. & PFEIFER, N., 2008: Line based reconstruction from terrestrial laser scanning data. *Journal of Applied Geodesy* 2(2), S. 85–95.
- BRIESE, C., 2004: Three-dimensional modelling of breaklines from airborne laser scanner data. In: *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. XXXV, B3, Istanbul, Turkey.
- BRIESE, C., 2010: Extraction of Digital Terrain Models. In: *Airborne and Terrestrial Laser Scanning*, Whittles Publishing, ISBN: 978-1904445876, S. 135-167.
- BROCKMANN, H., HAASE, A., MANDLBURGER, G. & SCHRÖDER, M., 2010: LIDAR-Datenpotenziale für hydrodynamisch-numerische Modelluntersuchungen, 3-Ländertagung 2010 der DGPF, OVG und SGPBF in Wien, in press.
- BRÜGELMANN, R., 2000: Automatic breakline detection from airborne laser range data. In: *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, XXXIII, B3, Amsterdam, Netherlands, S. 109–115.
- GOMES-PEREIRA, L. & WICHERSON, R., 1999: Suitability of laser data for deriving geographical information – a case study in the context of management of fluvial zones. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 54, S. 105–114.
- OPALS, 2010: URL: <http://www.ipf.tuwien.ac.at/opals/>. Programmsystem OPALS (Orientation and Processing of Airborne Laser Scanning data), [Stand: 2010-06-02]
- RESSL, C., MANDLBURGER, G. & PFEIFER, N. 2009: Investigating Adjustment Of Airborne Laser Scanning Strips Without Usage Of GNSS/IMU Trajectory Data, In: "ISPRS Workshop Laserscanning '09", IAPRS, Vol. XXXVIII, Part 3/W8, ISSN: 1682-1750; S. 195 - 200.
- SITHOLE, G. & VOSSELMAN, G., 2004: Experimental comparison of filter algorithms for bare-Earth extraction from airborne laser scanning point clouds. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 59(3-4), S. 202–224.
- SUI, L., 2002: Processing of laser scanner data and automatic extraction of structure lines. In: *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information SCIENCES*, VOL. XXXIV (PART 2), S. 429–435.
- WEHR, A. & DUZELOVIC, H., 2009: Bruchkantendetektion mit hochaufgelösten Laserscannerdaten, *Vermessung & Geoinformation* 4/2009, S. 408 – 415.

Evaluation of Digital Surface Models by Semi-Global Matching

HEIKO HIRSCHMÜLLER¹ & TILMAN BUCHER²

Summary: This paper considers a processing chain for automatically creating high resolution digital surface models and true ortho-images from aerial and satellite image data. It has been developed at the Institute of Robotics and Mechatronics of the German Aerospace Center (DLR-RM). The processing chain is based on Semi-Global Matching (SGM) that uses a radiometric robust matching cost and an optimization that is based on a global smoothness constraint. SGM is especially suitable for creating models of urban scenes, where sharp depth discontinuities and small details need to be precisely reconstructed. However, the technique also produces very good results in scenes with forest and mountains. In this paper we give an overview of the processing chain and evaluate its results on test data sets from different aerial cameras. It is concluded that SGM permits the creation of high quality surface models that are more accurate and provide much more detail than a surface model from an aerial laser scanner. We also discuss the conditions under which good surface models can be produced by SGM. For very good results, an overlap of 80 % or more along track and 70 % across track should be provided.

1 Introduction

The automatic creation of high quality digital surface models is a topic of active research for applications like large scale city and environment modeling. A processing chain for automatically creating high resolution Digital Surface Models (DSM) from aerial and satellite images has been developed at the Institute of Robotics and Mechatronics of the German Aerospace Center (DLR-RM). The processing chain is based on the Semi-Global Matching (SGM) method (HIRSCHMÜLLER, 2008). It has been implemented on a Linux computer cluster and has processed about 50000 km² of data in 5-25 cm/pixel since 2004. The cameras include aerial pushbroom systems like HRSC, which has been developed at the Institute of Planetary Research of the German Aerospace Center, the MFC, that has been developed at the Institute of Robotics and Mechatronics of the German Aerospace Center and the ADS 40 that is manufactured by Leica Geosystems. In the past years, the methods have been extensively applied to many data sets of commercial full frame cameras like UltraCam-D, -X and -Xp from Vexcel or DMC from Intergraph/ZI. Finally, SGM has also been applied to images from commercial satellites, like Quickbird and World View, for creating DSMs with 0.5 m/pixel.

In this paper, we give an overview of the SGM based processing chain in Section 2. Thereafter, we present surface models, computed by different aerial cameras in different ground sampling distances and systematically evaluate them against each other and against a surface model of an aerial laser system in Section 3. Section 4 concludes the paper.

¹ Heiko Hirschmüller, Institut of Robotics und Mechatronics, Department of Perception and Cognition, Oberpfaffenhofen, Germany, heiko.hirschmueller@dlr.de

² Tilman Bucher, Institut of Robotics and Mechatronics, Department of Optical Information Systems, Berlin, Germany, tilman.bucher@dlr.de

2 Digital Surface Models by Semi-Global Matching

An important requirement for stereo matching is a precise intrinsic and extrinsic calibration. The remaining error must be less than 1 pixel. However, very good results can be expected if the error is below 0.5 pixel, while higher errors lead to an increased number of wrong matches.

For full frame images, stereo matching is performed between all images which are overlapping by at least 50 %. Typically, we request an overlap of 80% along the flight strip and 70% across. In this setting, each image is automatically matched against six neighbors, i.e. to the two previous and two next images along the flight strip as well as one image of the strips above and below. In this way, most occlusions can be resolved. Additionally, the high redundancy is used for automatically eliminating wrong correspondences during matching. In contrast, images from pushbroom cameras, like HRSC or ADS 40 are processed by matching images captured within the same strip from sensor lines that are arranged in different angles (HIRSCHMÜLLER ET AL., 2005). As for full frame image processing, using more than two sensor lines, arranged in different angles, is beneficial for reducing occlusions and eliminating matching errors.

Regardless of the camera geometry, stereo matching is performed on image pairs by Semi-Global Matching (SGM). The original publication (HIRSCHMÜLLER, 2008) described pixelwise matching using a Mutual Information (VIOLA AND WELLS, 1997) based cost term for compensating radiometric differences. However, a later study that systematically compared matching costs for stereo vision (HIRSCHMÜLLER AND SCHARSTEIN, 2009) indicated that a Census based matching cost (ZABIH AND WOODFILL, 1994) results in almost the same quality, but with increased radiometric robustness.

Census translates both input images individually by encoding the local neighborhood of each pixel into a bit vector. The position of each pixel in the local neighborhood is associated to one bit (Figure 1a). The bit is set, if the pixel has a lower value than the center pixel. Typically, a 9x7 window is used, such that the result is stored into a 64 bit value. The comparison of two pixels is performed by simply computing the Hamming distance³ of the corresponding bit vectors. It can be seen that Census matching is completely insensitive against a large class of radiometric transformations. In fact, as long as the local order of pixel values does not change, the outcome of matching is exactly the same. Additionally, the property that Census reduces the weight of individual pixels by only storing the information whether or not a value is lower, makes it tolerant against outliers in the window that can be caused by depth discontinuities.

Finding correct correspondences by comparing individual pixels of the Census transformed images is futile, as individual pixels do not contain enough information for unambiguous matching. Local methods like correlation consider a window around each pixel for making it more distinct. This is known to cause errors where the implicit assumption about constant depth within the window is violated. This is best visible at object boundaries that are typically blurred by local methods. In contrast, global methods use a smoothness constraint, which penalizes neighboring pixels that are associated to different depths. This is expressed in a cost function,

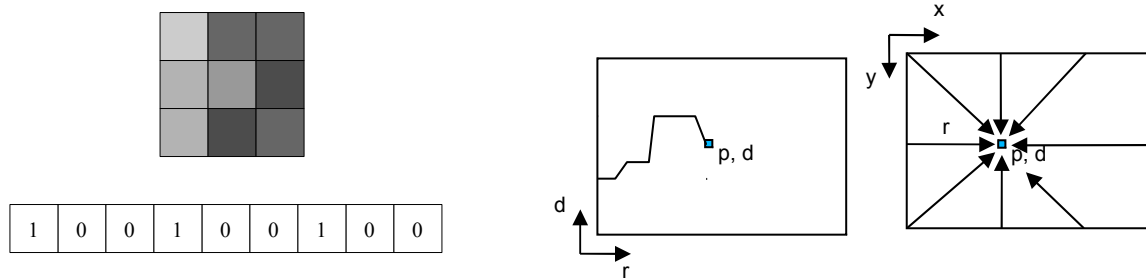
$$E(D) = \sum_p (C_{HAM}(p, D_p) + \sum_{q \in N_p} (P_1 T[|D_p - D_q| = 1] + P_2 T[|D_p - D_q| > 1])).$$

³ The Hamming distance is the number of bits that are different.

The cost function takes a disparity image, that encodes the correspondences for all pixels. It sums the pixelwise matching costs (e.g. C_{HAM} for the Hamming distance) over all pixels and adds a small penalty P_1 for neighboring pixels that have slightly different disparities (i.e. depths) and a large penalty P_2 for neighboring pixels with higher disparity differences. The returned value E assesses how well the disparity image fits the encoded constraints. This formulation permits sharp object boundaries, because depth can change abruptly at any pixel in contrast to correlation based methods.

Unfortunately, finding the optimal disparity image for a discontinuity preserving cost is known to be a NP problem for two dimensional images. However, there are a lot of publications in the computer vision community about methods based on Graph Cuts and Believe Propagation that compute approximations. The typical drawback is a long computation time. In contrast, the optimization for the cost function can be done quite efficiently along one dimensional paths through the image using dynamic programming. In the literature, this is commonly applied to image rows, which results in nasty streaking artefacts.

The key idea of SGM (HIRSCHMÜLLER, 2008) is to perform these one dimensional optimizations from all directions through the image as indicated in Figure 1b. For each pixel p , the disparity d is chosen where the sum of costs of paths that reach the pixel at the disparity from eight different directions r is lowest. The quality of SGM is comparable to that of other global methods, but with much higher efficiency regarding computation time.



(a) Census: Expressing the local neighborhood of the center pixel by a bit vector that encodes higher pixels with 1. The value of the center pixel is then replaced by this bit vector.

(b) SGM optimizes the global cost function pathwise from all directions through the volume created by the image dimensions x and y as well as the disparity d .

Figure 1: Computation of the Census matching cost and pathwise optimization of SGM.

The pairwise matching results are fused by selecting the median disparity value for each pixel. The DSM is created by reconstructing the pixels of all disparity images and re-projecting them into an equidistant grid, individually for each image. Thereafter, the information is fused by selecting the median height value in each cell (HIRSCHMÜLLER, 2008).

Since the images are perfectly registered to the DSM, they can be pixelwise re-projected into a true ortho-image. For scenes of cities, the texture at vertical structures like walls is essential for the visual impression. These side-textures are created similar to the ortho-image projection with parallel rays. However, the rays are not orthogonal to the projection plane, but tilted by 20° - 25° . In this way, four tilted “ortho”-images are created, that view the scene from left, right, top and bottom (HIRSCHMÜLLER, 2008). These textures are all created fully automatic. Their geometry (i.e. ortho or tilted) is simple enough for texturing the three dimensional reconstruction on-the-fly during visualization (shown in Figure 8 below).

3 Evaluation

Since DSMs can be created from different camera geometries it is important to ask what accuracy can be reached by SGM and what are the differences regarding different cameras.

3.1 Description of the DGPF Data Set

In 2008 a project⁴ on the performance of digital airborne cameras has been performed by the German Society of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation (DGPF). The test field Vaihingen/Enz has been captured by a wide range of full frame and pushbroom cameras (CRAMER, 2010) for different investigations like the creation of DSMs (HAALA ET AL., 2010). Our paper concentrates on the aerial full frame cameras UltraCam-X (Vexcel), DMC (Intergraph/ZI) and Quattro DigiCAM (IGI), which have captured the test site in a ground sampling distance (GSD) of 8 and 20 cm/pixel. Table 1 describes the most properties of the used data sets.

Table 1: Description of data sets.

Camera	GSD [cm/pixel]	Number of Images used	Image Resolution [MPixel]	Aperture Angle [°]	Radiometric Depth for Matching [Bit]	Overlap [%]	Date [2008]
UltraCam-X	20	52	136	54.7	8	61 / 69	11 Sept.
DMC	20	60	106	69.3	12	63 / 67	06. Aug.
Quattro DigiCAM	20	188 / 4	4 x 39	2 x 33	12	62 / 70	06 Aug.
UltraCam-X	8	215	136	54.7	8	81 / 70	11 Sept.
DMC	8	136	106	69.3	12	63 / 66	24 July
Quattro DigiCAM	8	784 / 4	4 x 39	2 x 33	12	80 / 70	06 Aug.

The Quattro DigiCAM captures four images at the same time, using four tilted cameras, such that the fields of view of the individual cameras are slightly overlapping. However, the four images are not assembled to one large image, but handled as independent images.

The DGPF test also includes data of two pushbroom cameras ADS 40 (Leica Geosystems) and JAS-150 (Jenaoptronic). Unfortunately, we have not been able to process both data sets in time, because the ADS 40 data set did not include the panchromatic channels as level 1, which we require for our software. Furthermore, the JAS-150 data was delivered with extrinsic orientations in a proprietary format together with a Windows library for conversion between image and world coordinates, based on the proprietary format. However, our software is entirely implemented on a Linux cluster. Therefore, we had so far to exclude both pushbroom cameras from our test.

For comparison, the test site has also been captured on 21st August 2008 by the aerial laser ALS 50 (Leica) with 5 points/m². The laser data has been projected and interpolated into a regular DSM with 25 cm/pixel. It serves for comparison with the stereo based DSMs.

⁴ <http://www.ifp.uni-stuttgart.de/dgpf/DKEP-Allg.html>

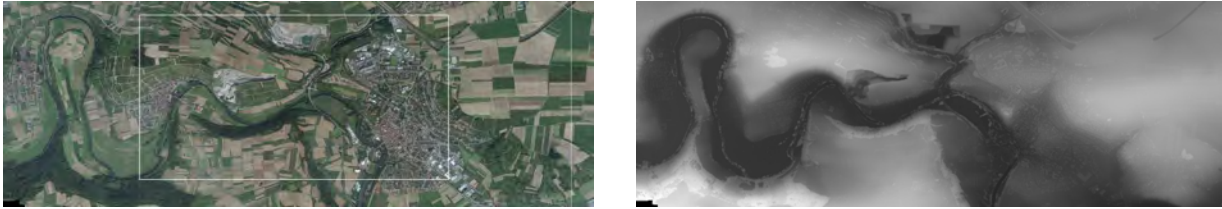


Figure 2: Ortho image (left) and DSM (right) of the UltraCam data set in 20 cm/pixel. The part that is covered in the data sets with 8 cm/pixel is marked by a white square.

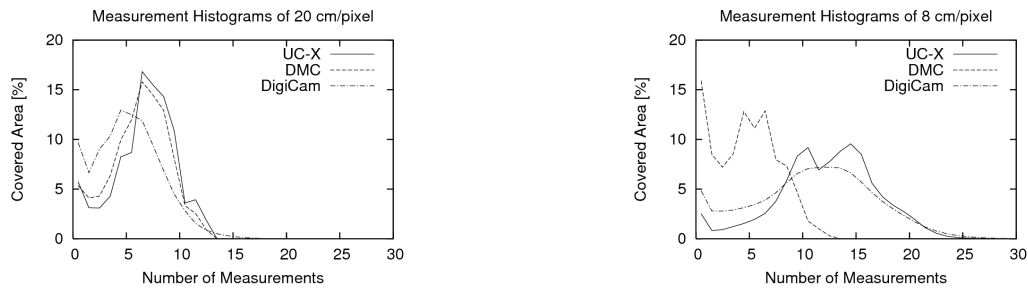


Figure 3: Histograms of the number of pairwise reconstructions that are projected into the DSM cells.

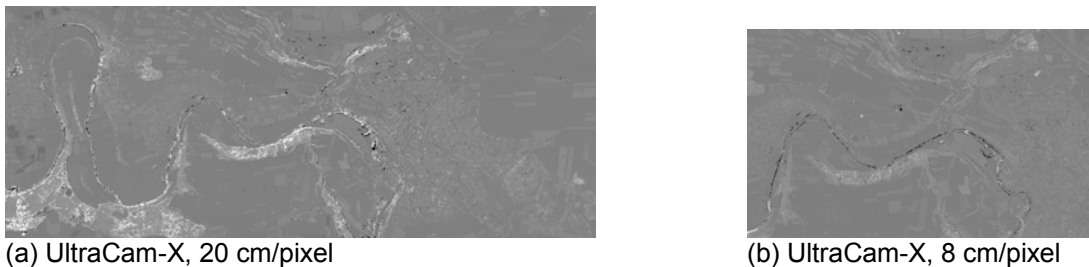


Figure 4: Differences of the stereo and laser DSMs. The range of -10 m (black) to 10 m (white) is shown. The differences of DMC and Quattro DigiCAM are quite similar at this scale and therefore omitted.

3.2 Evaluation of Full Data Sets

All data sets from Table 1 have been processed by SGM using exactly the same parameters that we are always using for processing aerial and satellite data. This means that no parameter tuning has been done. In case of the Quattro DigiCAM data set, the four images that are captured together by the four cameras are taken as independent, individual images. All images are compared to all others. Images that overlap by more than 50 % are matched against each other.

All DSMs have been created in the ground sampling distance of the input images, i.e. with 20 or 8 cm/pixel. We have created the 20 cm DSMs for an area of 7.8 km x 3 km, which is slightly larger than the area captured by laser. The 8 cm DMS's have been created for an area of 4 km x 2.4 km, which is the inner part of the area. Figure 2 shows the ortho image and the DSM of the 20 cm UltraCam-X data set.

As described in Section 2, images are matched pairwise and fused into the DSM. The number of pairwise reconstructions is visualized in Figure 3. Unmatched areas are smoothly interpolated. For the 20 cm data sets, which have a similar overlap, the numbers of reconstructed points (especially UltraCam and DMC) are quite similar (Figure 3). The overall results are comparable. In the 8 cm data sets, the influence of different overlaps is clearly visible. The UltraCam 8 cm

data displays the lowest percentage of unmatched points.

Figure 4 shows the difference of the stereo and the laser DSM. Areas where the stereo models contain larger values are white whereas areas where the laser model contains larger values are black. A comparison to Figure 2 shows that most differences are found in areas with vegetation. Due to the low image overlap of the 20 cm data, large view angles occur, which result in occlusions, especially in the forest and narrow streets. These are interpolated, which tends to result in too large heights. In the 8 cm data with large overlap (e.g. UltraCam), the stereo DSM is more exact than the laser DSM and covers more local maximum and less interpolation. Therefore, the white color mostly means that the ALS data are too low.

3.3 In Detail Evaluation of Scene Parts

Since DSMs of vegetation cannot be properly compared, we have selected a part of the city for detailed comparison. Figure 5 shows the laser DSM of that part. Figure 6 shows the 20 cm stereo

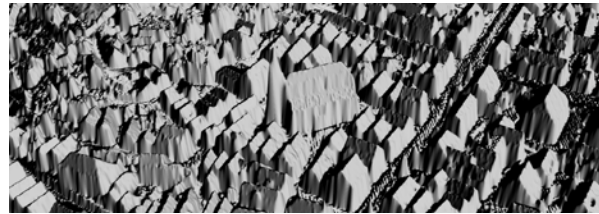
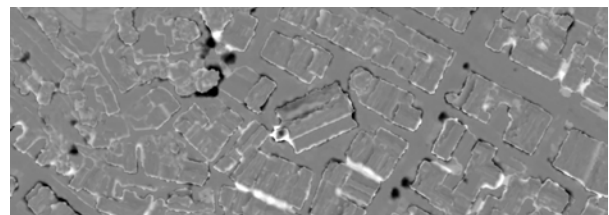


Figure 5: ALS 50, 25 cm/pixel



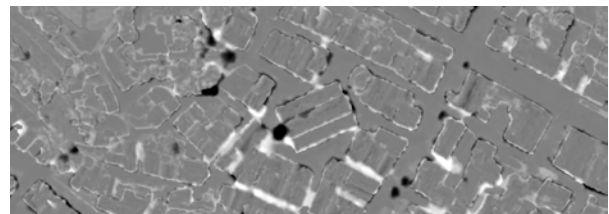
(a) UltraCam-X, 20 cm/pixel



(b) Difference: (a) – Figure 5



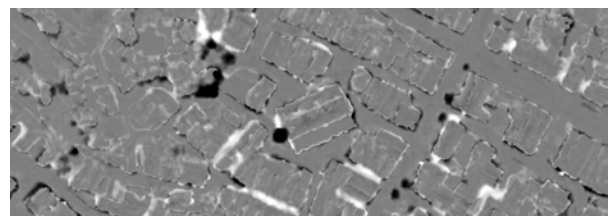
(c) DMC, 20 cm/pixel



(d) Difference: (c) - Figure 5



(e) Quattro DigiCAM, 20 cm/pixel



(f) Difference: (e) - Figure 5

Figure 6: Stereo DSMs with 20 cm/pixel and difference to laser DSM.

DSMs as well as the individual differences against the 25 cm laser DSM. The UltraCam DSM appears visually more sharp than the laser DSM. It can be seen in Figure 5b, that almost all differences are at the walls of the houses. A close look reveals that edges of houses are generally lower and the walls are not steep as they should be, but sloped, which seems to be an interpolation effect. Therefore a paired positive/negative effect is observed in the difference images. Even in the data with low image overlap, houses generally appear more accurate than in the laser DSM. The DMC and Quattro DigiCAM data sets are worse than the UltraCam data set in this area (e.g. the tower of the church is missing).

Figure 7 shows the 8 cm stereo DSMs as well as the individual differences against the 25 cm laser DSM. The stereo DSMs appear much more precise than the 20 cm DSMs and the laser. All three DSMs contain much more detail.

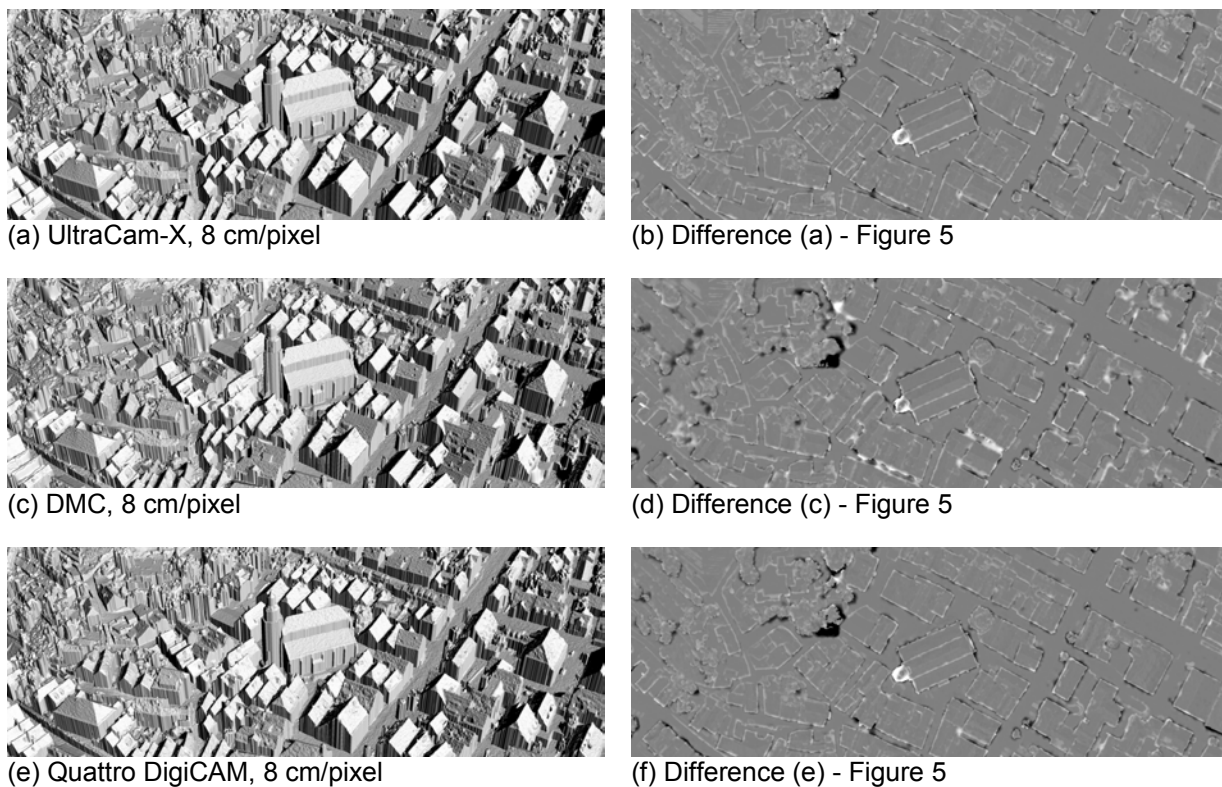


Figure 7: Stereo DSMs with 8 cm/pixel and difference to laser DSM.

The very high quality that is reached in the 8 cm data sets is also shown in Figure 8 on the example of the UltraCam data set. All buildings appear very precise including many small features on the roofs.

3.4 Evaluation of Surface Profiles

Figure 9 shows a profile through the DSMs. It can be seen that the laser profile contains walls of buildings slightly sloped in contrast to all stereo DSMs. Furthermore, some details are completely missing in the laser DSMs (marked by circle in Figure 9), which is due to the low resolution of the laser system. The detail at the left is actually a power cable that goes over the



Figure 8: Untextured and automatically textured model from UltraCam-X data set with 8 cm/pixel

roof of the house. The detail on the right is a part of the roof. On the other hand, the 20 cm data of the DMC and Quattro DigiCAM is wrong on the ground near the left part of the church. This is due to the low overlap and large angles that do not allow to properly measure between the houses at least at the resolution of 20 cm/pixel. In contrast, the high resolution of the 8 cm data sets appears very precise in the profile plots.

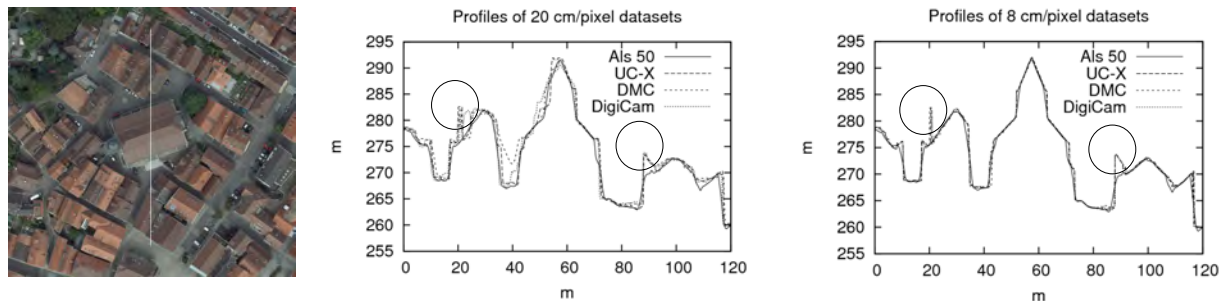


Figure 9: Profiles of the 20 cm and 8 cm data against laser. The circle marks places where all stereo DSMs have correctly picked up real structure that is not detected by the laser.

3.5 Evaluation at Selected Points

We compared the DEM's at 110 selected points that were provided with the test data (Table 2). According to our information, at least a part of these points were used for optimizing the orientation by bundle adjustment. Not all of the points are inside the 8 cm or 20 cm data sets. Additionally, we have ignored one point (3021), because it was interpolated due to missing overlap in the DMC data, which lead to a deviation of 1.34 m.

Since the mean error of most data sets is rather low, we suspect that the large shift of the mean value of the UltraCam 20 cm data set may be due to an inaccuracy of the bundle adjustment. This increases the RMS error of that data set quite much. In contrast, the standard deviation of this data set is just about 8.1 cm, which is quite similar to that of the other 20 cm data sets.

In general, the RMS error is around half of the GSD for all data sets, which is much less than $1/4^{\text{th}}$ of a pixel in disparity space (depending on the actual view angles). There is not much more that can be expected from an automatic image processing method.

Table 2: Statistical evaluation on 110 selected points.

Camera	GSD [cm/pixel]	RMS [cm]	Mean [cm]	Min [cm]	Max [cm]
ALS	25	8.9	1.8	-7.1	56.6
UltraCam-X	20	12.5	-9.6	-23.7	14
DMC	20	9.7	1.7	-20.8	28.4
Quattro DigiCAM	20	6.2	0.3	-22.9	13.2
UltraCam-X	8	5.1	-2.6	-10.4	5.9
DMC	8	3.2	-0.1	-7.2	6.4
Quattro DigiCAM	8	2.6	-0.3	-7.3	5.4

3.6 Computation Time

All data sets were computed on a Blade system that features 32 Intel Xeon 5570 Quadcore CPU's using a frequency of 3 GHz. Table 3 shows the computation time for stereo matching, DOM creation and true ortho-image generation.

Table 3: Computation time.

Camera	GSD [cm/pixel]	Number of images	Image Resolution [MPixel]	Matching on 128 CPU cores [hours]	DSM creation on one CPU core [hours]	Ortho image on one CPU core [hours]
UltraCam-X	20	52	136	1.9	0.9	1.2
DMC	20	60	106	1.9	0.7	1.3
Quattro DigiCAM	20	188 / 4	4 x 39	21.0	0.7	1.9
UltraCam-X	8	215	136	15.0	3.3	7.4
DMC	8	136	106	7.7	1.9	3.7
Quattro DigiCAM	8	784 / 4	4 x 39	224.0	3.6	10.8

The computation time for matching is roughly linear to the number of pixels and the relative depth range of the scene, while DSM and ortho-image creation depend mostly on the amount of data. The very large computation time of the Quattro DigiCAM is due to the special geometry of the camera which does not look straight down. In contrast each of the four individual cameras is slightly tilted. This means that even if the camera looks onto flat ground, a part of the scene is closer in one image corner than in the opposite image corner. This special geometry increases the depth range artificially and is responsible for the much larger processing time.

One advantage of SGM is the regularity of its algorithm and the simplicity of the basic operations, which are in fact only comparisons and additions. This allows the implementation on special hardware like GPU (ERNST AND HIRSCHMÜLLER, 2008) or FPGA (GEHRIG ET AL., 2009). Future work will exploit this for speeding up processing of aerial or satellite images in comparison to a purely CPU based implementation.

4 Conclusion

It has been shown that high quality DSMs, which are more accurate and have more detail than a laser DSM, can be created from all tested aerial cameras. The study showed that images should be captured with high overlap, like 80 % along flight strips and 70 % across strips. This was the case for the 8 cm UltraCam data set which has a very high quality. Unfortunately, none of the 20 cm data sets has such a high overlap. Although the quality of the 20 cm data sets is comparable to ALS, from our experience, it is much less than can be reached with 20 cm resolution. Low overlap may cause problems especially in forest or narrow canyons or streets due to large view angles. Furthermore, configurations where the camera does not look straight down leads to increased computation time, at least with our method, due to an increased depth range. Finally, the high radiometric depth that all aerial cameras have, should be used for matching. In this respect, we believe that the UltraCam results could be improved if 12 bit data were used. Future work includes extending the study to pushbroom cameras like the ADS 40 and JAS-150 as well as satellite images.

5 References

- CRAMER, M., 2010: The DGPF-Test on Digital Airborne Camera Evaluation – Overview and Test Design, in the Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Processing (PFG), 02/2010.
- ERNST, I. & HIRSCHMÜLLER, H., 2008: Mutual Information based Semi-Global Stereo Matching on the GPU, in Proceedings of the International Symposium on Visual Computing (ISVC08), 1-3 December 2008, Las Vegas, Nevada, USA.
- GEHRIG, S., EBERLI, F. & MAYER, T., 2009: A Real-Time Low-Power Stereo Vision Engine Using Semi-Global Matching, in Proceedings of the International Conference on Computer Vision Systems (ICVS), Liege, Belgium, LNCV Volume 5815, pp. 134-143.
- HALLA, N., HASTEDT, H., WOLF, K., RESSL, C., BALTRUSCH, S., 2010: Digital Photogrammetric Camera Evaluation – Generation of Digital Elevation Models, in the Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Processing (PFG), 02/2010.
- HIRSCHMÜLLER, H., SCHOLTEN, F. & HIRZINGER, G., 2005: Stereo Vision Based Reconstruction of Huge Urban Areas from an Airborne Pushbroom Camera (HRSC), in Proceedings of the 27th DAGM Symposium, 30 August - 2 September 2005, Vienna, Austria, LNCS Volume 3663, pp. 58-66.
- HIRSCHMÜLLER, H., 2008: Stereo Processing by Semi-Global Matching and Mutual Information, in IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Volume 30(2), February 2008, pp. 328-341.
- HIRSCHMÜLLER, H. & SCHARSTEIN, D., 2009: Evaluation of Stereo Matching Costs on Images with Radiometric Differences, in IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Volume 31(9), September 2009, pp. 1582-1599.
- VIOLA, P. & WELLS, W. M., 1997: Alignment by Maximization of Mutual Information, in International Journal of Computer Vision, Volume 24(2), pp. 137-154.
- ZABIH, R. & WOODFILL, J., 1994: Non-Parametric Local Transforms for Computing Visual Correspondence, in Proceedings of the European Conference of Computer Vision, Stockholm, Sweden, pp. 151-158.

Vergleich von ASTER GDEM- mit SRTM-Höhenmodellen

KARSTEN JACOBSEN

Zusammenfassung: Mit den auf interferometrischem Radar basierenden SRTM-Höhenmodellen sind seit mehreren Jahren Höheninformationen von 56° südlicher bis 60,25° nördlicher Breite kostenlos verfügbar. Aus den Stereoaufnahmen des ASTER-Satellit wurden für den Bereich von 83° südlicher bis 83° nördlicher Breite Höhenmodelle durch automatische Bildzuordnung erstellt und ebenfalls kostenlos zur Verfügung gestellt. Die SRTM-Höhenmodelle haben einen Punktabstand von 3“, entsprechend ungefähr 92m am Äquator, wogegen die ASTER-Daten einen Punktabstand von 1“ aufweisen.

In insgesamt 12 Testgebieten wurden die beiden Höhenmodelle hinsichtlich ihrer Genauigkeitsstruktur und morphologischen Information miteinander verglichen. Es zeigte sich bei beiden Höhenmodellen, neben der Abhängigkeit von der Geländeneigung und der Bodenbedeckung, eine nicht immer homogene Genauigkeit. Die ASTER-Höhenmodelle basieren auf einer teilweise großen Zahl von überlappenden Stereomodellen. Meistens, aber nicht in jedem Fall, ist eine Genauigkeitsabhängigkeit von der Anzahl der überlappenden Stereomodelle vorhanden, die aber unter den Erwartungen der Statistik liegt. Durch die Mittelbildung vieler Höhenmodelle leiden die morphologischen Details, so dass trotz der linear dreifachen Punktdichte gegenüber den SRTM-Höhenmodellen kaum mehr morphologische Details erkennbar sind. Im Durchschnitt ist die Genauigkeit der SRTM-Höhenmodelle besser als die der ASTER-Daten. Allerdings haben die ASTER-Höhenmodelle in gebirgigen Gebieten Vorteile gegenüber den SRTM-Daten; es treten keine vergleichbaren radar-typischen Datenlücken auf. Ähnlich ist es mit trockenen Sandwüsten, die teilweise das Radarsignal nicht reflektieren.

1 Einleitung

Digitale Höhenmodelle sind von grundlegender Bedeutung für photogrammetrische und Geoinformations-Anwendungen. Mit den kostenlosen Höhenmodellen der Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM) ist bereits seit Anfang 2002 eine nahezu weltweite Höheninformation verfügbar. Die auf interferometrischem synthetischen Apertur Radar (InSAR) beruhenden Daten weisen allerdings in stark geneigtem Gelände wegen des Radar-Overlay Lücken auf, wie auch in trockenen Sandwüsten und auf glatten Wasserflächen. Die Wasserflächen stellen kein Problem dar, da die Höhen von den umgebenden Gebieten interpoliert werden können. Die Lücken wurden in der Zwischenzeit mit anderen Höheninformationen aufgefüllt, was aber den Nachteil einer inhomogenen Genauigkeit hat. Die stärkste Einschränkung der SRTM-Höhenmodelle ist aber der Punktabstand der frei verfügbaren Daten von 3“, entsprechend etwa 93m am Äquator. Nur in den USA sind die SRTM-Daten mit einem Punktabstand von 1“, entsprechend etwa 31m am Äquator, im Internet zugänglich. Das auf der automatischen Bildzuordnung von Stereobilder des ASTER-Sensors beruhende ASTER GDEM erweitert die Höhenmodelle auf den Bereich von 83° südlicher bis 83° nördlicher Breite, außerdem weist das ASTER GDEM keine Lücken wie die SRTM-Daten auf und hat einen

Karsten Jacobsen, Institut für Photogrammetrie und Geoinformation, Leibniz Universität Hannover, Nienburger Str. 1, 30167 Hannover, jacobsen@ipi.uni-hannover.de

Punktabstand von 1“. Mit dem ASTER Global DEM Validation, Summary Report (siehe Literaturverzeichnis) liegt bereits eine intensive Untersuchung des ASTER GDEM vor. Die Abhängigkeit der Punktgenauigkeit von der Anzahl der individuell verwendeten Stereomodelle ist jedoch nur unzureichend untersucht, wie auch die morphologischen Details und auch die Abhängigkeit der Höhengenaugigkeit von der Geländeneigung. Zudem ist der direkte Vergleich des ASTER GDEM mit den SRTM-Höhenmodellen unzureichend.

2 Untersuchungsgebiete

Für eine Untersuchung von Höhenmodellen sollten Referenzhöhenmodelle benutzt werden, da nur mit ihnen die erforderlichen Details erzielbar sind. Eine Untersuchung mittels einzelner Vergleichspunkte führt in der Regel zu zu optimistischen Genauigkeitsangaben da Vergleichspunkte in der Regel auf ebenen Flächen mit gutem Kontrast liegen. Ein direkter Vergleich mit einem Referenzhöhenmodell kann dagegen zu pessimistisch ausfallen, wenn der Punktabstand des Referenzmodells so groß ist, dass Interpolationen zu nicht vernachlässigbaren Fehlern führen, wie es teilweise in dem extrem rauen Testgebiet Zonguldak der Fall ist.

Die ASTER GDEM- und die SRTM-Daten wurden mit Referenzhöhenmodellen in Jordanien, Istanbul - Türkei, Zonguldak – Türkei, Mousanne – Frankreich, Polen nahe Warschau, Gars – Bayern, Inzell – Bayern, West Virginia – USA, Pennsylvania – USA, Philadelphia – USA, Arizona – USA und Atlantic County – USA verglichen. Die Testgebiete gehen von flachen über hügelige zu gebirgigen Gebieten, die teilweise von Wald und mit Gebäuden bedeckt sind. Die meisten Testgebiete wurden bereits für vorangegangene Untersuchungen der SRTM-Höhenmodelle herangezogen (Passini, Jacobsen 2007).

3 Vorbereitung der Daten

Projekt	Atlantic County	Pennsilvania	West Virginia	Mausanne	Jordan	<i>Quadratmittel</i>
ASTER DX	-2.11m	7.82m	7.28m	6.14m	-2.98m	5.75m
ASTER DY	-8.71m	3.01m	11.60m	5.41m	9.89m	8.33m
SRTM DX	-3.46m	5.56m	4.58m	-1.31m	0.28m	3.62m
SRTM DY	-2.46m	0.20m	-2.27m	1.03m	0.14m	1.57m

Tab. 1: Datumsfehler des ASTERGDEM und des SRTM DSMs

Es muss davon ausgegangen werden, dass die Höhenmodelle nicht nur Höhen- sondern auch Lageabweichungen haben. Die Lageabweichungen beschränken sich in der Regel auf Datumsfehler, somit konstante Verschiebungen in X und Y. Datumsfehler werden durch die Bildorientierung, aber auch durch die Koordinatenbezugssysteme hervorgerufen. Aus diesem Grund wurden alle untersuchten Höhenmodelle auf die Referenzhöhenmodelle durch Ausgleichung verschoben. Für die Datensätze ohne Probleme mit dem Koordinatenbezugssystem sind die Datumsfehler für die ASTER- und der SRTM-Daten in Tabelle 1 dargestellt. Sie liegen für ASTER GDEM in der Größenordnung von 6m – 8m und sind damit etwas größer als für die SRTM-Daten, die eine Größenordnung von etwa 3m aufweisen.

4 Abhängigkeit des ASTER GDEM von der Anzahl der verwendeten Bilder

Die Anzahl der für den einzelnen Objektpunkt benutzten ASTER-Stereomodelle variiert stark von Gebiet zu Gebiet, aber auch von Punkt zu Punkt innerhalb eines Datensatzes von $1^\circ \times 1^\circ$ (siehe Abb 1).

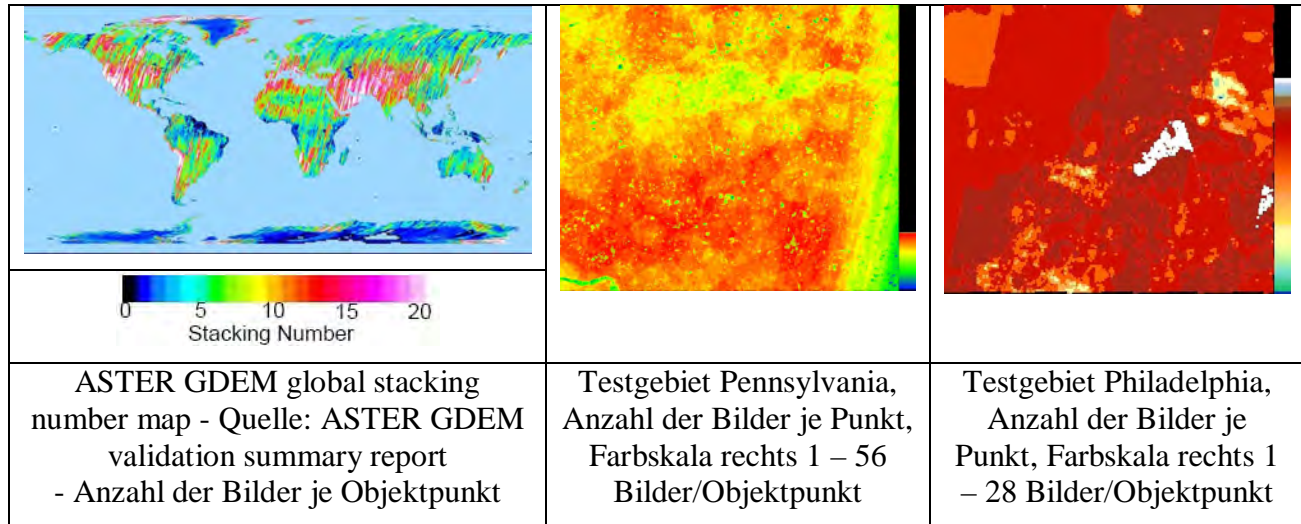


Abb. 1: Anzahl der Bilder (stacks) je Objektpunkt

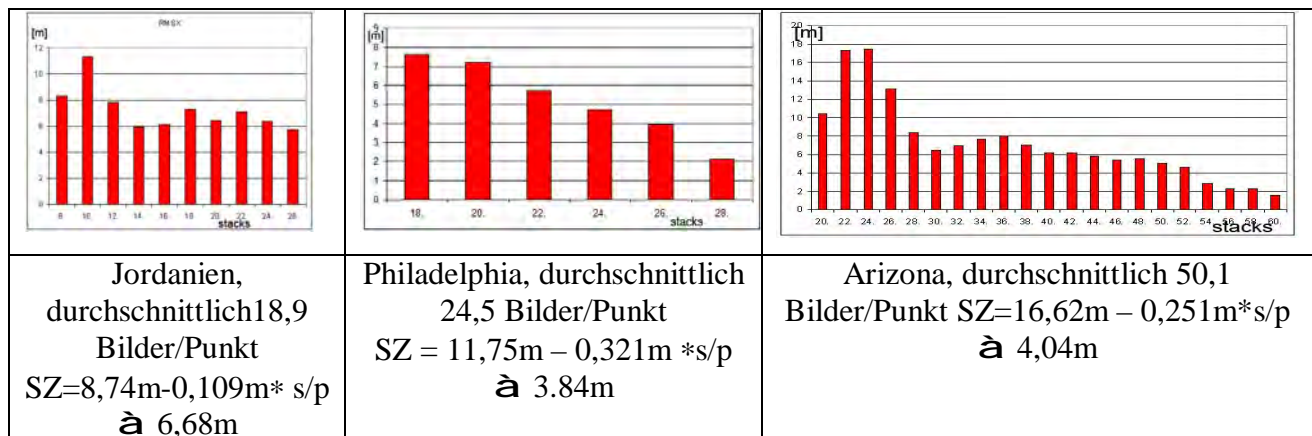


Abb. 2: Quadratmittel der Widersprüche ASTER GDEM gegen Referenzhöhenmodell in Abhängigkeit con der Anzahl der Bilder / Objektpunkt

In den Testgebieten wurden bis zu 60 Bilder je Objektpunkt benutzt. In dem Hannoverschen Programm DEMANAL kann zusätzlich zu den Höhendaten die Datei mit der Anzahl der Bilder je Punkt eingelesen und die Quadratmittel der Widersprüche zwischen dem zu untersuchenden Höhenmodell und den Referenzdaten als Funktion der Bilder je Punkt berechnet werden (Abb. 2). Außerdem wird die ausgleichende Funktion der Genauigkeit als Funktion der Bilder/Punkt berechnet (Abb. 3). Als Quadratmittel aller Testgebiete ergab sich die Funktion $SZ = 12,43m - 0,35m \cdot \text{Bilder/Punkt}$, das mit den durchschnittlich 18,7 Bildern/Punkt, auf die Genauigkeit von $SZ = 5,88m$ führt.

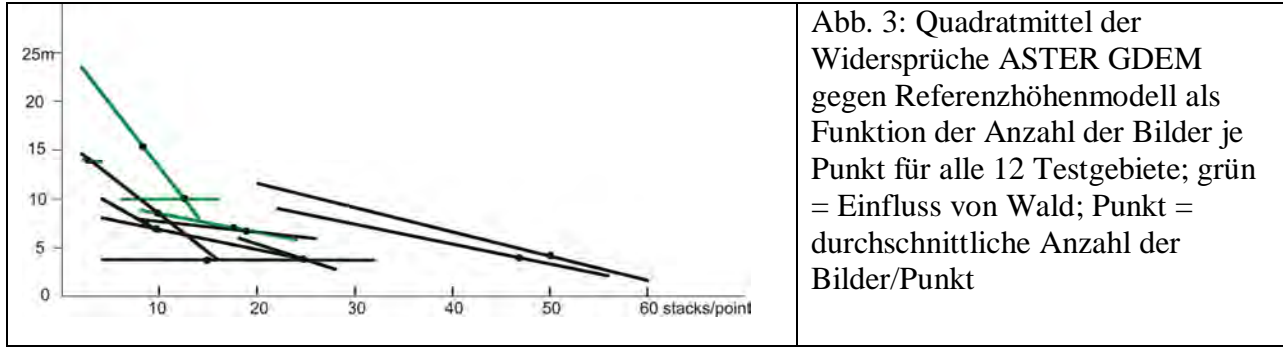


Abb. 3: Quadratmittel der Widersprüche ASTER GDEM gegen Referenzhöhenmodell als Funktion der Anzahl der Bilder je Punkt für alle 12 Testgebiete; grün = Einfluss von Wald; Punkt = durchschnittliche Anzahl der Bilder/Punkt

5 Genauigkeitsuntersuchung

ASTER GDEM und SRTM C-Band-Höhenmodelle beschreiben die sichtbare Oberfläche, also die Oberfläche der Vegetation und der Gebäude. Im Gegensatz zu den digitalen Oberflächenmodellen (DOM) enthalten die Referenzhöhenmodelle die Höhe der Erdoberfläche, sind somit digitale Geländehöhenmodelle (DGM). In offenen Gebieten kann der Einfluss der Gebäude und einzelner Bäume oder Baumgruppen durch Filterung entfernt werden, während in Waldgebieten eine Filterung wenig Vorteile bringt, da sowohl ASTER GDEM, wie auch die SRTM-DOM in Waldgebieten keine Bodenpunkte enthalten. Eine Trennung der Untersuchungsgebiete in offene Flächen und Wald ist deswegen sinnvoll. Der Einfluss des Waldes auf die Höhenabweichungen wird durch die Häufigkeitsverteilung in Abb. 3 klar gezeigt.

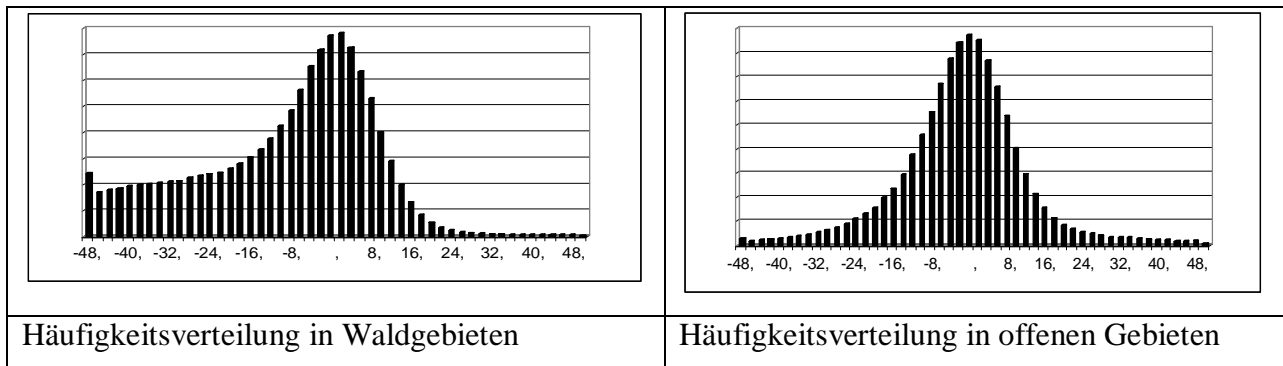


Abb. 3: Testgebiet Pennsylvania: Häufigkeitsverteilung der Höhenunterschiede ASTER GDEM gegen Referenzhöhenmodell – horizontal: Größe der Widersprüche [feet]

	QM	Bias	SZ	SZ		QM	Bias	SZ	SZ	
G	10.42	7.64	7.08	$6.25 + 1.78 \cdot \tan \alpha$		13.31	-3.52	12.84	$7.88 + 17.6 \cdot \tan \alpha$	
O	10.90	9.12	5.98	$5.60 + 0.05 \cdot \tan \alpha$		8.70	3.37	8.02	$5.33 + 22.2 \cdot \tan \alpha$	
W	8.18	1.53	8.03	$7.32 + 0.2 \cdot \tan \alpha$		14.98	-6.76	13.36	$7.98 + 16.7 \cdot \tan \alpha$	
Testgebiet Gars						Testgebiet Inzell				

Tab. 2: Untersuchung von ASTER GDEM in den Testgebieten Gars [m] (QM = Quadratmittel der Widersprüche, G = Gesamtgebiet, O = offenes Gebiet, W = Wald, α = Geländeneigung)

Wie fast alle Höhenmodelle zeigen ASTER GDEM und SRTM DOM eine klare Abhängigkeit der Genauigkeit von der Geländeneigung. Die Standardabweichung der Höhe (SZ) ist deswegen mit der Formel $SZ = A + B * \tan(\text{Geländeneigung})$ zu beschreiben, wie auch aus der separaten Genauigkeitsanalyse für die offenen und Waldgebiete (Tab. 2) hervorgeht.

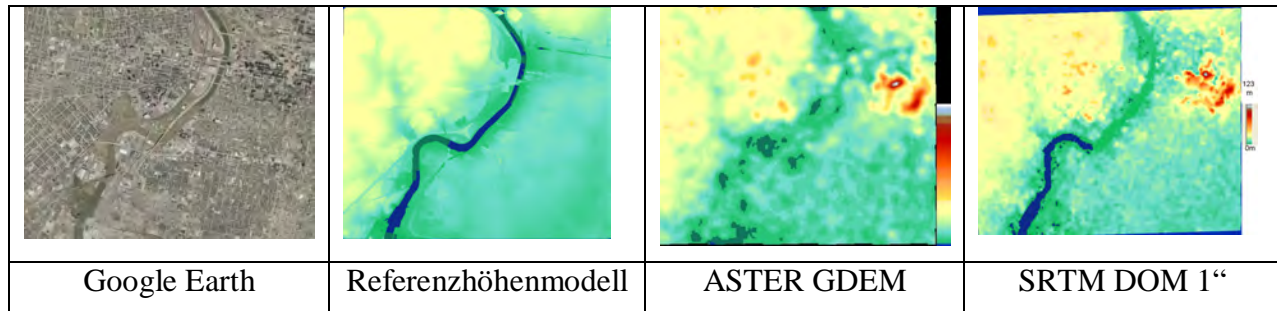


Abb. 4: Einfluss der Bebauung auf ASTER GDEM und SRTM DOM, Testgebiet Philadelphia

Eine dichte Bebauung hat einen ähnlichen Einfluss auf ASTER GDEM und SRTM DOM, wie Abb. 4 anhand des Innenstadtbereichs von Philadelphia zeigt. Im oberen rechten Teil befindet sich eine Gruppe von Hochhäusern die Höhenabweichungen gegenüber dem Referenzhöhenmodell von bis zu 30m hervorrufen. Auch im oberen mittleren Teil kommt es zu größeren Einflüssen der Bebauung auf die Höhenmodelle.

	QM	Bias	SZ	SZ		QM	Bias	SZ	SZ
Jordan	13.62	11.92	6.59	$5.03 + 2.4 * \tan \alpha$		5.10	0.28	5.09	$4.05 + 1.8 * \tan \alpha$
W. Virginia	14.04	2.66	13.78	$12.79 + 1.6 * \tan \alpha$		12.05	8.30	8.73	$8.53 + 0.02 * \tan \alpha$
Atlantic C.	5.15	3.36	3.90	$3.90 + 0.0 * \tan \alpha$		2.85	0.08	2.85	$2.85 + 0.0 * \tan \alpha$
Pennsylvania	9.32	8.30	4.25	$3.63 + 23.2 * \tan \alpha$		4.58	1.89	4.18	$3.48 + 22.5 * \tan \alpha$
Philadelphia	7.07	5.33	4.65	$4.65 + 0.0 * \tan \alpha$		5.85	3.60	4.61	$4.61 + 0.0 * \tan \alpha$
Arizona	5.82	3.32	4.78	$2.92 + 17.4 * \tan \alpha$		3.70	1.32	3.46	$2.34 + 11.1 * \tan \alpha$
Mausanne	7.06	2.45	6.62	$4.83 + 9.8 * \tan \alpha$		3.86	0.86	3.76	$1.68 + 12.4 * \tan \alpha$
Poland	14.08	9.99	9.93	$9.61 + 1.7 * \tan \alpha$		5.15	2.05	4.73	$5.15 + 0.0 * \tan \alpha$
Zonguldak	9.26	1.79	9.08	$6.63 + 11.7 * \tan \alpha$		9.33	3.38	8.70	$7.17 + 10.1 * \tan \alpha$
Istanbul	7.20	1.44	7.06	$6.04 + 3.6 * \tan \alpha$		4.95	1.30	4.77	$3.37 + 6.2 * \tan \alpha$
Gars	10.42	7.64	7.08	$6.25 + 1.8 * \tan \alpha$		5.44	2.33	4.92	$3.95 + 2.3 * \tan \alpha$
Inzell	13.31	3.52	12.84	$7.88 + 17.6 * \tan \alpha$		8.02	2.38	7.66	$4.38 + 25.4 * \tan \alpha$
<i>Quadratmittel</i>	<i>10.21</i>	<i>6.13</i>	<i>8.17</i>	<i>6.74 for a= 0.0</i>		<i>6.62</i>	<i>3.12</i>	<i>5.61</i>	<i>5.08 for a= 0.0</i>
	ASTER GDEM					SRTM DOM (3'')			

Tab. 3: Ergebnisse der Untersuchung des ASTER GDEM und der SRTM DOM in 12 Testgebieten – Widersprüche gegen die Referenzhöhenmodelle [m], Bias ohne Vorzeichen

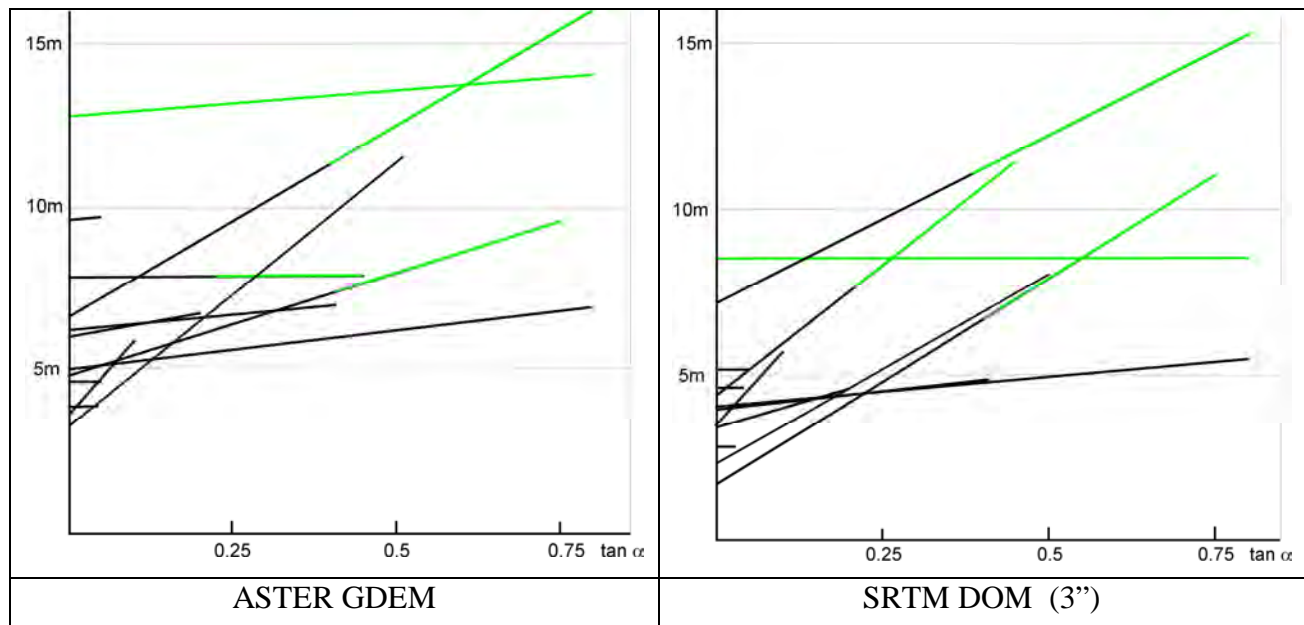


Abb. 4: Genauigkeit der Höhenmodelle in Abhängigkeit von der Geländeneigung, grün = Einfluss von Waldgebieten

Wie aus Abbildung 4 und Tabelle 3 ersichtlich, gibt es eine stärkere Streuung der Genauigkeit der untersuchten Höhenmodelle. Die Abhängigkeit von der Geländeneigung ist bei dem ASTER GDEM und den SRTM C-Band-Höhenmodellen sehr ähnlich. Allerdings sind sowohl die Standardabweichung, als auch die systematischen Fehler (Bias) für die SRTM-Daten kleiner als für die ASTER-Daten. Als Quadratmittel der Widersprüche für horizontale Flächen gegenüber den Referenzhöhenmodellen ergibt sich für das ASTER-GDEM aus den 12 Testgebieten ein Wert von 6,74m und für die SRTM-C-Band-Daten 5,85m. Wenn der Einfluss der Waldgebiete herausgenommen wird, liegt das Quadratmittel der Widersprüche nach Berücksichtigung des Bias für ASTER-GDEM in der Größenordnung von 5m, während es für die SRTM-Daten bei 3m bis 4m liegt.

6 Morphologische Details

Nicht nur die absolute Genauigkeit ist von Bedeutung, sondern auch die morphologischen Details, die auch als relative Genauigkeit bezeichnet werden können. Die Spezifizierung der morphologischen Details ist komplex und kann am besten durch visuelle Betrachtung von Höhenlinien, die aus den Höhenmodellen abgeleitet wurden, erfolgen. Prinzipiell werden die morphologischen Details durch die Rasterweite des Höhenmodells und die relative Genauigkeit – Genauigkeit eines Punktes in Relation zum Nachbarpunkt – bestimmt. Ein Bias wirkt sich nicht auf die morphologischen Details aus. In den USA sind die SRTM C-Band-Höhenmodelle sowohl mit einer Rasterweite von 3“ (~90m am Äquator) als auch mit 1“ frei im Internet verfügbar. Ein direkter Vergleich von Höhenlinien, erzeugt aus dem ASTER GDEM und SRTM C-Band-Daten, die beide eine Rasterweite von 1“ aufwiesen, zeigte deutlich weniger Details in dem ASTER GDEM als im SRTM 1“-Höhenmodell (Abb. 5), umgekehrt sind mehr Details als mit dem SRTM 3“-Höhenmodell sichtbar.

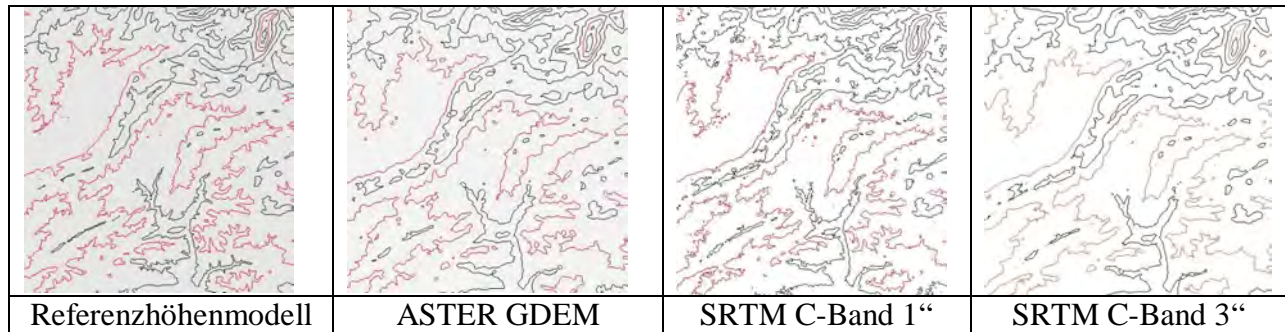


Abb. 5: Höhenlinien Testgebiet Pennsylvania, 1000 ft Höhenlinienintervall

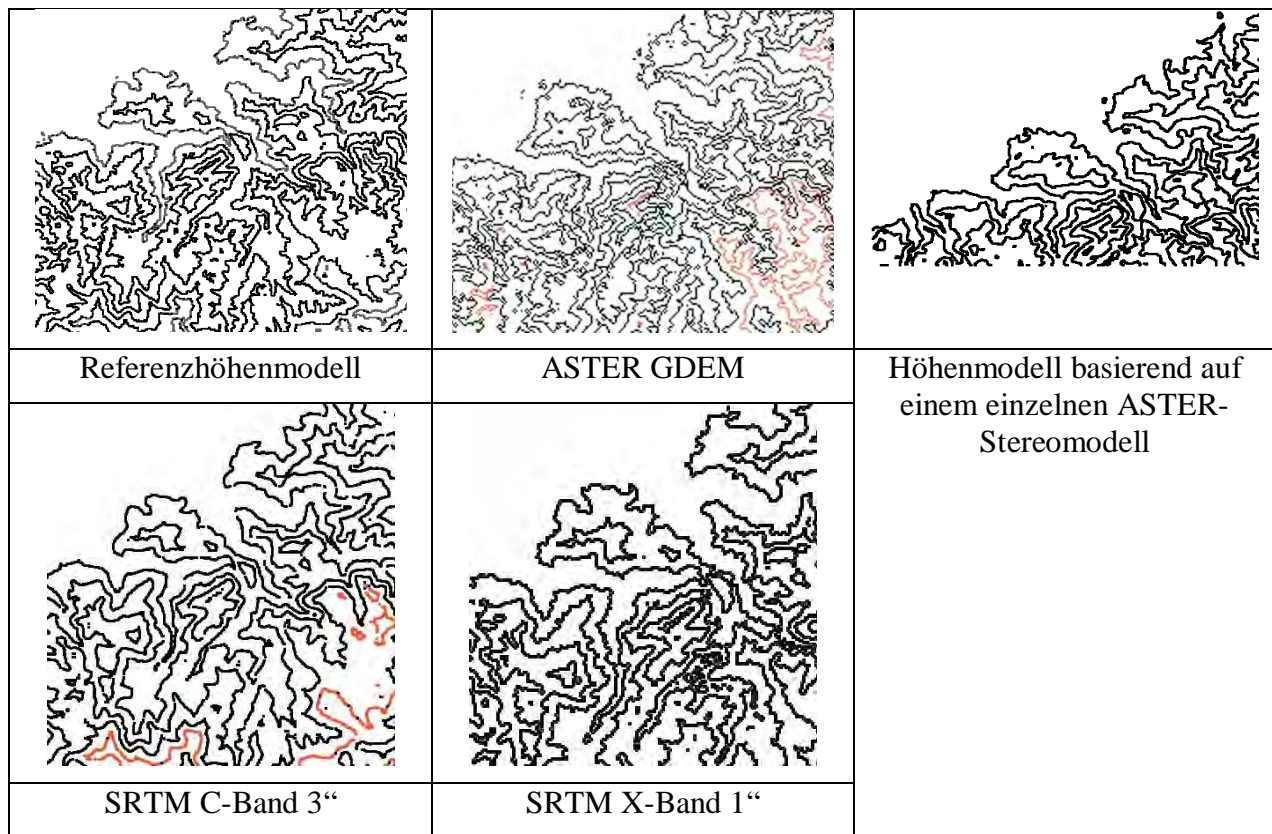


Abb. 6: Höhenlinien Testgebiet Zonguldak, 50m Höhenlinienintervall

Wie in den gezeigten Testgebieten Pennsylvania und Zonguldak liegen auch in den anderen Testgebieten die morphologischen Details des ASTER GDEM zwischen SRTM-Daten mit 1“ und SRTM-Daten mit 3“ Rasterweite. In dem ASTER Global DEM Validation, Summary Report 2009 (siehe Literaturverzeichnis) wird von einer Schärfe entsprechend 50m gesprochen. Die eigenen Untersuchungen des ASTER GDEM entsprechen den morphologischen Details, die mit einer Rasterweite von etwa 60m darstellbar sind und stimmen damit mit dem Validation Report gut überein.

7 Zusammenfassung, Schlussfolgerungen

Wie die meisten Höhenmodelle muss auch das ASTER GDEM auf das Koordinatenbezugssystem eingepasst werden. Verschiebungen von 6m in der Lage und der Höhe sind üblich. Damit sind die Lageverschiebungen etwas größer als für die SRTM-Höhenmodelle. Die Höhenverschiebungen können allerdings mit wenigen Referenzhöhen bestimmt werden, während die Lageverschiebungen sich aus der Überlagerung mit einer digitalen Karte ermitteln lassen. ASTER GDEM und SRTM-Höhenmodelle sind digitale Oberflächenmodelle, die in offenen Gebieten durch Filterung verbessert werden können. Der Höheneinfluss von Gebäuden und Wald ist zu berücksichtigen.

Es zeigt sich in der Regel eine Genauigkeitsabhängigkeit des ASTER GDEM von der Anzahl der Bilder, die für die Bestimmung eines Objektpunktes herangezogen wurden. Im Durchschnitt kann die Standardabweichung mit der Beziehung $SZ = 12,43m - 0,35m \cdot (\text{Anzahl der Bilder/Punkt})$ ausgedrückt werden, wobei dieses auf durchschnittlich 18,7 Bilder/Punkt basiert, was im Mittel auf $SZ=5,88m$ führt. Unabhängig von der Anzahl der Bilder je Punkt, kann die Standardabweichung auch durch $SZ = 6,74m + 7,6m \cdot \tan(\text{Geländeneigung})$ ausgedrückt werden, was aber durch Waldgebiete teilweise beeinflusst ist. Aus den gleichen Testgebieten ergibt sich für die SRTM-Höhenmodelle ein Wert von $SZ = 5,85m + 7,6m \cdot \tan(\text{Geländeneigung})$. Wird der Einfluss der Waldgebiete herausgerechnet, liegt die Standardabweichung des ASTER GDEM für ebene Gebiete bei etwa 5m, während sich für die SRTM Höhenmodelle ein Wert von 3 bis 4m ergibt.

Die morphologischen Details des ASTER GDEM, das eine Rasterweite von etwa 30m hat, entspricht etwa einem Höhenmodell mit einer Rasterweite von etwa 60m, während bei den SRTM-Höhenmodellen die morphologischen Details der tatsächlichen Rasterweite von etwa 90m entspricht.

Gegenüber den SRTM-Höhenmodellen hat das ASTER GDEM in Gebirgen Vorteile, da keine wesentlichen Datenlücken vorhanden sind, außerdem deckt das ASTER GDEM mit Ausnahme der Antarktis praktisch die gesamte Landfläche ab. Beide kostenlos verfügbaren Höhenmodelle sind für viele Zwecke verwendbar und stellen in vielen Entwicklungsländern eine bessere Information über die Erdoberfläche dar als bislang vorhanden war.

Literaturverzeichnis

- ASTER GDEM Validation Team: METI/ERSDAC, NASA/LPDAAC, USGS/EROS, 2009: ASTER Global DEM Validation, Summary Report, http://www.ersdac.or.jp/GDEM/E/image/ASTERGDEM_ValidationSummaryReport_Ver1.pdf, last access April 2010
- PASSINI, R., JACOBSEN, K., 2007: High Resolution SRTM Height Models, ISPRS Hannover Workshop 2007, IntArchPhRS. Vol XXXVI Part I/W51 + <http://www.ipi.uni-hannover.de/>

Drohnenbasierte Umweltbeobachtung und Kartierung basierend auf einem Virtuellen Globus

HANNES EUGSTER¹, KEVIN FLÜCKIGER^{1&2} & STEPHAN NEBIKER¹

Mini- und Mikrodrohnensysteme sind attraktive mobile Aufnahmeplattformen für die kostengünstige, vielseitig einsetzbare und rasche Geodatengewinnung. Gerade die kombinierte Nutzung dieser Geodatenerfassungstechnik mit 3D-Geoinformationsdiensten hat ein grosses Potential für die Realisierung von Echt- oder Nahechtzeitanwendungen in den Bereichen Infrastrukturüberwachung und Monitoring bis hin zur Entscheidungsunterstützung bei Waldbränden oder anderen Naturkatastrophen. Dieser Beitrag fasst die während des KTI-Forschungsprojektes UAVision umgesetzten Entwicklungen zusammen und präsentiert erste Erfahrungen und Ergebnisse der realisierten Lösung. Im Fokus von UAVision steht die Entwicklung einer Systemlösung bestehend aus unterschiedlichen Hardware- und Softwarekomponenten zur umfassenden Unterstützung von Mini- und Mikrodrohnenbasierten Überwachungs- und Kartierungsmissionen. Die Umsetzung dieser Ziele erfolgt durch Kombination des an der Fachhochschule Nordwestschweiz entwickelten virtuellen Globus i3D mit innovativen photogrammetrischen Verfahren sowie einem neuartigen drahtlosen Datenlink, welcher die simultane und robuste Übertragung von digitalen Videodaten, hochauflösenden Bildern und Telemetriedaten ermöglicht. Damit wird die Planung und Durchführung von drohnenbasierten Geodatenakquirierungsmissionen möglich, welche die zeitnahe Aktualisierung der Geodatengrundlage eines 3D-Geoinformationsdienstes gewährleistet.

1 Einleitung

Unbemannte Flugsysteme (UAS) in unterschiedlichen Grössen und Einsatzklassen werden heute auf dem Markt angeboten, welche diverse Geosensoren für die Fluglagebestimmung und Geodatenerfassung integrieren. Zudem erlauben viele unbemannte Flugsysteme die autonome- oder benutzerunterstützte Navigation. Auf Seite der Geodatenvisualisierung stehen heute verschiedenste 3D-Geoinformationsdienste auf der Basis virtueller Globen zur Verfügung. Interaktive 3D-Geoinformationsdienste werden immer häufiger für Anwendungen in den Bereichen automatisierte Infrastruktur- oder Waldbrandbeobachtung sowie zur Entscheidungsunterstützung nach Naturkatastrophen eingesetzt, was jedoch eine möglichst aktuelle Geodatengrundlage erfordert. Die in diesen Diensten verwendeten Orthobilddaten sind selten aktuell und eine Echt- oder Nahechtzeit-Geodatenintegration ist meist nicht vorgesehen. Mikro- und Minidrohnensysteme sind flexibel einsetzbare Aufnahmeplattformen für die Erfassung georeferenzierter Video- und Bilddaten. Damit eignen sie sich speziell als effiziente und kostengünstige Geodatenerfassungsplattform für die Realisierung eines 3D-Geoinformationsdienstes mit einer aktuellen Geodatenbasis.

¹ Fachhochschule Nordwestschweiz, Institut Vermessung und Geoinformation, Gründenstrasse 40, CH-4132 Muttenz, E-Mail: (hannes.eugster,stephan.nebiker)@fhnw.ch

² SwissCopter AG, Länggasse 12, CH-3280 Murten, E-Mail: kevin.flueckiger@fhnw.ch

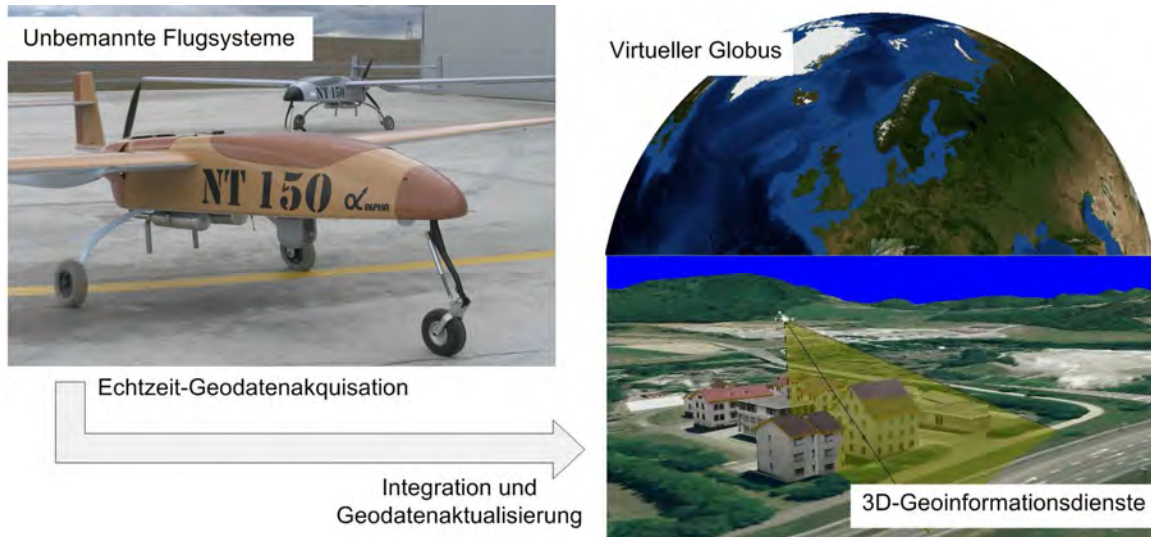


Abb. 1: UAS basierte Geodatenintegration und -Aktualisierung, Unbemannte Flugplattform NT150 SwissCopter AG (links) - Virtueller Globus i3D (rechts)

Der Beitrag gliedert sich in folgende Abschnitte: Als erstes wird die UAVision Systemarchitektur vorgestellt. Dabei wird im Speziellen die auf dem virtuellen Globus i3D (Christen und Nebiker, 2010) realisierte UAVision-Softwarelösung behandelt. Im nachfolgenden Abschnitt werden die Aspekte Video-Georeferenzierung und -Integration sowie die implementierte videobasierte Geokartierungsfunktionalität besprochen. Die Georeferenzierung der erfassten Geodaten erfolgt direkt aufgrund der vom Fluglagecontroller der Aufnahmeplattform zur Verfügung gestellten Fluglagedaten. Die erfassten und georeferenzierten Videodaten können wahlweise mit den beiden Ansätzen 'Augmented Monitoring' oder 'Virtual Monitoring' in Echtzeit oder *Offline* in den virtuellen Globus integriert werden. Konkrete Anwendungen sowie erste Erfahrungen mit UAVision werden anschliessend in Abschnitt 4 präsentiert. Zum Schluss folgen ein kurzes Fazit und ein Ausblick auf anstehende Entwicklungen.

2 UAVision Systemlösung

Unter dem Begriff Unbemannte Flugsysteme (engl. *Unmanned Aircraft System* - UAS) versteht man im Allgemeinen eine vollständige Systemlösung, die den Betrieb einer unbemannten Flugplattform gewährleistet (Weatherington, 2005). Ein UAS besteht typischerweise aus der Unbemannten Flugplattform mit Navigationseinheit selbst, den zusätzlichen Nutzsensoren, z.B. für die Erfassung von Geodaten, der Bodenkontrollstation sowie aus der Telemetrie- oder Datenübertragungskomponente. Die unbemannte Flugplattform oder Drohne selbst wird in dieser Terminologie als *Unmanned Aircraft* (UA) bezeichnet, welche vollständig autonom oder ferngesteuert geflogen werden kann. Als Mini- und Mikrodrohnen werden Plattformen bezeichnet, die das maximale Abfluggewicht von 30kg bzw. 5kg nicht überschreiten. Eine Zusammenstellung aktueller Plattformsysteme für die zivile Nutzung und eine detaillierte Kategorisierung von UAS ist in Bento (2008) zu finden. Die entworfene UAVision Systemarchitektur und die dazu entwickelten Komponenten ermöglichen die Umsetzung einer

Gesamtsystemlösung, welche speziell auf die UA basierte Echtzeit-Geodatenakquisition und die anschliessende direkte Integration in 3D-Geoinformationsdienste fokussiert ist. Nachfolgend werden zuerst die Systemarchitektur und die involvierten Hardwarekomponenten vorgestellt. Im Anschluss wird detailliert auf die realisierte Softwarelösung eingegangen, welche die gesamte Prozesskette – von der Missionsplanung, über die Durchführung bis hin zur Integration und Nutzung der erfassten Geodaten – im virtuellen Globus unterstützt.

2.1 Systemarchitektur

Die Systemlösung setzt sich wie in Abb. 2 gezeigt aus den drei Segmenten unbemannte Flugplattform, Datenkommunikationsschicht und Bodenstation zusammen. Die entworfene Architektur ermöglicht den Einsatz unterschiedlicher unbemannter Flugplattformen instrumentiert mit anwendungsspezifischen Nutzsensoren wie Video- und Bildkameras oder weiteren Geosensoren. Vorausgesetzt wird eine integrierte Navigationseinheit oder Fluglageregelung welche eine autonome oder benutzerunterstützte Navigation ermöglicht. Prinzipiell können in UAVision unterschiedliche Navigationseinheiten eingesetzt werden. Zurzeit verwenden wir hierfür den Autopiloten der Firma UAVNavigation¹ inklusive Bodenkontrollstation und integriertem Datenlink. Die Steuerung und Kontrolle der Nutzsensoren und der Datenkommunikationskomponenten auf Plattformseite sowie die *Onboard*-Speicherung der erfassten Geodaten erfolgt über das UAVision *Payload*-Managementsystem. Dieses System besteht aus einer speziell für diesen Zweck entwickelten Hardwarekomponente mit integrierter SSD-Disk, auf welcher Windows XP zusammen mit anwendungsspezifischen Softwarepaketen betrieben werden. Die Bodenstation beinhaltet die zur Navigationseinheit gehörende Kontrolleinheit sowie die UAVision-Softwarelösung zur Planung, Durchführung und Auswertung der Geodatenakquisitionsmissionen. Die Funktionalität der UAVision-Softwarelösung ist im nachfolgenden Abschnitt 2.2 im Detail beschrieben. Die Kommunikationsschicht übernimmt die Übertragung der Navigationsdaten, Steuerbefehle und erfassten Geodaten zwischen Flugplattform und Bodenstation. Dazu werden zwei drahtlose digitale Datenlinks verwendet. Die Navigationsdaten und Steuerbefehle werden über den integrierten Datenlink der Navigationseinheit bidirektional übermittelt. Die während der Mission erfassten Geodaten werden über den speziell entwickelten unidirektionalen UAVision-Datenlink übertragen, welcher das simultane Übermitteln mehrerer Bild- und Datenkanäle ermöglicht. Unterstützt werden zurzeit ein PAL- sowie ein CameraLink-Kanal. Die realisierte Videokomprimierung erlaubt die Übertragung des PAL-Signals mit einer sehr geringen End-zu-End Verzögerung von weniger als 40ms. Möglich wird damit beispielsweise eine Remote-Pilotierung des UA's mit Hilfe eines virtuellen Cockpits. Bei dieser Anwendung können virtuelle Elemente wie Flughindernisse, ein künstlicher Horizont, Navigations- oder Systemzustandsdaten ins Cockpitvideo eingeblendet werden und so das manuelle Fliegen erheblich unterstützen. Voraussetzung für eine erfolgreiche Umsetzung dieses Anwendungsszenarios ist eine maximale Verzögerung der übermittelten Videodaten von 1-2 Frames.

¹ UAVNavigation: <http://www.uavnavigation.com/>

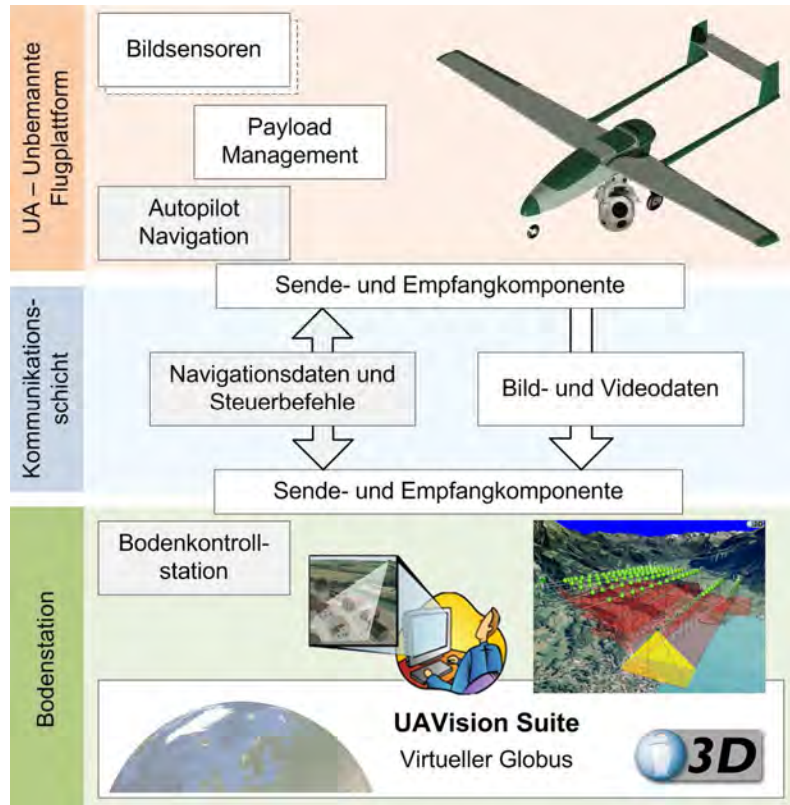


Abb. 2: UAVision Systemarchitektur und Hardwarekomponenten

2.2 Prozessierungskette und Softwarelösung

Die entwickelte UAVision-Softwarelösung besteht aus vier Modulen, welche die Durchführung von UAS-Geodatenakquisitionsmissionen ermöglicht – von der Planung, über die Durchführung bis hin zur Echtzeit- oder *Offline*-Integration und -Auswertung der erfassten Daten in 3D-Geoinformationsdiensten. In Abb. 3 sind die Prozesskette sowie die realisierten UAVision Module aufgezeigt. Sämtliche Module verwenden als Basis den virtuellen Globus i3D.

2.2.1 Mission Planning & Simulation

UAS-Missionen können direkt auf dem virtuellen Globus geplant oder aus anderen Programmen importiert werden. Die Flugpläne enthalten Fluglinien und Wegpunkte, sowie Daten über die Steuerung der auf der Plattform mitgeführten Geodatensensoren. Beispielsweise können damit Flugplan abhängige Änderungen und die Steuerung der Aufnahme- und Datenübertragungskonfiguration geplant und verwaltet werden. Eine mögliche Anwendung ist die Planung einer photogrammetrischen Befliegung mit definierten Bildauslösepunkten.

2.2.2 Mission Control

Einmal geplante Missionen können mithilfe des Mission Control Moduls vollautomatisch durchgeführt und überwacht werden. Der Missionsstatus, d.h. die Plattformposition und -Ausrichtung sowie die Sichtkegel der aktuell betriebenen Bildsensoren, kann im 3D-View mitverfolgt werden während man fortwährend mit den wichtigsten Systemstatusinformationen

versorgt wird. Dabei ist es jederzeit möglich, in den Ablauf der Mission einzugreifen. Über das Mission Control Modul werden fortlaufend im Flugplan definierte Wegpunkte nachgeladen und flugplanbezogene Steuerbefehle automatisch ausgelöst und zur Plattform übermittelt. Die Steuerbefehle für die Geodaten Sensoren und den Bild- und Videodatenlink werden direkt vom UAVision *Payload*-Managementsystem verarbeitet und umgesetzt. Die während der Mission mit dem Datenlink übertragenen Bild- und Navigationsdaten können zusätzlich für eine spätere *Offline*-Verarbeitung aufgezeichnet werden.

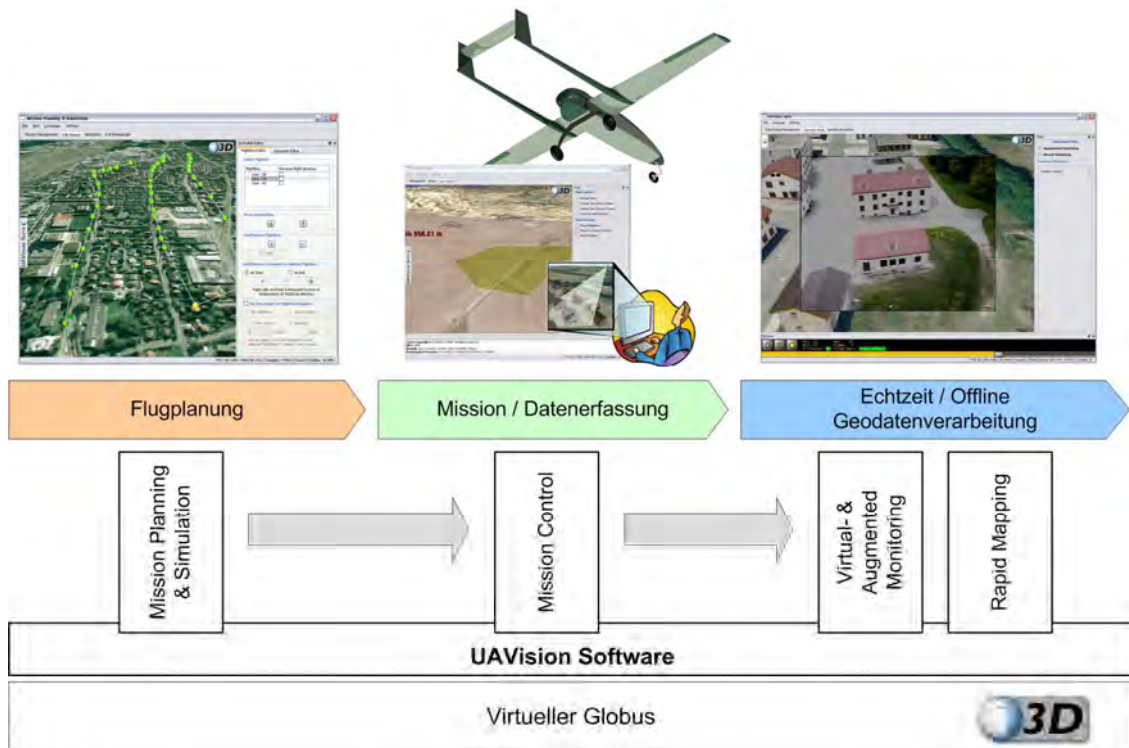


Abb. 3: UAVision Softwaremodule für UAS gestützte Geodatenakquisition

2.2.3 Virtual- und Augmented Monitoring

Dieses Modul unterstützt eine Verschmelzung der virtuellen Welt des Virtuellen Globus mit den erfassten Videodaten durch zwei Integrationsansätze wahlweise in Echtzeit oder *Offline*. Grundlage für die Integration bildet die implementierte Video-Georeferenzierungsfunktion, welche in Abschnitt 3 besprochen wird. Bei der ersten Variante, dem 'Augmented Monitoring', werden die georeferenzierten Videodaten mit den Objekten aus dem virtuellen Globus überlagert. Der zweite Ansatz, das 'Virtual Monitoring', erlaubt die Visualisierung des erfassten Videos in einem Graphikfenster und synchron dazu in einem zweiten Fenster die Darstellung der aktuellen Ausrichtung und Position des Aufnahmekegels der Videokamera in der virtuellen Welt (vgl. Abb. 4). Zudem stehen einfache Funktionen zur Verfügung, welche es erlauben, Ereignisse im Video auf dem virtuellen Globus zu verorten und zu verwalten.

2.2.4 Rapid Mapping

Ziel des Rapid Mapping Moduls ist es, Bilddaten vom UA in Nahezeit direkt in den virtuellen Globus zu integrieren. Dies erlaubt eine laufende Aktualisierung der Bilddatenbasis eines 3D-Geoinformationsdienstes, was eine völlig neue Qualität in der Beurteilung aktueller Ereignisse oder dynamischer Umweltprozesse ermöglicht.

3 Video-Georeferenzierung und Geodatenintegration

Das Augmented- und Virtual Monitoring-Modul setzt zum einen die Echtzeit-Georeferenzierung der erfassten Videodaten sowie die anschliessende direkte Integration dieser Bilddaten im virtuellen Globus voraus. Die implementierte Lösung basiert auf dem Ansatz der direkten Georeferenzierung (Mostafa und Hutton, 2005). Dazu werden die von der Navigationseinheit auf der unbemannten Aufnahmeplattform zur Verfügung stehenden Fluglagezustände direkt genutzt. Ein Fluglagezustand enthält die Plattformposition und -Ausrichtung bezüglich eines global gelagerten geodätischen Bezugssystems (z.B. WGS 84) und dessen Epoche bezüglich der UTC Zeitreferenz. Diese Daten werden in Echtzeit, parallel zu den aufgenommenen Videodaten, zur Bodenstation übermittelt. Die anschliessende Georeferenzierung erfordert eine korrekte Synchronisation der Videodaten mit den Fluglagedaten. Zu diesem Zweck werden in das übermittelte Video zusätzliche Zeitstempelinformationen in UTC integriert. Die Georeferenzierung des erfassten Videos und die anschliessende Integration in den 3D-Geoinformationsdienst erfolgen mit der in UAVision implementierten Geo-Videoverarbeitungs-komponente. Als Basis verwendet diese Komponente einen Filter-Graph, mit welchem die Einzelbilder der Videosequenz sequentiell verarbeitet werden. Die benötigte Funktionalität für die Verarbeitung und Integration der Bilddaten in den virtuellen Globus ist dabei in sogenannten Filtern implementiert. Im ersten Filter wird die integrierte Zeitstempelinformation aus jedem Einzelbild extrahiert. Der zweite Filter bestimmt für die zur Verfügung stehenden Flugzustände nach der Gleichung der direkten Georeferenzierung unter Berücksichtigung der vorgängig für das Aufnahmesystem kalibrierten Fehlauseinandersetzung und der Hebelarmkomponente die Parameter der äusseren Orientierung (Skaloud, 1999). Parallel dazu wird für jedes Frame aufgrund der extrahierten Zeitstempelinformation die gesuchte äussere Orientierung interpoliert beziehungsweise prädiziert. Im Falle der Offlineverarbeitung kann die gesuchte Lösung immer interpoliert werden. Im Gegensatz dazu erfordert die Echtzeitprozessierung eine Prädiktion der Lösung, da die zur Verfügung stehenden äusseren Orientierungen aus den Fluglagedaten in einer tieferen Frequenz sowie meist zeitlich verzögert bei der Bodenstation vorliegen. Der letzte Filter stellt nun die berechnete äussere Orientierung zusammen mit der bekannten inneren Orientierung der verwendeten Kamera sowie das Einzelframe selbst der i3D Render-Engine zur Verfügung. Basierend auf dieser Information kann nun UAVision die Bilddaten in unterschiedlichen Formen in die 3D-Szenerie integrieren und darstellen. Die beiden zurzeit realisierten Integrationsansätze sind in Abb. 4 dargestellt. Weiterführende Informationen zur realisierten Video-Georeferenzierungslösung sind in (Eugster und Nebiker, 2008) zu finden. Für die Erfassung beliebiger Geoobjekte stellt das Augmented- und Virtual Monitoring-Modul zusätzlich eine Kartierungsfunktion zur Verfügung. Diese Funktion ermöglicht das interaktive Digitalisieren beliebiger Punkt-, Linien- und Polygonobjekte

direkt in der georeferenzierten Videosequenz. Die dazu benötigte Stützpunktbestimmung erfolgt nach dem Monoplottingverfahren durch den Schnitt des Aufnahmestrahls mit der in der 3D-Szenarie aktuell geladenen digitalen Höhenrepräsentation (Kraus und Waldhäusl, 1997, Kap. 6.5.3). Die erfassten Geoobjekte können in Ebenen verwaltet und anschliessend beispielsweise in GIS-Lösungen genutzt werden.

4 Anwendungen und Erfahrungen

Erste Testflüge mit der UAVision-Systemlösung bestätigen das Potential einer UAS basierten Echtzeit-Bilddatenerfassung und einer direkten Integration in einen 3D-Geoinformationssystem. Bei diversen Testflügen und Systemtests in Amman (Jordanien), Marugan (Spanien) und Eiken (Schweiz) konnten die entwickelten UAVision-Softwaremodule und -Systemkomponenten erfolgreich validiert werden. Auf Basis des Softwaremoduls Augmented und Virtual Monitoring können unterschiedliche Monitoringanwendungen in den Bereichen Infrastrukturüberwachung, Waldbrandbekämpfung oder Personen- und Objektsuche realisiert werden. Die integrierte Kartierungsfunktion ermöglicht basierend auf den in Echtzeit integrierten Bilddaten die Digitalisierung beliebiger Geoobjekte, welche beispielsweise anschliessend in Nahechtzeit mit einer GIS basierten Entscheidungsunterstützungsumgebung synchronisiert werden können. Nachfolgende Abbildung zeigt die beiden implementierten Integrationsansätze. Beim 'Augmented Monitoring' können beispielsweise wie dargestellt die kartierten Geoobjekte sowie das bestehende Stadtmodell aus der 3D-Szene mit dem Video überlagert werden. Ergänzend dazu eignet sich das 'Virtual Monitoring' beispielsweise für die Videounterstützte Objektsuche im offenen Gelände.

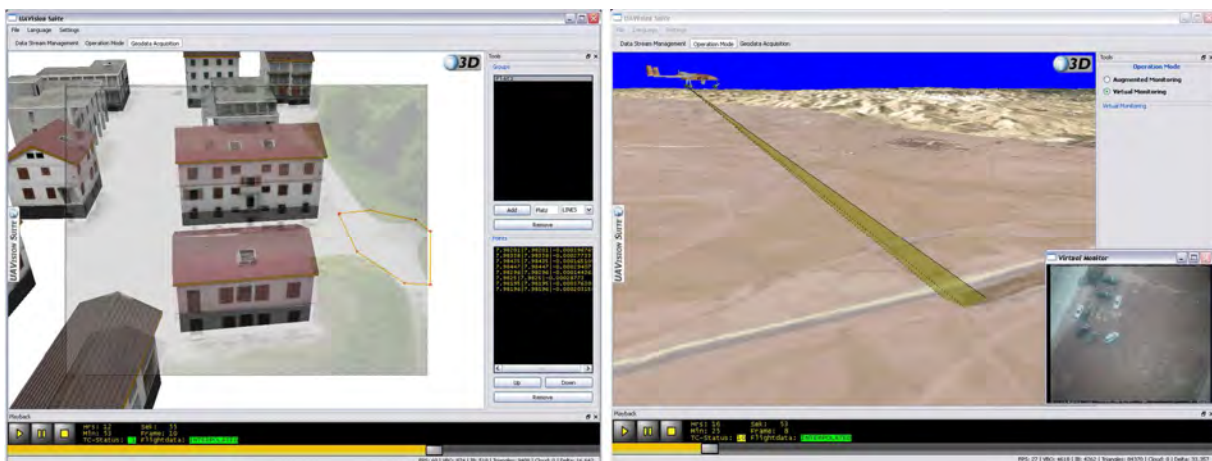


Abb. 4: Augmented Monitoring mit integrierter Kartierungsfunktion (links) und Virtual Monitoring Videodatenintegration (rechts)

5 Fazit und Ausblick

UAVision ermöglicht eine UAS unterstützte Echtzeit-Geodatenerfassung und -Integration in einen 3D-Geoinformationsdienst. Die entwickelte Systemlösung kann auf unterschiedlichen Flugplattformen kombiniert mit anwendungsspezifischen Geosensoren eingesetzt werden. Die implementierte UAVision-Software ermöglicht die Planung, Durchführung und Auswertung drohnenbasierter Geodatenakquisitionsmissionen. Die verfügbare UAVision-Software in Kombination mit dem implementierten *Payload-Management*system ermöglicht die künftige Umsetzung massgeschneiderter, anwendungsspezifischer Systemlösungen. Die UAVision Software wird laufend weiterentwickelt und soll künftig noch mehr Funktionalität in den Bereichen manuelle sowie automatische Geodatenauswertung beinhalten. Ferner werden auch weitere Integrations- und Darstellungsarten von Video- und Einzelbilddaufnahmen untersucht und in die Software integriert. Die Industriepartnerin SwissCopter AG wird UAVision in ihr Produkteportfolio aufnehmen und plant den kommerziellen Vertrieb von Gesamtsystemlösungen.

6 Dank

Das Forschungsprojekt UAVision wird von der schweizerischen Förderagentur für Innovation KTI finanziell mitunterstützt. Zudem möchten wir uns bei unseren UAVision-Projektpartnern SwissCopter AG in Murten, bei der GR-LSM Multimedia Group der EPF Lausanne und bei Nulink SA in Marin für die Zusammenarbeit bedanken.

7 Literaturverzeichnis

- BENTO, M. (2008). Unmanned Aerial Vehicles: An Overview. InsideGNSS, January/February, pp. 54-61.
- CHRISTEN, M. UND NEBIKER, S. (2010). Neue Entwicklungen im Bereich Virtueller Globen am Beispiel der i3D-Technologie. Dreiländertagung DGPF - OVG - SGPF. Wien.
- EUGSTER, H. UND NEBIKER, S. (2008). UAV-Based Augmented Monitoring - Real-Time Georeferencing and Integration of Video Imagery with Virtual Globes. XXI ISPRS Congress, Beijing.
- KRAUS, K. UND WALDHÄUSL, P. (1997). Photogrammetrie Band 1 - Grundlagen und Standardverfahren. Dümmler, Bonn.
- MOSTAFA, M. UND HUTTON, J. (2005). 10 Years of Direct Georeferencing for Airborne Photogrammetry. GIS. 11/2005.
- SKALOUD, J. (1999). Problems in Direct-Georeferencing by INS/DGPS in the Airborne Environment. ISPRS Workshop 'Direct versus Indirect Methodes of Sensor Orientation'. Barcelona.
- WEATHERINGTON, D. (2005). Unmanned Aircraft Systems (UAS) Roadmap 2005-2030 (3rd Edition) (DoD), U. D. o. D.

Anforderungen an die Auswertung UAV-gestützter Fernerkundungsdaten

URSULA KIRCHGÄSSNER¹, UWE PUTZE²,

MARIA VON SCHÖNERMARK³ & NORBERT HAALA⁴

Zusammenfassung:

Der Einsatz kleiner, ferngesteuerter Flugzeuge (UAV) bietet sich für die Fernerkundung in vielen Anwendungsbereichen an, da er eine kostengünstige und flexible Datenerfassung mit zeitlich und geometrisch hoher Auflösung verspricht. Am Institut für Raumfahrtsysteme der Universität Stuttgart wurde in den letzten Jahren ein solches Flugzeug, der Stuttgarter Adler, entwickelt. Für die Fernerkundung wurde es mit verschiedenen Sensoren ausgestattet, welche die besonderen Anforderungen an Kosten und Gewicht erfüllen können.

Zur Unterstützung der Flugführung ist der Stuttgarter Adler mit einem Autopilotensystem ausgestattet. Zur Lagemessung werden Thermalsensoren eingesetzt, welche die Nick- und Rollwinkel des Flugzeugs aus dem Unterschied der Strahlungstemperatur von Himmel und Erdboden abzuschätzen erlauben. Die ermittelten Lagewinkel wurden mit denen einer Inertialmesseinheit verglichen. Anhand eines ersten Testfluges wurde ein Korrekturfaktor für die Winkelberechnung aus den Thermalsensoren ermittelt, unter dessen Verwendung der Schätzwert der Lagewinkel erheblich verbessert werden konnte.

Dennoch genügt die erreichte Genauigkeit nicht den Anforderungen konventioneller Softwarepakete zur automatischen Bündelblockausgleichung. In diesem Artikel wird eine alternative Vorgehensweise zur photogrammetrischen Auswertung der Bilddaten vorgestellt. Aus Anwendungen der Nahbereichsphotogrammetrie bekannte Methoden zur Punktextraktion und Punktzuordnung sowie zur Näherungswertbestimmung werden eingesetzt, um eine Georeferenzierung und Orthophotoerstellung zu ermöglichen. Anhand der Bilddaten eines speziell dafür ausgelegten Messfluges wird gezeigt, welche Genauigkeit der geometrischen Auswertung mit Hilfe dieser Vorgehensweise erreicht werden kann.

- 1) Ursula Kirchgässner, Institut für Raumfahrtsysteme, Universität Stuttgart, Pfaffenwaldring 31, 70569 Stuttgart, E-Mail: kirchgaessner@irs.uni-stuttgart.de
- 2) Uwe Putze, Institut für Raumfahrtsysteme, Universität Stuttgart, Pfaffenwaldring 31, 70569 Stuttgart, E-Mail: putze@irs.uni-stuttgart.de
- 3) Maria von Schönemark, DLR, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Institut für Raumflugbetrieb und Astronautentraining, D-82234 Wessling, E-Mail: maria.schoenermark@dlr.de
- 4) Norbert Haala, Institut für Photogrammetrie, Universität Stuttgart, Geschwister-Scholl-Str. 24D, 70174 Stuttgart, E-Mail: norbert.haala@ifp.uni-stuttgart.de

1 Einleitung

Für regelmäßige Bildflüge auf kleinen Flächen mit hoher Auflösung, wie sie in vielen Anwendungsbereichen benötigt werden, bietet sich ein unbemanntes Kleinflugzeug (UAV) an, da dies eine kostengünstige und flexible Datenerfassung mit zeitlich und geometrisch hoher Auflösung verspricht. An der Universität Stuttgart wurde der *Stuttgarter Adler* für zwei Aufgaben entwickelt und instrumentiert. Zum einen wird er für Grundlagenforschung im Bereich der winkelabhängigen Reflektanz, der so genannten *bidirektionalen Reflektanzverteilungs-*

funktion (bidirectional reflectance distribution function, BRDF), eingesetzt. Dafür muss ein bestimmtes Gebiet aus verschiedenen Winkeln aufgenommen werden, was durch Spiralflüge ermöglicht wird. Dies erfordert eine über bis zu 15 Minuten gleich bleibende Fluglage. Um die Instrumente auf das Zielgebiet auszurichten, muss der Rollwinkel des Flugzeugs während des Spiralfzugs bekannt sein.

Zum anderen werden Befliegungen zu landwirtschaftlichen und ökologischen Zwecken, wie der Ableitung von Boden- und Pflanzenparametern, durchgeführt. Im *Stuttgarter Adler* wird die Lagemessung aus Gewichts- und Kostengründen mit einer Methode durchgeführt, die nicht auf der Trägheitsnavigation beruht, sondern die Winkel mit Hilfe von Thermalsensoren schätzt. Diese Schätzwerte werden zur Navigation verwendet, genügen aber bisher wegen ihrer Ungenauigkeit weder zur Vororientierung der Bilder für die photogrammetrische Auswertung noch zur Ausrichtung der Kameras auf ein vordefiniertes Zielgebiet. Um die Genauigkeit dieser Schätzwerte zu verbessern und deren Grenzen zu ermitteln, wurde für Testflüge eine Inertialmesseinheit (IMU) in den *Stuttgarter Adler* eingebaut und deren Messwerte wurden mit den Schätzwerten der Thermalsensoren verglichen.

Da das im *Stuttgarter Adler* verwendete System bisher nicht die benötigte Genauigkeit liefert, sollte während der photogrammetrischen Auswertung optional auf die Nutzung gemessener Kamerastationen verzichtet werden. Somit gestaltet sich die Beschaffung von Näherungswerten für die Punktübertragung bei der angestrebten vollautomatischen Aerotriangulation schwierig. Außerdem unterscheidet sich die Fluggeometrie von Standardbefliegungen mit bemannten Flugzeugen aufgrund der Flugeigenschaften sowie der geringen Flughöhe des Kleinflugzeugs. Die Einhaltung von geplanten Standardüberdeckungen während des Fluges ist in der Regel nur bedingt möglich.

Die beim *Stuttgarter Adler* eingesetzten Kameras unterscheiden sich in ihren geometrischen Eigenschaften stark von gewöhnlich zur photogrammetrischen Datenerfassung eingesetzten Instrumenten. Aufgrund der geringen Größe ist die Pixelzahl der Sensoren beschränkt. Um dennoch eine größere Bodenauflösung zu erreichen, besitzen die Kameras einen engeren Öffnungswinkel.

Eine geometrische Auswertung der Luftbilder mit klassischen Softwarepaketen zur automatischen Bündelblocksauflösung ist aus diesen Gründen zunächst nicht möglich. Stattdessen werden aus Anwendungen der Nahbereichsphotogrammetrie bekannte Methoden zur Punktextraktion und Punktzuordnung sowie zur Näherungswertbestimmung eingesetzt. Die von SNAVELY ET. AL. (2006, 2007) entwickelte Methode, 3D-Informationen aus beliebigen Bildsammlungen zu rekonstruieren, werden auf die Daten aus Bildflügen mit dem *Stuttgarter Adler* angewendet, um eine Orientierung der Bilder untereinander zu berechnen. Anschließend werden Stereopunkte gemessen und eine Transformation der Bilder in Weltkoordinaten durchgeführt.

2 Der Stuttgarter Adler

2.1 Plattform

Der *Stuttgarter Adler* ist ein ferngesteuertes zweimotoriges Kleinflugzeug, das im Rahmen zweier Studienarbeiten (ALT & SCHWARZBACH 2004) speziell für die multispektrale

Fernerkundung entworfen wurde. Mit zwei elektrischen Antrieben und einem maximalen Startgewicht von 25 kg erreicht es eine Flugzeit von bis zu 30 Minuten. Es wurde für Messflüge mit einer Fluggeschwindigkeit von 10 – 20 m/s in einer Höhe von 300 m ausgelegt.

2.2 Autopilot

Zur Durchführung von Bildflügen verfügt der *Stuttgarter Adler* über einen Autopiloten, der in der Lage ist, das Flugzeug anhand eines vordefinierten Flugplans zu steuern. Hierfür kommt das Open-Source Projekt „Paparazzi“ zum Einsatz (BRISSET 2006). Bei diesem Projekt handelt es sich um ein kostengünstiges, offenes System, das von seiner Entwickler- und Nutzergemeinde stetig weiterentwickelt wird. Neben der Hardware und Flugsoftware enthält das System eine umfangreiche Bodenstationssoftware.

Um die Lage des Flugzeugs in Relation zum Horizont zu bestimmen, verwendet das System paarweise angeordnete Thermosensoren. Dazu werden zwei Sensorpaare, wie in Abb. 1 (links) dargestellt, über Kreuz horizontal angeordnet. Durch die deutliche Temperaturdifferenz zwischen Himmel und Erdboden können diese Sensorpaare ein Signal liefern, das abhängig von der Lage des Sensors gegenüber dem Horizont ist. Eine waagrechte Fluglage führt zu einem Temperaturgleichgewicht zwischen beiden Seiten der horizontal angeordneten Sensorpaare, während eine Abweichung davon zu einer Temperaturdifferenz innerhalb der Sensorpaare führt. Durch eine gekreuzte Anordnung zweier Sensorpaare kann das System Roll- und Nickbewegungen des Flugzeuges unterscheiden.

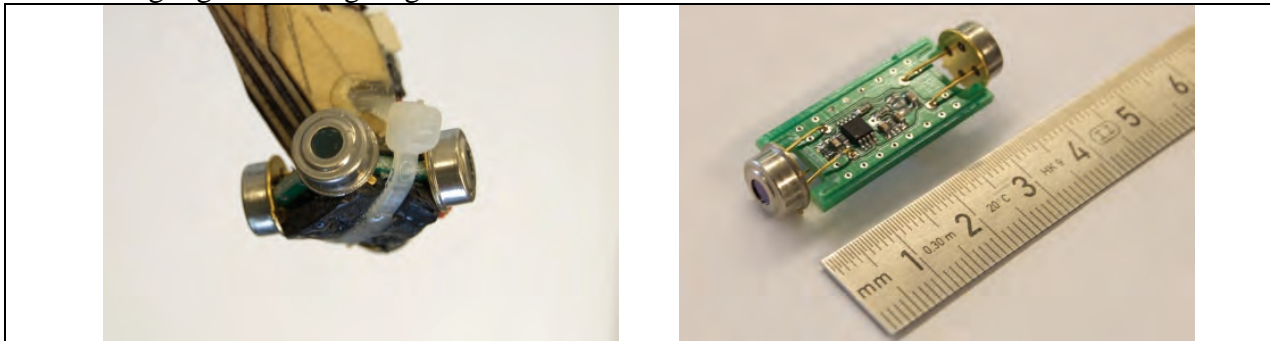


Abb. 1: Thermosensorpaare, horizontal (links) und vertikal (rechts)

Ein drittes, vertikal orientiertes Sensorpaar wie Abb. 1 (rechts) liefert einen Kontrastwert zwischen Erdboden und Himmel, der als Skalierungsfaktor für eine Winkelabschätzung herangezogen wird. Diese geschätzten Roll- und Nickwinkel werden als Regelgröße des Flugreglers verwendet. Gegenüber einem Kreiselssystem bietet dieses Verfahren neben der geringen Komplexität und niedrigen Kosten ein sehr robustes System, da die Thermalsensoren im Gegensatz zu einem Kreisel keine Drift aufweisen. Ein Nachteil ist allerdings, dass die benötigte Temperaturdifferenz von etwa 8 K zwischen Erdboden und Himmel bei bestimmten Wetterbedingungen, z.B. beim Auftreten relativ warmer Wolken, nicht erreicht wird.

2.3 Instrumente

Die Missionsnutzlast besteht wahlweise aus drei Kameras im sichtbaren und nahen infraroten Spektralbereich (VIS/NIR) sowie einem Spektrometer, oder aus einer thermischen Infrarotkamera in Kombination mit einer der Kameras im sichtbaren Spektralbereich. Technische

Daten zu den Instrumenten sind in Tab. 1 zusammengefasst. Die VIS/NIR-Kameras haben bei einer Brennweite von 17 mm, einer Pixelgröße von 4,65 μm und einem Bildformat von 1280 x 1024 Pixeln einen sehr schmalen Öffnungswinkel, um eine hohe Bodenauflösung zu ermöglichen. Bei einer Flughöhe von 300 m wird eine Pixelgröße am Boden von ca. 10 cm erreicht. Für die in Kapitel 4 präsentierte Untersuchung wurden Aufnahmen der Kamera mit rotem Filter verwendet.

Tab. 1: Nutzlastinstrumente

	VIS/NIR Kameras	Spektrometer	TIR Kamera
Hersteller und Modell	Vision Components GmbH VC4068	Avantes AvaSpec 128	DIAS Infrared GmbH Pyroview 320L Compact
Sensor	1280 x 1024 Pixel CCD	128 Pixel Photodioden Array	320 x 240 Pixel ungekühltes Bolometer
Spektralbereich	520, 630, 880 nm	400–1000 nm	8–14 μm
Blickwinkel (FOV)	ca. 20° x 16°	ca. 0,57° x 0,29°	30 x 23°
Gewicht	460 g pro Kamera	150 g	1600 g ohne PC

3 Messflüge

3.1 Bildflug

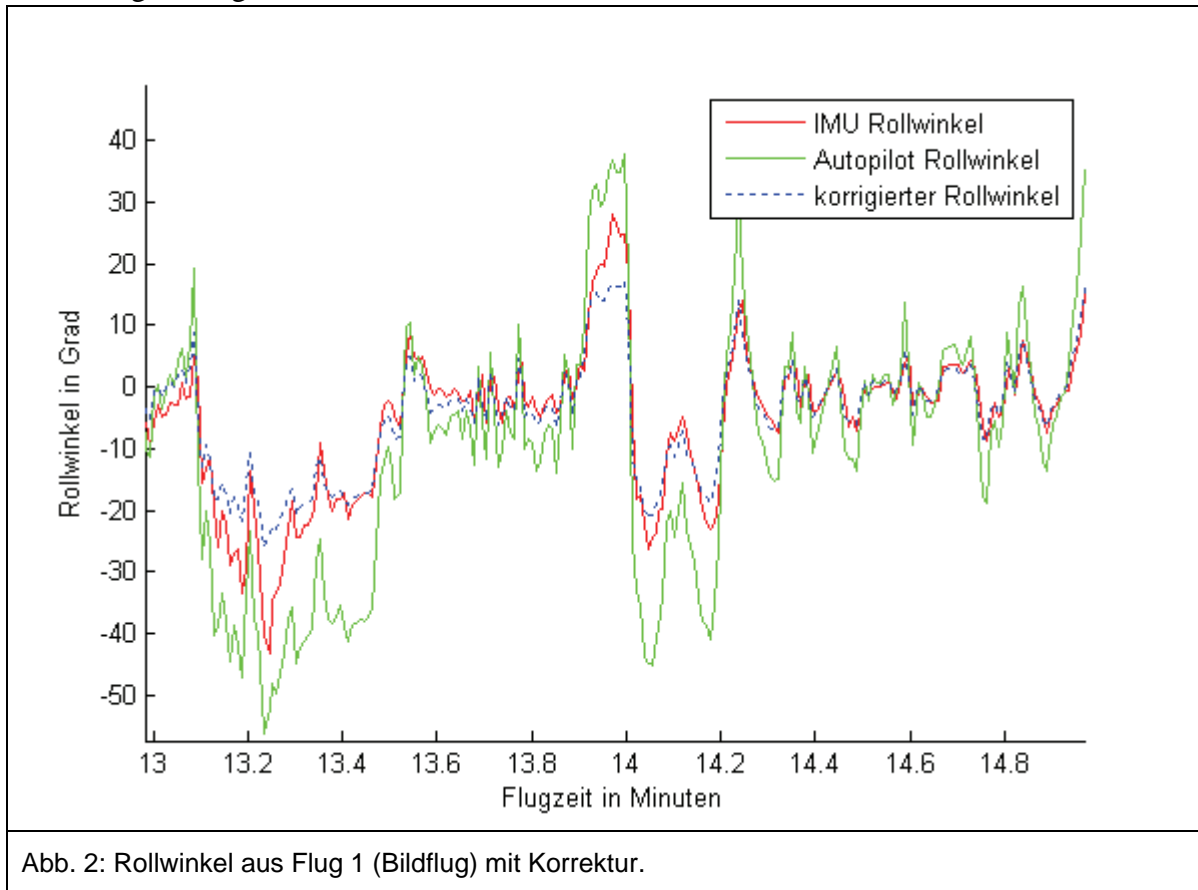
Am 20. April 2010 wurde über einer Fläche von ca. 200 m x 400 m ein Bildflug mit 3 Streifen durchgeführt. Dabei wurden insgesamt 65 Bilder aufgenommen. Auf der Fläche waren 43 jeweils 25 cm x 25 cm große, weiße Signaltafeln ausgelegt. Die Objektkoordinaten der signalisierten Punkte wurden mit statischer differentieller GPS Phasenbeobachtung bestimmt, die Genauigkeit der Objektpunkte lag damit im Bereich von 1 cm in der Lage und 2 cm in der Höhe.

3.2 Lagewinkel

Zur Evaluierung der Schätzwerte für Roll- und Nickwinkel aus den Messungen der Thermosensoren wurde ein Vergleich mit einer inertialen Messeinheit (IMU) vom Typ „MTi-G“ der Firma „Xsens Technologies B.V.“ angestellt. Bei dieser IMU handelt es sich um ein kompaktes, integriertes System basierend auf MEMS-Sensoren, welche Beschleunigungen und Drehraten messen, sowie einem GPS Empfänger. Zusätzlich verfügt die IMU über ein 3D-Magnetometer, ein Barometer und einen Temperatursensor. Ein integrierter Mikroprozessor wendet eine Kalmanfilterung an, um die dreidimensionale Lage und Position in Echtzeit zu berechnen. Die Genauigkeit der Roll- und Nickwinkel wird vom Hersteller mit 1 ° quadratischer Mittelwert (QMW) angegeben (XSSENS TECHNOLOGIES B.V. 2009).

Mit den Daten des oben beschriebenen Bildflugs wurden die Rollwinkel der beiden Systeme Autopilot und IMU verglichen. Demnach wurde der Rollwinkel durch den Autopiloten im Mittel um den Faktor 2,16 zu groß geschätzt. Der QMW-Wert der Differenz zwischen dem von IMU und Autopilot gemessenen Rollwinkel beträgt 11,4 °. Da die geschätzten Winkel proportional zum Skalierungsfaktor des vertikalen Thermosensorkopfes sind, wurde hier ein Korrekturfaktor eingeführt, welcher die geschätzten Werte denen der IMU angleicht. Die Messwerte und die

korrigierten Werte sind anhand eines Flugabschnitts in Abb. 2 dargestellt. Der Mittelwert der Abweichung verringert sich durch den Korrekturfaktor zunächst auf $6,2^\circ$.



Nachdem der Korrekturfaktor im Autopiloten eingeführt war, wurde ein weiterer Flug mit IMU durchgeführt. Der Rollwinkel von IMU und Autopilot unterscheidet sich dann im Mittel noch um $3,8^\circ$. Der Korrekturfaktor wird automatisch auch auf den Nickwinkel angewendet, da dieser derselben Skalierung durch das vertikale Thermopaar unterliegt. Hier besteht allerdings außer der Skalierung offensichtlich noch ein Versatz zwischen den Messwerten. Dieser ist bedingt durch den Einbau der Sensoren im Flugzeug. Nachträglich wurde festgestellt, dass auch der Rollwinkel einbaubedingt einen Versatz zwischen der IMU und den Autopilotenwerten aufweist. In der letzten Zeile von Tab. 2 ist daher für Flug 1 eine neue Winkelkorrektur angegeben, bei welcher ein Versatz von $-5,7^\circ$ zwischen den Rollwinkeln von Autopilot und IMU berücksichtigt wurde. Hierdurch verbessert sich die Genauigkeit auf $5,1^\circ$ RMS. Die unverändert gebliebenen Werte sind in Grau dargestellt.

Die erreichbare Genauigkeit der Winkelmessung mit den beschriebenen Thermopaaren liegt somit bei etwa 5° . Dies genügt nicht als Vororientierung für die Auswertung der Luftbilder in konventionellen Softwarepaketen. Aber die Instrumente können voraussichtlich exakt genug ausgerichtet werden, um ein vordefiniertes Zielgebiet im Blickfeld zu behalten, wie für die Messung der BRDF erforderlich.

Tab. 2: Winkelgenauigkeit mit Thermopaaren

	Ermittelter Korrekturfaktor	QMW der Rollwinkel-differenz	Versatz zwischen Rollwinkeln	RMS der Rollwinkel-differenz nach Korrektur	Versatz zwischen Nickwinkeln	QMW der Nickwinkel-differenz	QMW der Nickwinkel-differenz nach Korrektur
Flug 1	2,16	11,4279 °	--	6,1797 °	13,5861 °	15,693 °	3,1589 °
Flug 2	--	3,8027 °	2,4818 °	2,8812 °	7,3791 °	7,8561 °	2,7793 °
Flug 1 neu	1,80	11,4279 °	-5,7464 °	5,1242 °	13,5861 °	15,693 °	3,1589 °

4 Geometrische Auswertung der Bilddaten

Die geometrische Auswertung der Bilddaten durch eine automatische Bündelblockausgleichung erfolgt zunächst durch das Programmsystem Bundler. Dieses System wurde innerhalb des Projektes Photo Tourism entwickelt (Snively et. al. 2006), das mittlerweile in die 3D Photoverwaltungssoftware Photosynth von Microsoft aufgegangen ist. Photosynth erlaubt es seinen Nutzern Bildersammlungen eines Objekts ins Netz laden, die nach der Prozessierung mit einem Online-Bildbrowser in 3D betrachtet werden können. Die in Bundler realisierte näherungswertfreie Bündelblockausgleichung beruht zunächst ausschließlich auf Verknüpfungspunkten. Für die Merkmalsberechnung und Zuordnung der Verknüpfungspunkte wird der SIFT Algorithmus (Lowe, 2004) eingesetzt. Durch die Beschränkung der Beobachtungen auf Verknüpfungspunkte beziehen sich die berechneten äußeren Orientierungen der Kamerastandpunkte zunächst auf ein Modellkoordinatensystem. In der zur Auswertung der Adler-Bilder realisierten Implementierung erfolgt der Übergang in das übergeordnete Referenzkoordinatensystem entweder basierend auf GPS-Messungen der Kamerastandpunkte oder durch Stereomessung von Passpunkten. Dadurch kann jeweils eine 7-Parametertransformation vom Modell- ins Objektkoordinatensystem bestimmt werden.

Abb. 3 zeigt die Entzerrung des aufgenommenen Bildblocks mit den automatisch berechneten Bildorientierungen nach der Transformation in das Objektkoordinatensystem. Überlagert sind die Positionen der signalisierten Punkte, die zur Kontrolle des Ergebnisses verwendet wurden. Die Entzerrung erfolgt dabei zunächst durch Projektion auf eine ausgleichende Ebene, die aus den 3D Koordinaten der Verknüpfungspunkte bestimmt wurde. Dies ist zunächst für eine Kontrolle der angestrebten Flächenbefliegungen im Feld ausreichend.

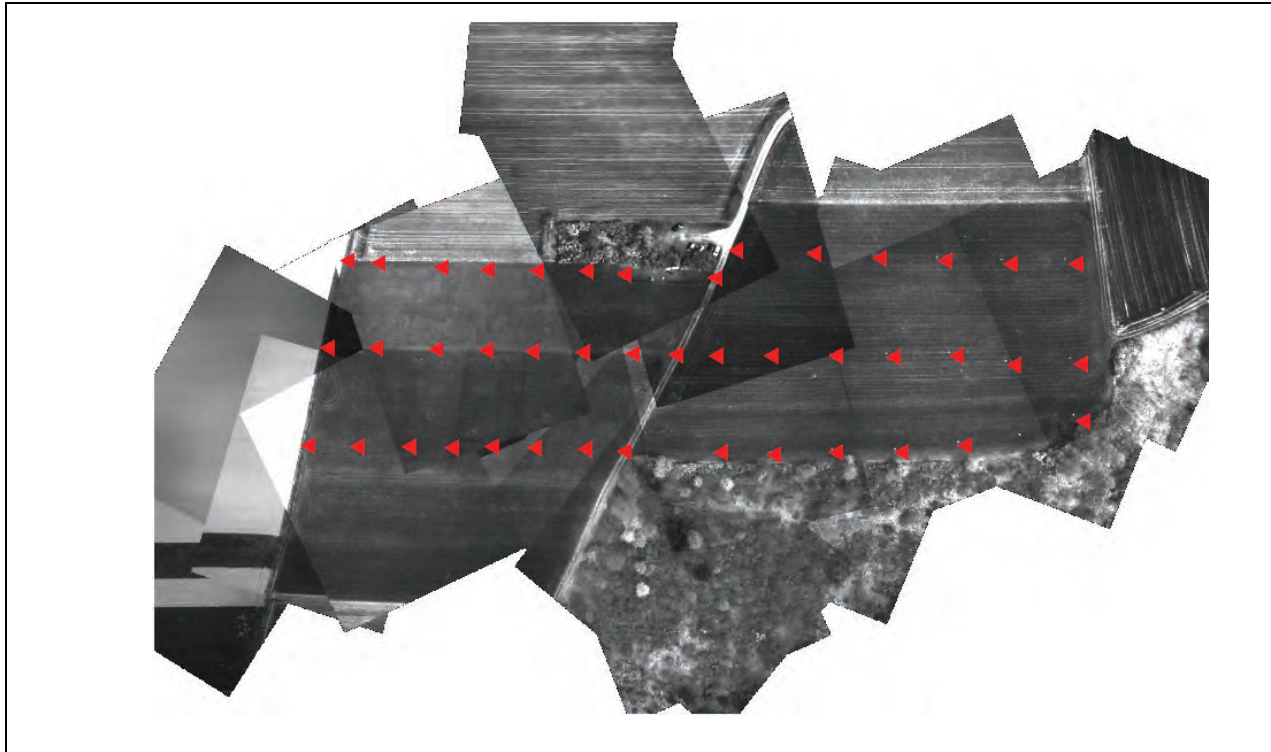


Abb. 3: Entzerrter Bildverband mit verfügbaren Passpunkten

Eine weitergehende geometrische Auswertung der Bilddaten einschließlich einer integrierten Kamerakalibrierung erfolgte mit dem Programmsystem DGAP (STALLMANN 2008), wobei hierfür die zunächst berechneten Orientierungsparameter als Näherungswerte verwendet wurden.

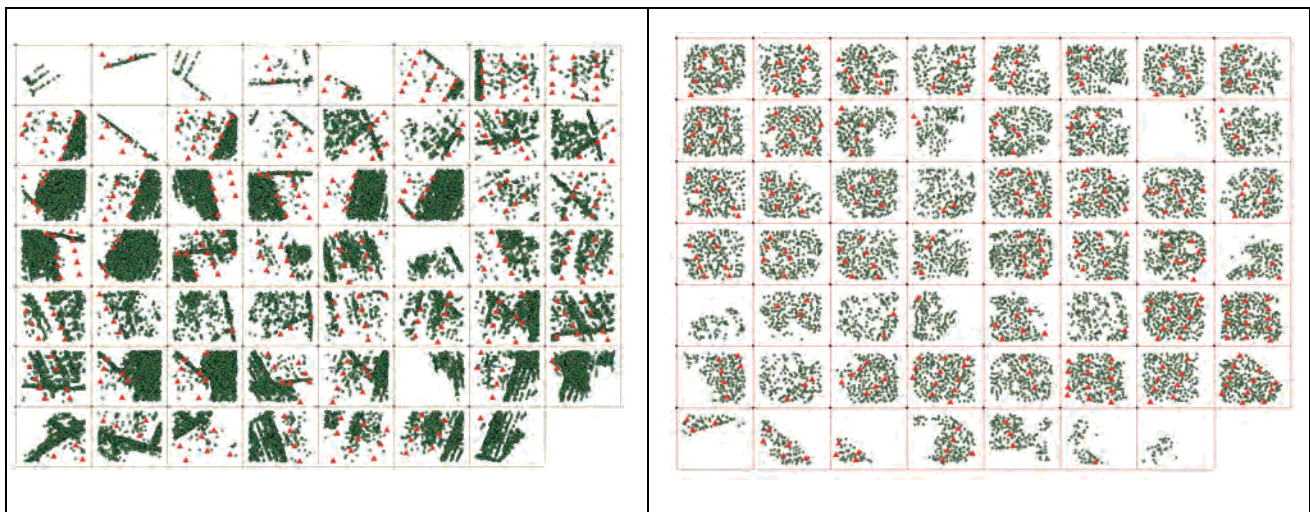


Abb. 4: Verteilung der Verknüpfungspunkte aus der automatischen Aerotriangulation für Programmpakete Bundler (links) und MATCH-AT (rechts)

Das Ergebnis der Untersuchungen ist in Abb. 4 dargestellt. Die grünen Punkte repräsentieren die in den einzelnen Bildern des orientierten Blocks vorhandenen Verknüpfungspunkte, als rote Dreiecke sind die Positionen der signalisierten Punkte dargestellt. Auf der linken Seite der Abb. 4 sind die Verknüpfungspunkte der Bundler-Software dargestellt, rechts ist analog dazu das Ergebnis der automatischen Verknüpfungspunktbestimmung für die Software MATCH-AT (SIGLE & HEUCHEL 2001) abgebildet. Im Gegensatz zur Prozessierung mit Bundler war für diese Prozessierung die Bereitstellung von Näherungswerte für die Bildorientierungen erforderlich, die jedoch bei Standardbildflügen in erforderlicher Genauigkeit bereits aus Daten der Flugplanung zur Verfügung stehen. Die auf den SIFT-Deskriptoren beruhende Zuordnung in Bundler ermöglicht eine vollkommen näherungswertfreie Auswertung. Abb. 4 (links) zeigt allerdings eine teilweise unregelmäßige Verteilung der Verknüpfungspunkte. Im Gegensatz dazu sind die durch MATCH-T automatisch erzeugten Verknüpfungspunkte in Abb. 4 (rechts) regelmäßig verteilt. Insgesamt ergibt sich dadurch auch eine etwas höhere Genauigkeit, die Standardabweichung (RMS) der Objektkoordinaten (innere Genauigkeit) ergibt sich für Bundler zu $X=0.056\text{m}$, $Y=0.048\text{m}$ $Z=0.383\text{m}$, für MATCH-AT $X=0.035\text{m}$, $Y=0.024\text{m}$, $Z=0.212\text{m}$. Im Rahmen der Selbstkalibrierung wurden in der Bündelblockausgleichung lediglich radialsymmetrische Verzeichnung der Kamera bestimmt.

5 Ausblick

Die für BRDF-Messungen erforderliche konstante Fluglage kann für die IMU problematisch sein, da diese bei Bewegungen mit geringer Dynamik die Kreiseldrift nur unzureichend kompensieren kann. Die Winkelmessung mit Thermosensoren, die keine Drift aufweisen, könnte für die Einhaltung solcher Fluggeometrien von Vorteil sein. Ob die erreichte Verbesserung der geschätzten Winkel zur kontinuierlichen Ausrichtung der Instrumente auf ein Zielgebiet ausreicht, wird in weiteren Bildflügen mit spiralförmiger Geometrie gezeigt werden.

Das im Programm Bundler verwendete Verfahren eignet sich zur Näherungswertfindung für die geometrische Auswertung von Bilddaten unkonventioneller Fluggeometrien bis hin zu völlig unstrukturierten Bildsammlungen. Dies ermöglicht die Aerotriangulation von Luftbildern völlig ohne Vororientierung durch eine IMU. Gegebenenfalls kann das Ergebnis durch eine Weiterverarbeitung mit klassischen Programmpaketen verbessert werden.

6 Literaturverzeichnis

- ALT, B., SCHWARZBACH, M., 2004. "Auslegung eines Modellflugzeuges fuer die Fernerkundung". Studienarbeit, Universitaet Stuttgart, Institut für Raumfahrssysteme. IRS-04-S35.
- BRISSET, P., 2006. "The Paparazzi solution". In Micro Air Vehicle Conference 2006. URL www.recherche.enac.fr/paparazzi/papers_2006/mav06_paparazzi.pdf.
- LOURAKIS, M.I.A., A.A. ARGYROS, 2004. The Design and Implementation of a Generic Sparse Bundle Adjustment Software Package Based on the Levenberg-Marquardt Algorithm. Tech. Rep. 340, Inst. of Computer Science-FORTH, Heraklion, Crete, Greece. URL <http://www.ics.forth.gr/~lourakis/sba>.

- LOWE, D. 2004: Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints In: International Journal of Computer Vision. Vol. 60, No. 2, pp. 91-110.
- SIGLE, M., HEUCHEL, T. 2001: MATCH-AT: Recent Developments and performance, Photogrammetric Week 01, pp. 189-194.
- SNAVELY, N., SEITZ, S., SZELISKI, R. 2006: Photo Tourism: Exploring image collections in 3D. ACM Transactions on Graphics (Proceedings of SIGGRAPH 2006).
- SNAVELY, N., SEITZ, S., RICHARD SZELISKI. Modeling the World from Internet Photo Collections. International Journal of Computer Vision, 2007.
- STALLMANN, D. DGAP Notes, 2008. URL <http://www.ifp.uni-stuttgart.de/publications/software/openbundle/index.html>
- XSENS TECHNOLOGIES B.V., "MTi-G User Manual and Technical Documentation", Document MT0137P, Revision G, 27 May 2009.

Luftgestützte Low-Cost - Aufnahmeplattform zur Unterstützung von Katastropheneinsätzen

MATHIAS SCHARDT¹, HANNES RAGGAM², ROLAND WACK², MARTIN OFNER²,
KARLHEINZ GUTJAHR² & OTTO KOUDELKA³

Zusammenfassung: In der Publikation wird eine fluggestützte Aufnahmeplattform vorgestellt, die es ermöglicht, dem Katastrophenschutz geokodierte Lagebilder in nahezu Echtzeit zur Verfügung zu stellen. Die Aufnahmeplattform besteht aus digitalen RGB-Kameras, einer Thermalkamera, einem GPS-Empfänger und einer IMU (Inertial Measuring Unit) zur Bestimmung der äußeren Orientierung sowie einem PC für die Datenspeicherung, Kamerasteuerung und Datenvorverarbeitung. Über ein breitbandiges Line-of-Sight – Kommunikationsmodul lassen sich die aufgenommenen Daten direkt zu einer mobilen oder fixen Bodenstation übertragen. In einem Bodensegment werden georeferenzierte Bilddaten über direkte Geokodierungsverfahren sowie radiometrisch kalibrierte Bildmosaik berechnet. Eine weitere Komponente des Bodensegmentes ist die Visualisierung der Bilddaten sowie deren intelligente Verknüpfung mit Karteninformationen in einem geographischen Informationssystem. Die Ausführungen befassen sich mit den Komponenten der Flugplattform, den Methoden zur Bildauswertung sowie mit den bei der Geokodierung erzielbaren Genauigkeiten. Das Potenzial der Plattform wird anhand einiger ausgewählter Bildbeispiele, die verschiedene Katastrophenszenarien zeigen, demonstriert.

1 Einleitung

Nach Naturkatastrophen wie Überflutungen, Erdbeben, Erdbeben, Waldbränden oder Industrieunfällen gibt es seitens des Katastrophenschutzes einen massiven Bedarf an aktuellen Informationen innerhalb weniger Minuten oder Stunden. Die verschiedenen, für den Katastrophenschutz verantwortlichen nationalen Organisationen unternehmen große Anstrengungen, durch den Einsatz neuer Kommunikations- und Informationstechnologien das Krisenmanagement zu verbessern. Ein gravierendes Problem stellt dabei die Datenverfügbarkeit dar, da Informationen über das aktuelle Lagebild in Katastrophenfällen nicht, oder wenn doch, dann nicht zeitgerecht zur Verfügung gestellt werden können.

Grundsätzlich eignet sich die Fernerkundung zur Ableitung unterstützender Informationen für das Katastrophenmanagement in besonderem Maße, da sie bei entsprechender Verfügbarkeit eine großflächige Kartierung der Katastrophensituation ermöglicht und somit einen synoptischen Überblick über die räumliche Verteilung von Schäden verschafft. Dies gilt sowohl für die Präventions- und Wiederaufbauphase als auch für die Katastrophensituation selbst.

So hat auf internationaler Ebene für den Einsatz von Satellitendaten bei großen Katastrophensituationen die Charta „Weltraum und Katastrophen“ (Charter on Cooperation to Achieve the Coordinated Use of Space Facilities in the Event of Natural or Technological Disasters) wichtige Grundlagen zu einem vereinfachten Zugang zu Satellitendaten geschaffen.

¹ Institut für Fernerkundung und Photogrammetrie, TU Graz

² Institut für Digitale Bildverarbeitung, Forschungsgesellschaft Joanneum Research mbH

³ Institut für Nachrichtentechnik und Wellenausbreitung, TU Graz

Zudem werden im Rahmen des GMES-Programmes (Global Monitoring for Environment and Security) der Europäischen Kommission fernerkundungsbasierte Servicestrukturen aufgebaut (GMES Core Services und GMES Down Stream Services). Dabei hat sich gezeigt, dass Satellitenbilder bei großflächigen Schadensereignissen wie beispielsweise Tsunamis oder bei Ereignissen in Regionen der Erde mit geringer Informationsinfrastruktur die satellitengestützte Fernerkundung das internationale Katastrophenmanagement unterstützen kann. Bei kleinräumigen Ereignissen, wie beispielsweise bei einem Hochwasser in Mitteleuropa, hat sich jedoch herausgestellt, dass die temporale Auflösung von satellitenbasierten Fernerkundungssystemen oftmals nicht ausreicht. Eine Ausnahme bilden hier bereits operationelle Informationsservices im Bereich der Meteorologie.

Bezüglich der Verwendung von flugzeuggetragenen Fernerkundungssystemen kann festgestellt werden, dass derzeit keine Servicestrukturen bestehen, die eine Einbindung von aktuellen geokodierten Luftbilddaten in die aktuelle Lagedarstellung während eines akuten Krisenszenarios ermöglichen. Luftbilder werden zwar nach Katastrophen aufgenommen, es dauert jedoch oft mehrere Tage oder Wochen, bis dem Katastrophenmanagement georeferenzierte Daten vorliegen.

2 Problemstellung

Vor dem Hintergrund der angeführten Problematik hat die Forschungsgesellschaft Joanneum Research (Institut für Digitale Bildverarbeitung und Institut für Angewandte Systemtechnik) und die TU Graz (Institut für Fernerkundung und Photogrammetrie / Institut für Nachrichtentechnik und Wellenausbreitung) gemeinsam mit der Firma Diamond Aircraft Industries einen Prototypen für eine fluggestützte Aufnahmeplattform entwickelt. Als Basis für diese Entwicklung konnten Vorläufer-Lösungen, welche für „Handheld“-Aufnahmen aus Hubschraubern konzipiert waren, verwendet werden (Raggam et al., 2006, 2007; Almer et al., 2007). Die Vorteile dieser Aufnahmeplattform gegenüber herkömmlichen flugzeuggetragenen Aufnahmesystemen sollten einerseits die schnelle Übertragung der Daten zur Auswertestation mittels LOS (line of sight) – Lösungen sowie die vollautomatische Geokodierung von Luftbildern ohne manuellen Eingriff sein, sodass orthorektifizierte Luftbilder bereits innerhalb weniger Minuten nach der Datenaufnahme dem Katastrophenschutz zur Verfügung stehen können.

Die Entwicklungen dieses Vorhaben wurden im Rahmen des Projektes PUKIN (Periodische Überwachung kritischer Infrastrukturen) in der Programmlinie KIRAS der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft vorgenommen.

Die Anforderungen, die seitens der Nutzer an ein solches System gestellt werden, sind im Folgenden zusammenfassend dargestellt:

- Verfügbarkeit eines „Gesamtsystems“ von der Aufnahme bis zum NRT-Endprodukt („near-real-time“ Lösung)
- Multisensor-Konzept durch Einbindung optischer und thermischer Sensoren, um eine breite Palette von Anwendungen abdecken zu können
- Nutzung von kostengünstigen, gezielt für die Anwendungsbedürfnisse ausgewählten Sensorkomponenten
- Integrierte Near Real Time Up- und Downlink-Komponente, Option für satellitenbasierten Downlink

- Georeferenzierungsgenauigkeit gemäß den Anwendungsbedürfnissen (< 1 Meter)
- Echtzeitnahe Datenprozessierung und Analyse (Generierung von Ortho-Fotos, sowie Berechnung radiometrisch kalibrierter Bilddaten in einem Bodensegment)
- Datenmanagement und „Decision-Support“ (Visualisierung der Bilddaten und deren intelligente Verknüpfung mit Karteninformationen in einem geographischen Informationssystem)

3 Komponenten der Flugplattform

Die wesentlichen Komponenten der Aufnahmeplattform, welche die oben angeführten Systemanforderungen erfüllen sollen, sind in Abbildung 1 dargestellt und umfassen:

- Luftsegment: Die Aufnahmeplattform mit der spezifizierten Sensorik zur Aufnahme und Aufbereitung der gewünschten Bilddaten
- Downlink: Eine Line-of-Sight (LOS) Verbindung für die Übertragung der Bilddaten an eine Bodenstation in Echtzeit
- Bodensegment: Eine Basis-Station für den Empfang der Bilddaten sowie für die Prozessierung und Visualisierung der Bilddaten

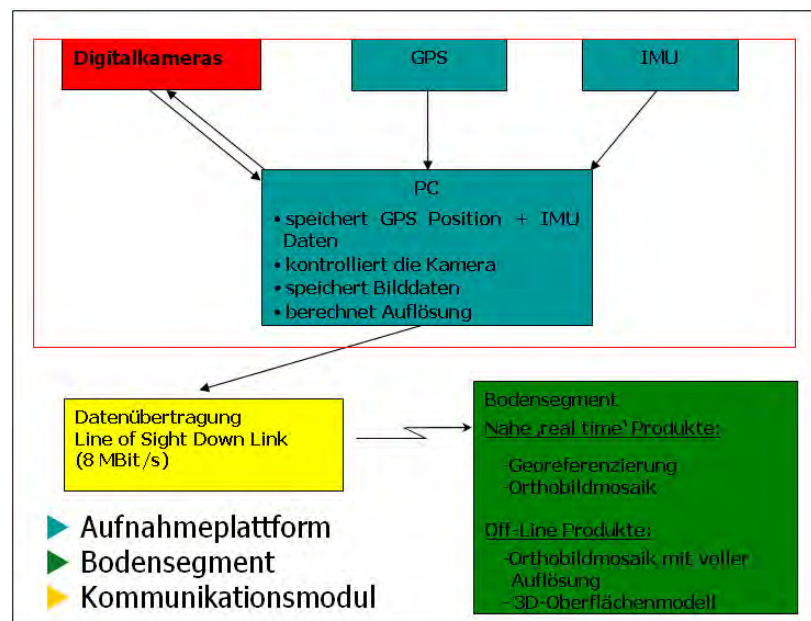


Abb. 1: Komponenten der Aufnahmeplattform

3.1 Sensorik

Für die Datenaufnahme wurde die Zielsetzung verfolgt, ein Aufnahmesystem zu gestalten, welches sehr einfach und flexibel zur schnellen Erfassung von Fernerkundungsdaten eingesetzt werden kann. Durch die Verwendung von Low- bis Medium-Cost-Sensoren sollten dabei die

Kosten für das Gesamtsystem möglichst niedrig gehalten werden, ohne dabei jedoch zu sehr an Qualität zu verlieren. Für die avisierten Einsatzszenarien sollte die Aufnahme von optischen RGB-Bilddaten wie auch von thermalen Bilddaten möglich sein. Letztere sind insbesondere für die Erkennung von Wärme- bzw. Kältestellen geeignet und somit für waldbrand- bzw. hochwasserspezifische Aufnahmesituationen von Vorteil.

Grundsätzlich wurden somit folgende Teilkomponenten für die Aufnahmeplattform vorgesehen:

RGB-Kameras:

- Zur Akquisition qualitativ hochwertiger RGB-Bilddaten wurde eine 39 Megapixel Hasselblad-Kamera (H3DII-39) integriert. Die Kamera bietet eine Auflösung von 7212 bzw. 5412 Pixeln quer bzw. in Flugrichtung. Für die aktuelle Integration wurde das 50-Millimeter-Objektiv ausgewählt, welches eine sehr hohe Bodenauflösung von z.B. 16 cm bei 1000 Meter Flughöhe (Streifenbreite 1000 Meter) bietet. Die Daten dieser Kamera sind auf Grund des Datenvolumens nicht für die echtzeitnahe Datenübertragung und Datenprozessierung geeignet und dienen primär als Backup für Post-Prozessierungs-Szenarien.
- Zur Aufnahme optischer Bilddaten mit reduziertem Datenvolumen wurde eine 8 Megapixel Canon EOS 30D-Kamera vorgesehen. Die Kamera bietet eine Auflösung von 3505 bzw. 2336 Pixeln quer bzw. in Flugrichtung. Für die Kamera wird ein 20-Millimeter-Objektiv verwendet, mit welchem sich bei einer Flughöhe von 1000 Metern ein Bodenauflösung von ca. 32 cm ergibt (Streifenbreite ebenfalls 1000 Meter). Diese Daten sind nach entsprechender Datenkompression für die Online-Datenübertragung und NRT-Datenprozessierung geeignet.

Thermal-Kamera:

Für spezielle Anwendungen wie Waldbrände, Damm-Monitoring, Leitungskontrollen und Überwachungsaufgaben sind Thermalkameras ein idealer Sensor. Temperaturänderungen im Bereich von bis zu 0.09° können dabei gemessen werden. Zur Aufnahme thermaler Bilddaten wurde eine FLIR Photon 640 Thermalkamera (Datenvolumen 0.3 Megapixel) ebenfalls für eine echtzeitnahe Datenübertragung und Prozessierung vorgesehen. Die Kamera bietet eine im Vergleich zu den RGB-Kameras geringe Auflösung von 640 bzw. 512 Pixeln quer bzw. in Flugrichtung. Mit dem verwendeten 50-Millimeter-Objektiv ergibt sich bei einer Flughöhe von 1000 Metern eine Bodenauflösung von knapp 60 cm sowie ein Querabdeckung von etwa 370 Metern. Zur Aufnahme einer den optischen Daten adäquaten Streifenbreite wurde eine Pendelbewegung der Kamera realisiert, welche eine Aufnahme von 5 Bildern quer zur Flugrichtung ermöglicht.

GPS/IMU:

Die zeitgerechte Verfügbarkeit direkt geokodierter Luftbilder mit einer zufriedenstellenden geometrischen Genauigkeit fordert eine entsprechend genaue Erfassung der Positions- und Lagedaten der Plattform zeitgleich mit der Bildaufnahme. Hierfür wurde eine Kombination aus einem GNSS/IMS (Novatel Propak-V3 gekoppelt mit iMAR FSAS) gewählt. Dadurch wird eine echtzeitnahe Ortho-Rektifizierung der Bilddaten ermöglicht. In Kapitel 5 wird eine kurze Diskussion der mit diesem Instrumenten-Setup erreichbaren Geolokalisierungs-Genauigkeiten gegeben.

Plattform-Steuerung und Datenaufbereitung

Die fluggestützte Plattform umfasst ebenfalls einen ausreichend leistungsfähigen PC, auf welchem die folgenden Steuerungs- und Datenaufbereitungsaufgaben erledigt werden:

- Ansteuerung der unterschiedlichen Sensoren (GPS, IMU, Kameras) an Bord der Plattform, Auslösen der Kameras und Datenaufzeichnung
- Datenkompression
- Aufbereitung der Daten, d.h. Prozessierung der GPS/IMU-Aufzeichnungen und Zusammenführen dieser Daten mit dem zugehörigen Bild für den Downlink zur Bodenstation.

3.2 Plattform-Integration

Die für die Plattform vorgesehenen Instrumente wurden in den für die Diamond DA42 MPP vorgesehenen Bellypod integriert. Hierfür wurde die gesamte Sensorik auf eine ausreichend kleine Platte, deren Größe in etwa einem A4-Format entspricht, fix montiert und in dieser Form in den Bellypod eingesetzt. In der Abb. 2 sind das entsprechende Design, die Kameras nach Zusammenbau auf der vorgesehenen Platte und nach Integration in den Bellypod sowie eine DA42 MPP mit diesem Pod im Flugbetrieb dargestellt.



Abb. 2: Design der Aufnahmeplattform (links oben), Integration der Kameras in den BellyPod der DA42 MPP (rechts oben, links unten), sowie integrierte Sensorik im Flugbetrieb (rechts unten).

3.3 Datenübertragung

Der Datentransfer ist für die Realisierung der angestrebten „Near Real-Time“ Lösung ein wesentlicher Aspekt. Für die Bearbeitung kleinräumiger Krisengebiete steht ein „wireless“ Datentransfer unter Verwendung einer LOS-Technologie mit einer Übertragungsrate von bis zu 8 Mbit/s zur Verfügung. Die LOS-Übertragung ermöglicht eine große Datentransferrate bei gleichzeitig geringeren Kosten. Da eine „Bodenstation“ („Communication-Van“) Sichtkontakt zur Flugplattform gewährleisten muss, was bei großen oder gebirgigen Einsatzgebieten schwierig ist, sind Datenpuffer-Mechanismen in der Sensorplattform realisiert, um eine entsprechende Datensicherheit zu bieten.

3.4 Bodensegment und Geokodierungssoftware

Folgende vordergründige Prozessierungsoptionen wurden im Zusammenhang mit Naturkatastrophenszenarien am Bodensegment implementiert:

- die Echtzeitgeokodierung der Bilddaten, welche innerhalb von weniger als einer Minute nach Datenaufnahme ein Orthobild zur Lageerfassung liefert. Diese wird direkt mit den aufgezeichneten Positions- und Lageparametern der Plattform sowie den Kamera- und Plattform-Kalibrationsparametern (siehe Kapitel 4) durchgeführt.
- die Mosaikierung einer Vielzahl von Orthobildern, um für ausgedehnte Bereiche mittels eines flächendeckenden mosaikierten Datensatzes einen besseren globalen Überblick sowie erleichtertes Datenhandling zu schaffen.

Grundlage für diese Entwicklungen ist das am Institut für Digitale Bildverarbeitung über die letzten beiden Jahrzehnte entwickelte Softwarepaket RSG (Remote Sensing Software Package Graz). Dieses ist für die Verarbeitung von Fernerkundungsbilddaten aller Art konzipiert und deckt auch die grundlegenden Anforderungen photogrammetrischer Prozessierungslinien ab. RSG ist modular konzipiert, wodurch eine problem- und kundenspezifische Generierung und Implementierung von dedizierten Prozessierungsschienen gefördert wird.

4 Kalibrierung

Die Bestimmung von Brennweite, Bildhauptpunkt und Objektivverzeichnung der Kameras wurde mittels einer Laborkalibrierung durchgeführt. Hierzu wurde eine ausreichende Anzahl von Bilddaten im Kalibrations-Labor der Fa. Microsoft/Vexcel aufgenommen. Detail-Ausschnitte exemplarischer Laboraufnahmen, welche die unterschiedliche Bildpunkt-Auflösung an Hand von ausgewählten Labor-Targets aufzeigen, sind in Abb. 3 dargestellt. Aus dem dichten Festpunktfeld des Labors ergeben sich hochredundante Passpunktdaten für die Kamera-Kalibrierung.

Neben der Kamera-Kalibrierung ist auch eine Kalibrierung der Plattform notwendig, um die Lage und Ausrichtung der Kameras relativ zu den GPS- und IMU-Aufzeichnungen zu bestimmen (Boresight-Kalibrierung). Hierzu wurde im Südwesten von Graz im Bereich des Einkaufszentrums „Seiersberg“ ein Festpunktfeld angelegt, über welchem nach Integration der Plattform entsprechende Bilddaten aufgenommen wurden. Die benötigten Kalibrierungsparameter wurden in einem adaptierten Blockausgleichsverfahren aus ebenfalls hochredundanten Bild- und Passpunktdaten ermittelt.

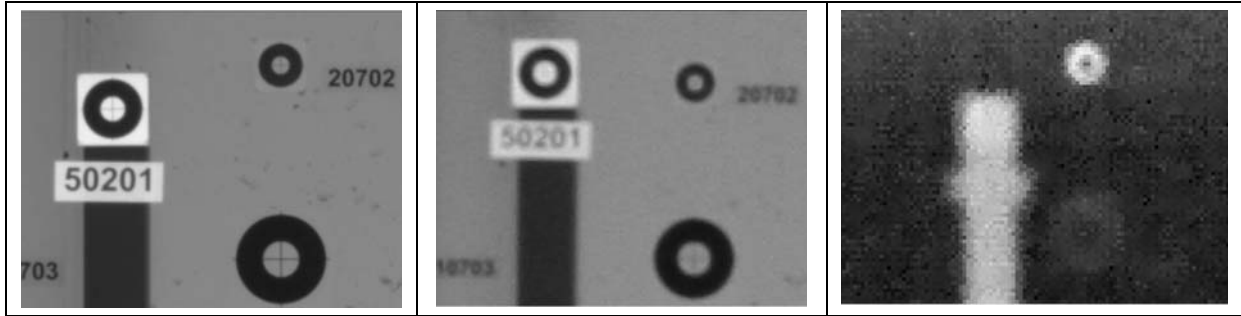


Abb. 3: Detail-Ausschnitte der Laboraufnahmen der Hasselblad- (links), Canon- (Mitte) und Photon-Kamera (rechts).

5 Genauigkeiten der Geokodierung

Es sollte vorausgeschickt werden, dass im Zusammenhang mit Naturgefahrenszenarien die absolute Lagegenauigkeit im Vergleich zur zeitlichen Verfügbarkeit entzerrter Bilddaten oftmals eine untergeordnete Rolle spielt. Ungenauigkeiten im Bereich mehrerer Meter können grundsätzlich durchaus akzeptabel sein. Beispielsweise wurde in den bisherigen Befliegungen kein Korrektursignal (z.B. Omnistar high precision service) für die GPS-Messungen verwendet.

Unter den gegebenen Umständen folgen für das aktuelle GPS/IMU-Setup Genauigkeiten von ± 1.2 Metern in Lage und ± 1.8 Metern in Höhe für die Kameraposition (GPS), sowie von etwa ± 0.02 bis 0.04 Grad für die Rotationswinkel (IMU). In einer Arbeit von Gutjahr et al. (2010) wurde das daraus folgende Genauigkeitspotential näher untersucht. Aus einer Fehlerfortpflanzungs-Analyse wurden prognostizierte Punktlagefehler im Bereich von 2 bis 4 Metern für das aktuelle Setup ausgewiesen. Diese Genauigkeits-Abschätzungen werden durch die Beispiele direkt entzerrter Bilddaten in Abb. 4 bestätigt. Diese zeigt jeweils einen „Zuschnitt“ eines Hasselblad- bzw. Canon-Ortho-Bildes mit einem Referenz-Orthobild. Die absoluten Lagedifferenzen bewegen sich im Bereich weniger Meter. Weiterführende Berechnungen haben ergeben, dass durch die Verwendung des Omnistar-Korrektursignal die Positionsdatenerfassung ca. um einen Faktor 10 verbessert werden kann. Dadurch sind Genauigkeiten im Sub-Meter Bereich erzielbar und die Nutzeranforderungen erfüllt.



Abb. 4: Absolute Lage-Genauigkeit eines Hasselblad- (links oben) bzw. eines Canon-Orthobildes (rechts oben) im Vergleich zu einem Ortho-Foto (links bzw. rechts unten; Auflösung 1 Meter).

6 Bildbeispiele

Zur Verdeutlichung des Informationsgehaltes der Aufnahmesensorik werden in diesem Kapitel anhand von Bildbeispielen verschiedene Szenarien des Katastrophenschutzes gezeigt.

Thermaldaten:

Die Detektion von Schwel feuern im Wald sowie von durchnässten Regionen auf Hochwasserschutzdämmen war Gegenstand von Testszenarien, die Auskunft über die Qualität der Thermalbilder liefern sollten. Hierfür wurden Bilddaten in ca. 300m über Grund von einem Hubschrauber aus aufgenommen.

Für das Szenario „Detektion von Schwel feuern“ wurde im Bereich eines Latschenfeldes ein Schwelbrand simuliert, indem ein Blech mit einer Fläche von 1 m² auf 60° erhitzt und unter dichte Latschenvegetation gelegt wurde. Das Thermalbild in Abb. 5 (linkes Bild) zeigt, dass die erhitzte Fläche selbst unter sehr dichter Vegetation gut erkennbar ist, sodass davon ausgegangen werden kann, dass die Qualität der Thermaldaten eine frühzeitige Detektion von Schwel feuern erlaubt. Ein mögliches Anwendungsgebiet ist beispielsweise die Qualitätskontrolle nach Löscharbeiten bei Waldbränden.

Für das Szenario „Hochwasser“ wurde untersucht, inwieweit Vernässungen an Wasserschutzdämmen in den Thermaldaten erkennbar sind. Zu diesem Zweck wurden von der Fa. Austria Hydropower einige bereits bekannte Durchnässungsstellen an Schutzdämmen an der Mur identifiziert. Abb. 5 (rechtes Bild) zeigt solche Stellen in einem Thermalbild im Bereich der Mur in der Südsteiermark. Diese befindet sich in dieser Abbildung am linken Bildrand und zeigt sich in schwarz. Zwischen der Mur und einer in hellen (gelben) Farbtönen erscheinenden Straße liegt der Damm, welcher sich grundsätzlich in lila Farbtönen zeigt. Die Durchnässungsstelle ist in den dunkelblauen Farbtönen links der Strasse zu sehen (siehe markierte Stelle in der Abb. 5, rechts). Rechts der Strasse befinden sich bewaldete Flächen, die im Thermalbild in blauen Farben (Bäume) sowie schwarzen Farben (Schatten zwischen den Bäumen) erscheinen.

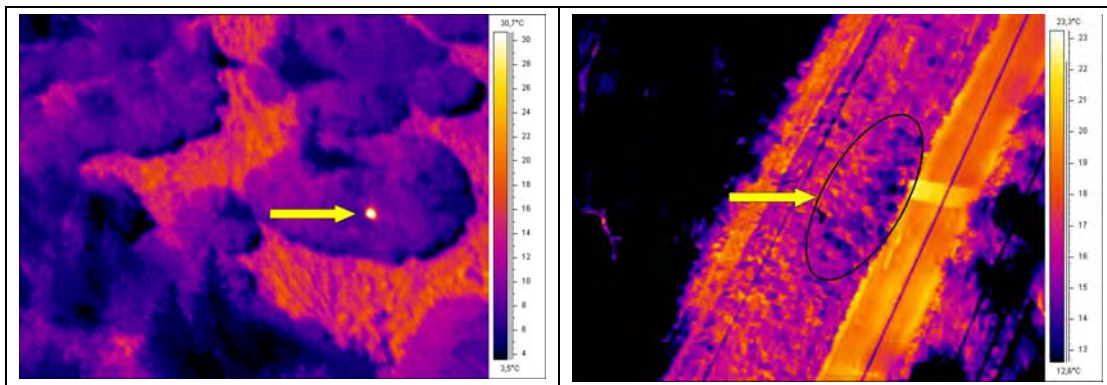


Abb. 5: Latschenfeld mit Simulation eines ‚Hot Spot‘ (links) bzw. Durchnässungen im Dammbereich (rechts)

RGB - Daten

Das Potential der RGB - Bilddaten wird im Folgenden anhand der Szenarien „Hochwasser“ und „Murenabgänge“ veranschaulicht.

Für das Szenario Hochwasser ist unter anderem die Kenntnis über den Verlauf der Wasseranschlagslinien sowohl für den Katastrophenschutz als auch für die hydrologische Modellierung ein wichtiger Parameter, der in den meisten Fällen mit hohem Kostenaufwand terrestrisch vermessen wird. Die Abb. 6 (linkes Bild) zeigt, dass dieser Parameter sehr gut in aktuellen Canon-Bildern, die aus einer Höhe von ca. 1000 Metern über Grund aufgenommen wurden, erkannt werden kann. Die Aufnahmeplattform kann somit eine Alternative zu terrestrischen Erfassungsmethoden darstellen, wenn die Daten kurz nach einem Hochwasser aufgenommen werden.

Ein weiteres Katastrophenszenario, bei dem Informationen über die Auswirkungen in kürzester Zeit zur Verfügung stehen müssen, sind Murenabgänge oder Hangrutschungen. Dass auch Ereignisse dieser Art sehr gut in den RGB-Daten erkennbar sind, zeigt die Hasselblad-Aufnahme in Abb. 6 (rechtes Bild), die ebenfalls aus einer Höhe von ca. 1000 Metern über Grund aufgenommen wurde. Die Aufnahme zeigt eine Mure und ein von dieser Mure erfasstes Gebäude.



Abb. 6: Wasseranschlagslinie nach einem Hochwasser (links), Mure mit erfasstem Gebäude (rechts)

7 Ausblick

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass mit den ausgewählten Komponenten (Sensorik, Navigation und Kommunikation) die Anforderungen, die vom Katastrophenschutz an ein fernerkundungsgestütztes Aufnahmesystem gestellt werden, grundsätzlich erfüllt werden können. Durch an die Komponenten angepasste Algorithmen der geometrischen Bildverarbeitung und direkter Geokodierungsverfahren können Lagegenauigkeiten von weniger als einem Meter erzielt werden. Weiterhin hat eine Analyse gezeigt, dass der Informationsgehalt der Bilddaten für die wichtigsten Szenarien des Katastrophenschutzes ausreicht. Dies gilt sowohl für die RGB-Daten als auch für Daten, die von der Thermalkamera aufgenommen wurden. Schwächen des Systems liegen einerseits im Datenformat der Hasselblad-Bilder, die keine On-Board Datenkompression als Voraussetzung für eine Echtzeitprozessierung erlauben.

Andererseits ist die Auflösung der Canon-Kamera bei größeren Überfliegungshöhen nicht für alle Anwendungen ausreichend. Entwicklungen, die zurzeit und in naher Zukunft zur Optimierung der Aufnahmeplattform vorgenommen werden, sind:

- Austausch der Canon- und Hasselblad-Kameras durch eine Industriekamera (19 Megapixel) zur Steigerung der Robustheit und der Echtzeitfähigkeit sowie zur Verbesserung der Aufnahmesteuerung
- Verwendung der Satellitenkommunikation: Steigerung der Flexibilität durch die große Ausleuchtzone des Satelliten und daraus resultierend ein größerer Aktionsradius der Flugplattform; Verwendung von Frequenzen im Q/V-Band und damit Schaffung der Möglichkeit, kleinere Antennen mit größerer Datenrate zu verwenden
- Entwicklung von Algorithmen (Object Detection und Change Detection) zur automatischen Erkennung von relevanten Parametern (z.B.: Wasseranschlagslinie, Schäden an Infrastrukturen)
- Aufbau eines „Decision Support Systems“ zur optimalen Integration, Visualisierung und Weiterverarbeitung der Bilddaten
- Optimierung der Verfahren durch die Verknüpfung luft- und satellitengestützter Fernerkundungssysteme (Flugzeug: kleinere Flächenabdeckung und schnellere Datenverfügbarkeit; Satellit: große Flächenabdeckung mit schlechterer zeitlicher Datenverfügbarkeit)

8 Literaturverzeichnis

- H. RAGGAM, R. WACK, AND K. GUTJAHR (2006): Assessment of the Impact of Floods using Image Data acquired from a Helicopter. 26th Earsel Symposium, “New Developments and Challenges in Remote Sensing”, Warsaw, May 29th – June 1st, 2006.
- H. RAGGAM, R. WACK, AND K. GUTJAHR (2007): Mapping Capability of a Low-Cost Aerial Data Acquisition Platform – First Results. ISPRS-Workshop, Commission VI, WG VI/4, “High Resolution Earth Imaging for Geospatial Information”, Hannover, May 29th – June 1st, 2007.
- A. ALMER, T. SCHNABEL, H. RAGGAM, K. GUTJAHR, AND M. VAN DAHL (2007): Rapid Information Flow within a Crisis Management System. 27th Earsel Symposium, “Geoinformation in Europe”, Bolzano, June 4th – 7th, 2007.
- K. GUTJAHR, P. HAFNER, M. OFNER, K. LÄNGAUER, M. WIESER, AND N. KÜHTREIBER (2010): Performance of GNSS/IMS Integration Methods in Context of a Near Real-Time Airborne Mapping Platform. EuroCOW 2010: the Calibration and Orientation Workshop, Castelldefels, February 10th – 12th, 2010, ISPRS Commission III, WG III/1.

UltraCam_L: Sensorkonzept und neues Stitchingverfahren

RICHARD LADSTÄDTER¹ & MICHAEL GRUBER²

Dieser Beitrag beschreibt das Sensor-Konzept der neuen Medium-Format Luftbildkamera UltraCam_L von Vexcel Imaging / Microsoft Photogrammetry, die seit 2009 am Markt verfügbar ist. Das Bildformat (65Mpixel für UltraCam_L bzw. 92MPixel für UltraCam_{Lp}) erlaubt eine kompakte und leichte Bauweise und unterstützt dadurch die Erschließung neuer Anwendungsgebiete. Um die gewohnte hohe geometrische Bildqualität auch für diese Kameraserie gewährleisten zu können wurden sowohl das Verfahren bei der geometrischen Kalibrierung als auch das Post-Processing (Stitching) an diese Kamera angepasst. Neben einer Beschreibung des neuen Stitching-Konzepts wird auch ein Ergebnis aus der Genauigkeitsanalyse einiger Testflüge präsentiert. Das unter dem Titel „Monolithic Stitching“ von Vexcel Imaging entwickelte Verfahren der Bildprozessierung wird bereits für alle Kameraprodukte von Vexcel Imaging eingesetzt.

1 Einleitung

Vexcel Imaging GmbH hat im Rahmen der ISPRS 2008 seine erste Mittelformatkamera UltraCam_L vorgestellt (siehe auch GRUBER & WIECHERT, 2009). Die Kamera verfügt über ein Bildformat von 65 Megapixel und fünf spektrale Kanäle (PAN, RGB und NIR). Das Gesamtkonzept folgt dem einer vollwertigen photogrammetrischen Luftbildkamera. Kalibrierung, Speicherplatzangebot, Handhabung der Kamera und Einsatzbereitschaft in einer branchenüblichen Plattform sind vorhanden.



Abb. 1: UCL Sensoreinheit mit integrierter Computer/Speichereinheit

¹ Dr. Richard Ladstädter, Vexcel Imaging / Microsoft Photogrammetry, Anzengrubergasse 8/4, 8010 Graz; E-Mail: rladstae@microsoft.com

² Dr. Michael Gruber, Vexcel Imaging / Microsoft Photogrammetry, Anzengrubergasse 8/4, 8010 Graz; E-Mail: mgruber@microsoft.com

1.1 Sensorkonzept

Die UltraCamL besitzt insgesamt vier Kameraköpfe, die jeweils mit einem Einzel-Sensor bestückt sind:

- Konus 0 und 1: hochauflösender PAN-Kanal, Sensoren A und B
- Konus 2: RGB-Kanal
- Konus 3: NIR-Kanal

Die beiden PAN-Sensoren sind im Konus so angeordnet, dass sich bei der syntopischen Aufnahme eine Überlappung längs der Flugrichtung ergibt. Die Sensoren des RGB- bzw. NIR-Kanals decken jeweils den gesamten Footprint ab. Das Verhältnis zwischen PAN und den multispektralen Kanälen beträgt 1:2, die Brennweite beträgt 70mm (PAN) bzw. 33mm (RGB und NIR).

1.2 Stitchingverfahren

Wie beim großformatigen Kameramodell UltraCam_{xp} (UCXp) wird auch bei der UltraCam_L aus den Bildern mehrerer PAN-Sensoren ein hochauflösendes virtuelles PAN-Bild zusammengesetzt. Dieser als „Stitching“ bezeichnete Prozess wird im Zuge des Post-Processings der rohen Bilddaten (Level 00) auf Level02 (geometrisch korrektes Bild) durchgeführt.

Im Vergleich zur UltraCam_{xp} bestehen jedoch folgende Unterschiede:

- Zwei gleichwertige PAN-Sensoren (Neun Sensoren bei der UCXp)
- Ein einzelner PAN-Overlap (12 Overlaps bei der UCXp)
- TDM-Schätzung wird durch eine direkte Temperaturmessung ersetzt

Sowohl das Stitchingverfahren als auch die geometrische Kalibrierung wurden daher speziell für die UltraCamL adaptiert (siehe LADSTÄDTER et al., 2010a/b), wobei die gleiche geometrische Qualität wie bei der UCXp erreicht werden kann.

2 Geometrische Kalibrierung und Post-Processing

2.1 Plattformkalibrierung der UCL

Durch die Plattformkalibrierung wird die Abweichung (Nicht-Parallelität) der Hauptstrahlen aller Kamera-Köpfe von der durch einen PAN-Konus (PAN-A) definierten Blickrichtung erfasst. Die Elemente der relativen Orientierung der Kamera-Köpfe untereinander werden als stabil vorausgesetzt und aus den Aufnahmen der geometrischen Kalibrierung mit Hilfe des Bündelausgleichsprogramms BINGO (KRUCK, 1984) abgeleitet (zusätzlich zu den geometrischen Korrekturparametern für die Bildverzerrung). Aufgrund des syntopischen Aufnahmeprinzips ist die Voraussetzung einer Epipolar-Transformation (identisches Projektionszentrum) für die Bilder einer Flugmission stets erfüllt (siehe Abb. 1).

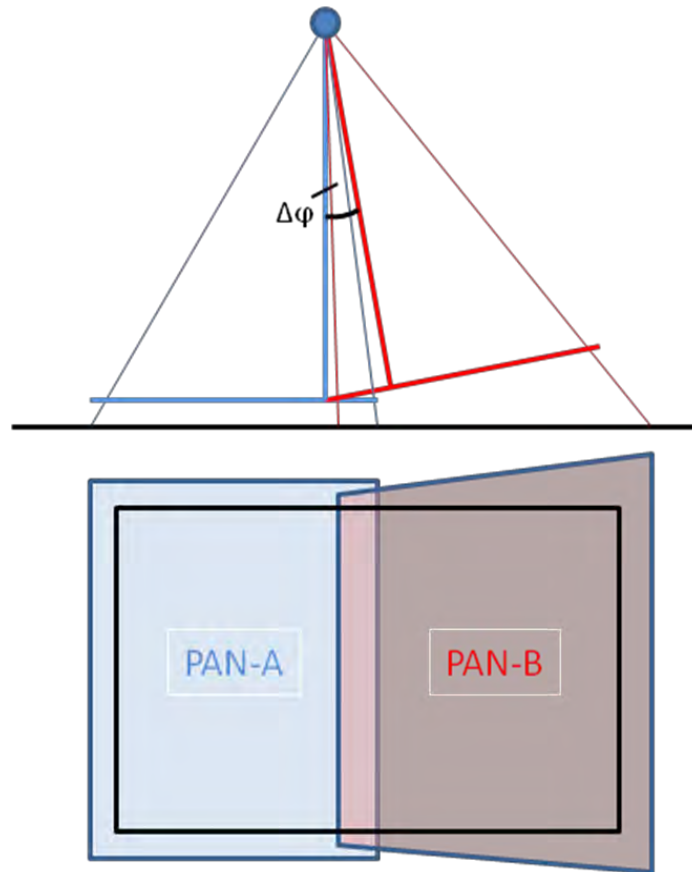


Abb.1: Entzerrung der Teilbilder der beiden PAN-Sensoren in eine gemeinsame Bildebene durch eine Epipolartransformation. Die Entzerrung der um den Winkel $\Delta\varphi$ gekippten Kamera ist streng möglich, da die Projektionszentren bei der syntopischen Aufnahme zusammenfallen.

Die so für einen Konus (z.B. PAN-B) bestimmten Winkeloffsets Δ_{ω} , Δ_{ϕ} und Δ_{κ} definieren eine räumliche Rotationsmatrix, aus der eine Epipolar-Transformation zur Entzerrung des von dieser Kamera aufgenommenen Bildes abgeleitet werden kann. Die Epipolar-Transformation entspricht also einer geometrischen Entzerrung eines Sensorbildes durch Projektion in die virtuelle Bildebene. Die Transformationsparameter werden für alle vier Sensoren als Elemente einer dreidimensionalen, homogenen Transformation (8 Parameter) mit in den Kalibrierdaten gespeichert (d.h. für den PAN-A Sensor entspricht das der Einheits-Transformation).

Die Größenordnung der bei der Plattformkalibrierung festgestellten Winkel-Offsets zwischen den beiden panchromatischen Köpfen wurde anhand einer Stichprobe von sechs Kameras mit ca. 0.1 gon festgestellt. Im Vergleich zu den aus der Flugbewegung zwischen den Auslösezeitpunkten ($\Delta t \sim 1\text{ms}$) der syntopischen Aufnahme maximal zu erwartenden Winkel-Offsets ist dieser Wert ca. um den Faktor zehn größer. Im Unterschied zur Flugbewegung können die durch die Einbau-Toleranzen verursachten Winkel-Offsets jedoch als zeitlich stabil angesehen werden.

Durch eine geometrische Vorentzerrung mit Hilfe der oben beschriebenen Epipolar-Transformation können daher die durch die Abweichung von der gemeinsamen (virtuellen) Bildebene verursachten systematischen Bildfehler eliminiert werden. Die Ergebnisse der

Auswertung diverser Testprojekte, bei denen die Vor-Entzerrung wahlweise aktiviert und deaktiviert wurde (siehe Abschnitt 3) bestätigen die Wirksamkeit dieser Methode.

2.2 Erfassung der Kalibriertemperatur

Das für die Kompensation der temperaturabhängigen Sensordrift eingesetzte Korrekturmodell TDM (siehe LADSTÄDTER, 2007) beruht auf der Bestimmung der Temperaturdifferenz der Kamera während der geometrischen Kalibrierung bzw. während der Flugmission. Beim Kameramodell UCL wird (im Gegensatz zur UCXp) keine aus den Stitching-Resultaten abgeleitete Temperaturdifferenz verwendet, sondern der direkt aus den gemessenen Sensor-Temperaturen abgeleitete Wert.

Zu diesem Zweck werden Aufzeichnungen der Sensor-Temperaturen bei der geometrischen Kalibrierung durchgeführt und ein repräsentativen Mittelwert für alle Sensoren in den Kalibrierdaten gespeichert. Der Vergleich der während einer Flugmission ebenfalls mit den Bilddaten gespeicherten Sensor-Temperaturen erlaubt dann die Berechnung der Temperaturdifferenz aus diesen Messdaten. Die Übereinstimmung zwischen geschätzter und direkt gemessener Temperaturdifferenz ist sehr gut (ca. $\pm 2^\circ\text{C}$), wie aus UCXp Testflügen leicht nachgewiesen werden kann (siehe Abbildung 2).

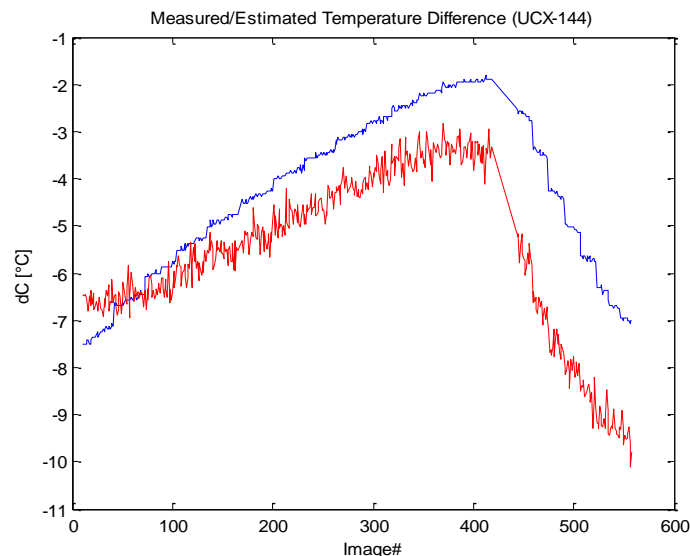


Abb. 2: Vergleich der berechneten Temperaturdifferenz dC (rote Linie) und der gemessenen Temperaturdifferenz (blaue Linie) bei einem UltraCamX Testflug.

2.3 Geometrisches Post-Processing

Im Folgenden werden die einzelnen Schritte, die im geometrischen Post-Processing durchlaufen werden, nochmals angeführt.

2.3.1 Temperatur-Korrektur

Im ersten Schritt werden die aus der Kalibrierung bekannten Sensorpositionen aufgrund der gemessenen Temperaturdifferenz mit Hilfe des temperaturabhängigen Korrekturmodells (TMD)

korrigiert. Dadurch wird im Wesentlichen eine Verschiebung des Hauptpunktes im virtuellen Gesamtbild verhindert.

2.3.2 Geometrische Vorentzerrung

Vor dem eigentlichen Stitching-Prozess werden die Sensor-Bilder aufgrund der durch die Plattform-Kalibrierung festgestellten Winkel-Offsets mit Hilfe einer Epipolar-Transformation vorkorrigiert. Diese Vorentzerrung ist also unabhängig vom Bildinhalt und anderen Projektparametern.

2.3.3 Monolithisches Stitchingverfahren

Der eigentliche Stitching-Prozess dient schließlich zur spannungsfreien Transformation der Teilbilder in die gemeinsame (virtuelle) Bildebene. Die Weiterentwicklung des Standard-Stitching-Verfahrens hat zum „monolithischen Stitching“ geführt (LADSTÄDTER et al., 2010a/b), durch das systematische Restfehler im Bild noch besser unterdrückt werden können.

Die Grundidee des monolithischen Stitchingverfahrens ist es, nicht nur Verknüpfungspunkte im schmalen Überlappungsbereich zwischen den PAN-Sensoren zu messen, sondern auch flächig verteilte Punkte zwischen dem PAN- und dem Grünkanal (siehe Abb. 3).

Durch die strenge ausgleichstechnische Verarbeitung aller dieser hoch-redundanten Beobachtungen gelingt es, die hochauflösenden Bilder der PAN-Sensoren noch besser zu dem virtuellen Gesamtbild zu verschmelzen. Das Endergebnis entspricht daher geometrisch einem mit einem einzelnen (monolithischen) PAN-Sensor aufgenommenen Bild. Durch aufwendige Mechanismen zur Ausreißer-Detektion und die Adaption der verwendeten Parameter an die Qualität der vorhandenen Verknüpfungspunkte (speziell die Verteilung im Bild) wird eine äußerst große Robustheit des Sticking-Algorithmus erreicht.

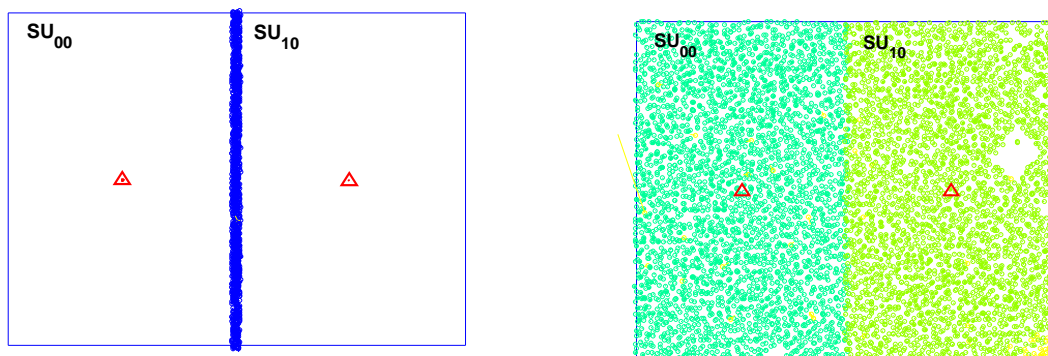


Abb.3: Verknüpfungspunkte im PAN-Overlap (links) bzw. zwischen PAN- und Grünkanal (rechts).

3 Testprojekte

Mehrere UltraCam_L Testflüge über dem Testfeld Gleisdorf (siehe Abb. 4) wurden zur Beurteilung der geometrischen Qualität der Kamera und Verifikation der Kalibrier- und

Stitchingverfahren analysiert. Die Analyse der systematischen Bildfehler mit BINGO (siehe Abb. 5) zeigt deutlich den Effekt der geometrischen Vor-Entzerrung und das durch das monolithische Stitching erreichbare hohe Qualitätsniveau (max. Bildresiduen unter 1µm).

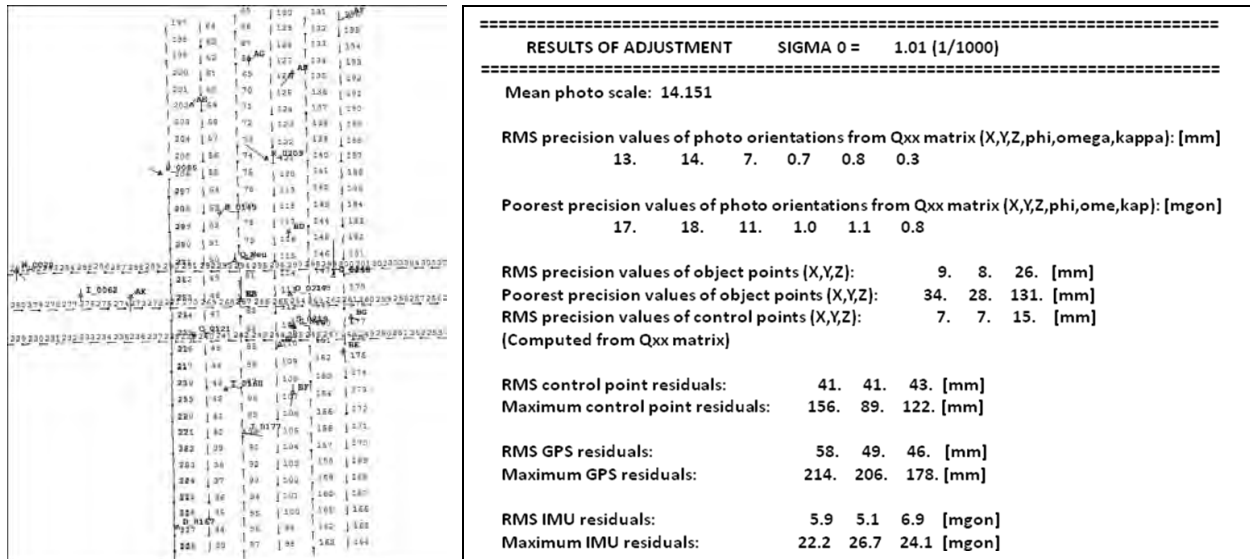


Abb. 4: Testprojekt Gleisdorf (GSD 10cm). Block-Layout und BINGO Rechenergebnisse (rechts).

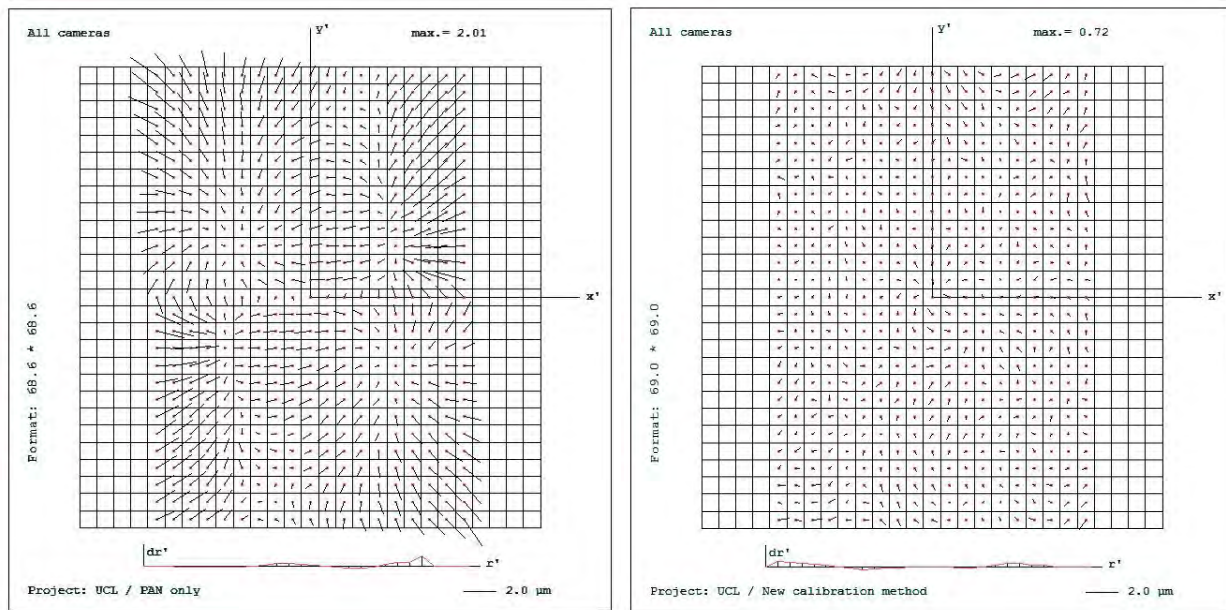


Abb. 5: Analyse der Bildfehler bei der AeroTriangulation mit BINGO. Links sind deutliche systematische Restfehler erkennbar, die auf die nicht einheitliche Bildebene der PAN-Sensoren A und B zurückzuführen ist (Vorentzerrung und monolithisches Stitching wurden deaktiviert). Rechts das Ergebnis bei standardmäßiger Prozessierung (frei von systematischen Restfehlern).

4 Literaturverzeichnis

- GRUBER, M. & WIECHERT, A., 2009: New digital aerial cameras by Vexcel Imaging / Microsoft, Proceedings of the Remote Sensing and Photogrammetry Society (RSPSoc) Annual Conference 2009, 8-11. 9. 2009, Leicester, UK.
- KRUCK, E., 1984: BINGO: Ein Bündelprogramm zur Simultanausgleichung für Ingenieur Anwendungen- Möglichkeiten und praktische Ergebnisse, International Archive for Photogrammetry and Remote Sensing, Rio de Janeiro 1984.
- LADSTÄDTER, R. et al., 2010a: Calibrating the UltraCam aerial camera systems, an update. International Calibration and Orientation Workshop EuroCOW 2010 Proceedings, January 10.-12., 2010, Castelldefels, Spain.
- LADSTÄDTER, R. et al., 2010b: Monolithic Stitching: One sensor geometry for multiple sensor cameras. ASPRS annual conference 2010 proceedings.
- LADSTÄDTER R., 2007: *Softwaregestützte Kompensation temperaturabhängiger Bild-Deformationen für die Vexcel UltraCam*, Vorträge Dreiländertagung SGPBF, DGPF und OVG, Volume 16, p. 609-616, Basel 2007.

The *Quattro DigiCAM* – IGI's Versatile

Aerial Camera System for Various Aerial Imaging Tasks

JENS KREMER¹

Abstract: The efficient capturing of nadir aerial imagery and the collection of oblique aerial images require different aerial cameras.

Because of its modular design, the Quattro DigiCAM system can be configured in different ways to equally fulfill both tasks.

The Quattro DigiCAM consists of four camera heads. Each camera head is a complete aerial camera system. Depending on the mechanical layout and on the software configuration, the Quattro DigiCAM can be used to create four near-nadir images with defined overlap or to create four oblique images with 45° oblique angle. Using the Quattro DigiCAM software package, the four near nadir images can be stitched to one homogenous image. This virtual image can be used as the image from a single head camera. It is shown with an example project, that images with a remaining systematic image distortion of 1/5 of a pixel are created.

Zusammenfassung: Zur effizienten Erfassung von Senkrechtluftbildern und Schrägluftbildern werden unterschiedliche Luftbildkameras verwendet.

Durch den modularen Aufbau der Quattro DigiCAM, kann diese Kamera so konfiguriert werden, dass sie beide Aufgaben voll erfüllen kann.

Die Quattro DigiCAM besteht aus vier DigiCAM Modulen, von denen jedes einzelne als komplettes digitales Luftbildkamerasystem nutzbar ist. Je nach mechanischem Aufbau und Softwarekonfiguration kann die Quattro DigiCAM zur Aufnahme von vier quasi-senkrecht Bildern mit definiertem Überlapp, oder zur Aufnahme von vier 45° Schrägluftbildern in die vier verschiedenen Richtungen genutzt werden. Die vier Bilder der senkrecht Konfiguration können mit dem mitgelieferten Programm zu einem homogenen Bild zusammengerechnet werden. Dieses virtuelle Bild kann wie das Bild einer Einzelkamera weiterverwendet werden. Es wird an einem Beispielprojekt gezeigt, dass systematische Restverzeichnungen von 1/5 Pixel im virtuellen Bild erreicht werden.

1 Introduction

The efficient capturing of nadir aerial imagery and the collection of oblique aerial images require a different configuration of the used aerial camera. The layout of the current cameras makes it difficult to serve both tasks with only one system.

Because of its modular design, the *Quattro DigiCAM* system can be configured in different ways to equally fulfill both tasks. The camera consists of four camera heads that can be mounted in different configurations.

1) Jens Kremer, Ingenieur-Gesellschaft für Interfaces mbH, Langenauer Str. 46; 57223 Kreuztal; E-Mail: j.kremer@igi-systems.com

2 System Description

The modular *DigiCAM* aerial camera system consists of one or more camera modules. Each camera module is a fully equipped camera and can be operated as a single unit. Depending on the requirements of the aerial survey mission, single modules can be bundled to fulfill different tasks. The modular concept of sensor management and data storage allow an operation of the bundled multi camera system as one camera with one single Graphical User Interface. If the camera configuration is changed, the modification of the mechanical configuration is reproduced by the configuration of the Graphical User Interface (Figure 3).

The Sensor Management Unit (SMU) that controls one *DigiCAM* module can be configured to control other sensors, like the IGI *DigiTHERM* thermal aerial camera. In this way, the capability to integrate multi sensor systems is not limited to the bundling of *DigiCAM* cameras. Multi sensor systems with sensors of different kind can be operated as one integrated system [KREMER, J., 2009].

2.1 Single *DigiCAM*

A single *DigiCAM* module is a digital CCD based frame camera with central shutter. It can be equipped with a range of different lenses with focal length between 28 and 300mm. Currently, the *DigiCAM* series provides sensors with 50 and 60 Mpixel.



Figure 1: *DigiCAM* with *DigiControl* SMU (Sensor Management Unit), Storage Unit and Touch Screen Display.

The camera modules are connected to a Sensor Management Unit (SMU) that controls the camera, provides the user interface and stores the raw image data. The storage unit of one SMU can save about 2600 images in 16 bit resolution (for the 60Mpixel CCD). To allow the collection of an unlimited number of images in one project, the storage units can be exchanged during the flight mission. The minimum image repetition time is 1.6 seconds.

2.2 Multiple *DigiCAMs*

The bundling of single cameras to multiple camera systems can be reasonable for different applications [cf. KREMER, J. & CRAMER, M., 2008]:

- Two or more cameras can be mounted to create oblique images in different viewing directions. The combination of oblique with nadir pointing cameras is possible as well.
- Four cameras can be mounted together to cover a large footprint [cf. CRAMER, M. ET. AL., 2009]. In this case the triggering of the camera modules is synchronized. With maximum exposure time differences of about 10 μ s, the resulting images can be stitched to large format images.
- Two cameras that are mounted to point to the same direction can be triggered to do alternating images to double the possible forward overlap at a given flying speed.

Each Multi *DigiCAM* system is operated with a single Graphical User Interface on a touch screen monitor. The operator can check quick-views and exposure histograms of the actually taken



Figure 2: Bundle of four Sensor Management Units (SMU) and touch screen user interface to control a *Quattro DigiCAM*.

photos in real time and change all necessary settings of the different cameras. The user interface provides control views for the full Multi *DigiCAM* that give information about the status of the system during normal operation. If the attention of the operator should be drawn to the behavior of one of the sensor modules, the display shows a warning message and the operator can switch to control screens of the single sensors. The necessary settings can be made either for the single modules or for all

modules simultaneously. In case of more complex sensor configurations, the sensors which should have same settings can be combined to groups and modified together.

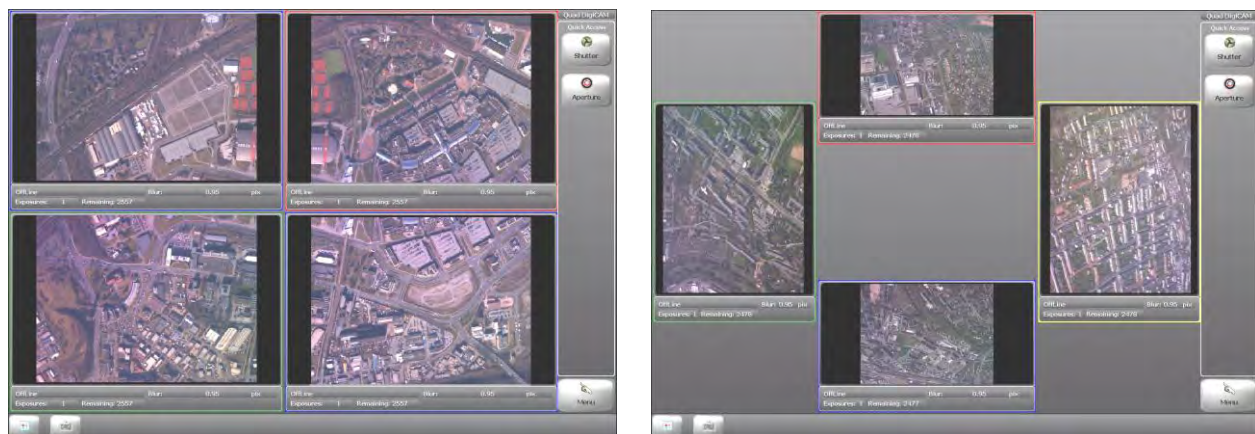


Figure 3: Left: Camera overview of the user interface in *Quattro DigiCAM* configuration.

Right: Camera overview of the user interface in *Quattro DigiCAM Oblique* configuration.

2.2.1 *Quattro DigiCAM*

The *Quattro DigiCAM* installation creates four near nadir images in a two by two pattern with small overlap. The images are taken synchronously and with the same camera settings. This results in four images that can be stitched together geometrically and radiometrically into one uniform large format image with the software *DigiMerge* that is provided together with the camera. The resulting virtual image can be handled like an image from a one sensor camera.

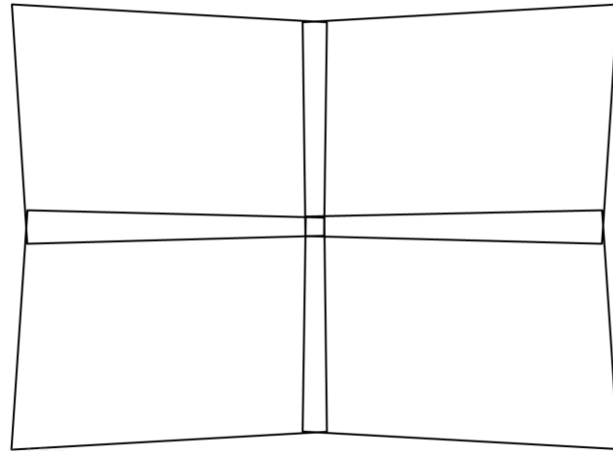


Figure 4: Left: *Quattro DigiCAM*

Right: Footprint of a *Quattro DigiCAM* with 100mm focal length.

2.2.2 *Quattro DigiCAM Oblique*

In the *Quattro DigiCAM Oblique* configuration, the camera modules are mounted to point forward, back, left and right with an oblique angle of 45° . Because of the synchronization of the images, the same time stamp can be used to obtain the exterior orientation of the images from the integrated *AEROcontrol* GNSS/IMU system. Besides this, the four images do not have overlap and are therefore used as independent images.

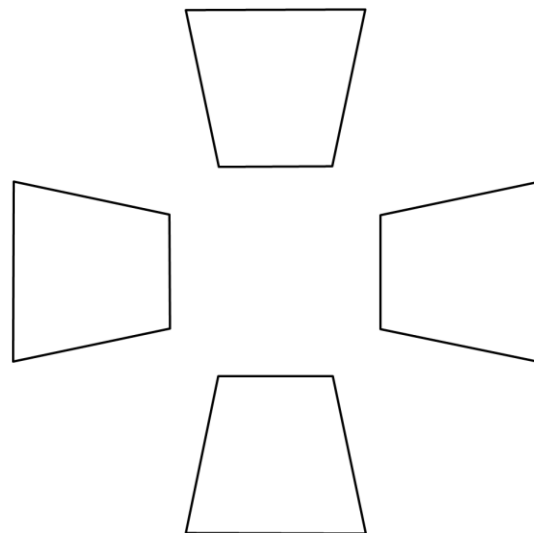
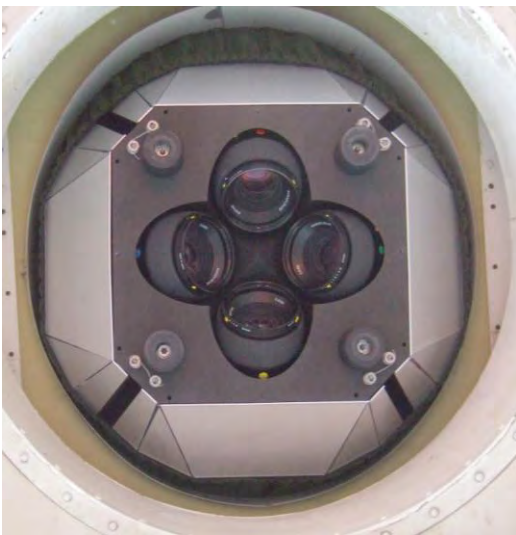


Figure 5: Left: *Quattro DigiCAM Oblique*

Right: Footprint of a *Quattro DigiCAM Oblique* with 80mm focal length.

2.2.3 Penta DigiCAM

A possible enhancement of the *Quattro DigiCAM Oblique* is the *Penta DigiCAM* configuration. To obtain an optimal footprint pattern, the nadir looking camera can be equipped with a shorter focal length than the oblique looking modules. Figure 6 shows a configuration with four oblique looking modules with 80mm focal length and a nadir looking module with a 50mm lens. This configuration allows an area-wide nadir coverage of the mission area in parallel to the capturing of the oblique images.

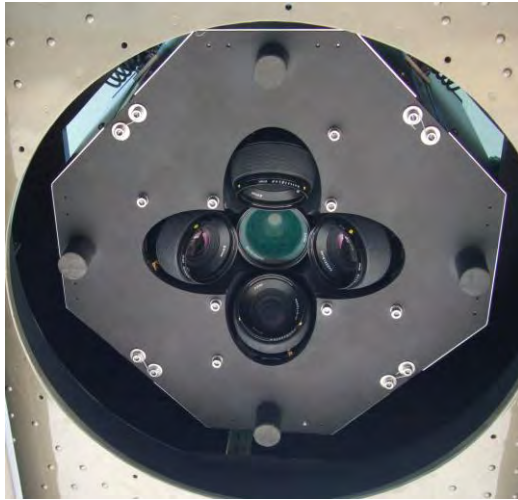
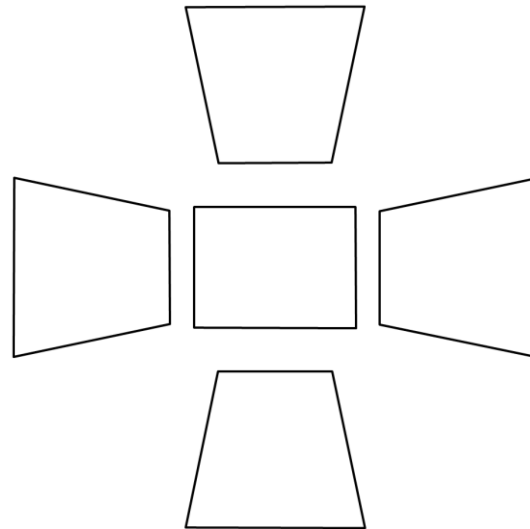


Figure 6: Left: *Penta DigiCAM*



Right: Footprint of a *Penta DigiCAM* with 80mm focal length for oblique and 50mm focal length for nadir.

3 Application Examples

3.1 *Quattro DigiCAM* Project „Oberhausen“

On March 10th, 2010, aerial photographs of the city of Oberhausen and of the area around Dorsten (Germany) were taken by the company AEROWEST GmbH, Dortmund. The block “Oberhausen” covered an area of 111km² with approx. 350 large format virtual images at 50% side overlap and 60% forward overlap. At a flying height of 1.700m, aerial images with a GSD of 10cm were created. The image data was captured for the geodata department of the city of Oberhausen (Stadt Oberhausen, FB Geodaten, Vermessung und Kataster) to create a digital orthophoto to update the existing database.

The *Quattro DigiCAM* of AEROWEST was equipped with 100mm lenses and 50Mpixel CCD sensors. After the processing of the images, the two blocks were oriented with Integrated Sensor Orientation (ISO) using the exterior orientation measured with the *AEROcontrol-IIe* GNSS/IMU system.

To evaluate the remaining systematic image distortions after the stitching process, a sub block with five flightlines and 15 images in each line was taken and processed with MATCH-AT (Inpho GmbH, Stuttgart) and BINGO (GIP, Aalen). Figure 7 shows the remaining systematic distortion of the 75 images subblock of the Oberhausen block. For a subdivision of the image format into 16×22 segments, the maximum systematic image distortion was below $1/5$ of the $6\mu\text{m}$ pixel ($1.17\mu\text{m}$).

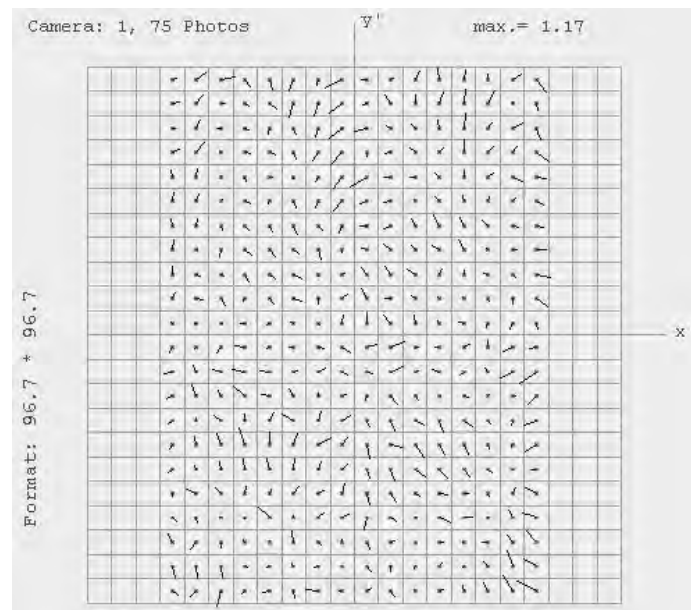


Figure 7: Remaining systematic image deformation of a *Quattro DigiCAM* image after stitching.

3.2 System Modification

After the survey missions of the spring season, the configuration of the *Quattro DigiCAM* of AEROWEST was changed to the oblique mode. The modification was done within about two hours on April 27th, 2010. Because the wider geometry of the oblique installation, the sensor mount was changed from a GSM-3000 to a Leica PAV30. The cameras were mounted to create images with an oblique angle of 45° in landscape orientation.

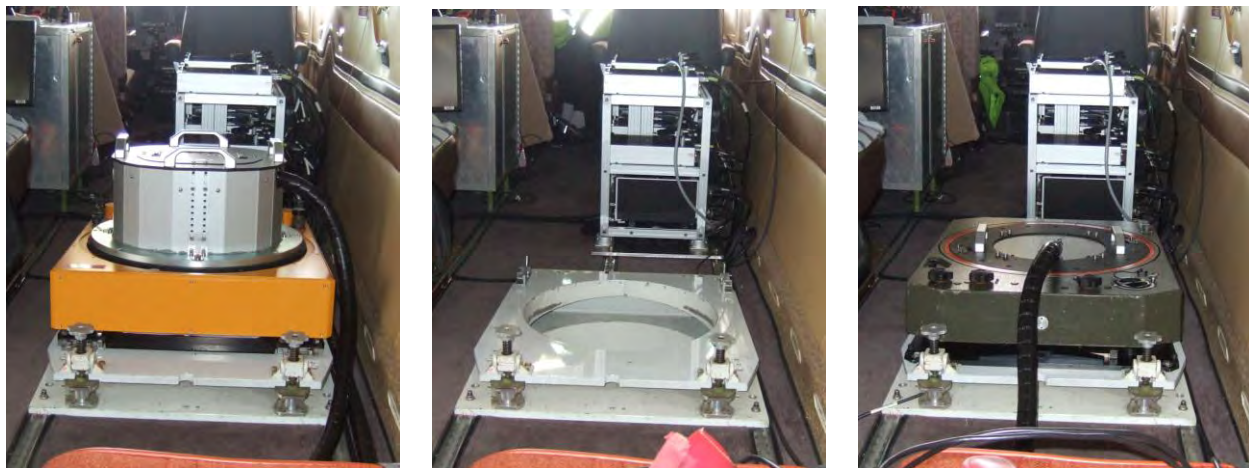


Figure 8: Modification of a *Quattro DigiCAM* to *Quattro DigiCAM Oblique*. The changes were made within two hours.

Left: *Quattro DigiCAM* in a GSM-3000 mount.

Right: The same camera modules in *Quattro DigiCAM Oblique* configuration in a PAV30 mount.

3.3 *Quattro DigiCAM Oblique Project “Chemnitz”*

After the modification of the geometry of the camera, oblique images were captured on April 29th, 2010 over the area of Chemnitz for the land survey department of Chemnitz (Stadt Chemnitz, Städtisches Vermessungsamt).

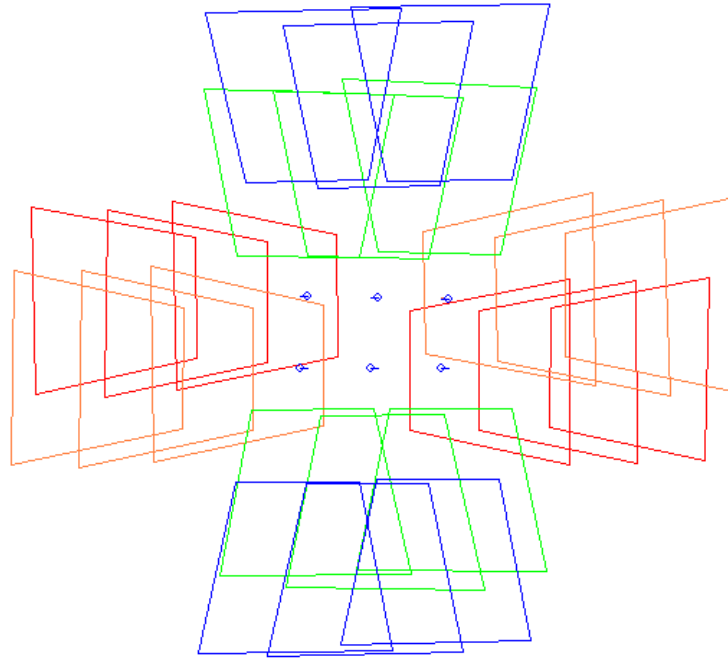


Figure 9: Footprint of four times six *Quattro DigiCAM Oblique* images taken in two neighboring flightlines.

In this project an area 221km^2 was covered with oblique images with a mean GSD of about 15cm. The images were taken with an oblique angle of 45° in landscape orientation. Figure 9 shows the footprint of four times six images taken in two neighboring flightlines. It reveals that standard parameters from nadir aerial photography, like forward overlap or side overlap, can have an ambiguous meaning for oblique photo projects. For this project, an overlap of about 50% in all directions was specified. Four times 1034 images were captured, oriented with *AEROcontrol* GNSS/IMU data and delivered to the customer within one month after the flight.

4 Conclusion

The *DigiCAM* is a digital aerial camera that can be equipped with lenses with a range of different focal length and with CCD sensors with different pixel numbers. It is integrated to a turnkey system with data storage, a graphical user interface and optional flight guidance and management (*CCNS*) and GNSS/IMU system (*AEROcontrol*). Because of the modular design of the hardware and software components, multiple *DigiCAMs* can be bundled to multi camera systems that are operated as one single sensor. The main configurations are the *Quattro DigiCAM*, the *Quattro DigiCAM Oblique* and the *Penta DigiCAM*.

The *Quattro DigiCAM* design enables the stitching of four images to one single virtual image. This image can be used as a photo from one camera. Using the stitching software that is part of the *Quattro DigiCAM* system, remaining systematic image deformations in the range of 1/5 of a pixel can be reached.

With the *Quattro DigiCAM Oblique*, the simultaneous capturing of high quality oblique images in the four different directions is possible.

The *Penta DigiCAM* combines the *Quattro DigiCAM Oblique* with a nadir looking camera to capture oblique and nadir images simultaneously.

The modification of a *Quattro DigiCAM* to the *Quattro DigiCAM Oblique* configuration can be accomplished within two hours.

5 References

CRAMER, M., KRAUB, H., JACOBSEN, K., VON SCHÖNERMARK, M., HAALA, N. & SPRECKELS, V. , 2009: Das DGPF-Projekt zur Evaluierung digitaler photogrammetrischer Kamerasysteme. Tagungsband 18/2009, Jahrestagung DGPF Jena, 2009.

KREMER, J., 2009: Optimized Data Acquisition with the IGI DigiTHERM Thermal Camera System, in Fritsch (ed.):Photogrammetric Week'09, Wichmann, Heidelberg, p.111-117

KREMER, J. & CRAMER, M., 2008: Results of a Performance Test of a Dual Mid-Format Digital Camera System. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXVII, Part B1, Commission 1. ISPRS Congress 2008, Beijing, China. P. 1051ff. ISSN 1682-1750.

Überlegungen zum Dynamikbereich von digitalen, flächenbasierten Luftbildkamarasystemen vom Testflug Vaihingen/Enz

OTTO KÖLBL¹

Zusammenfassung: Entsprechend den Kalibrierungsangaben weisen digitale Luftbildkamaras einen Dynamikbereich von etwa 1:1000 auf, mit Filmkamaras wird bei Farbaufnahmen nur ein Dynamikbereich von etwa 1:100 erreicht. Analysiert man dagegen die Bildaufnahmen so ergibt sich für die digitalen Kamaras ein Wert von 1:10 bis 1:20, wohingegen für die Filmaufnahmen mit Negativfilm eher ein höherer Wert erreicht wird; lediglich die Bilder der UltraCam reichen an den Dynamikbereich des Films heran oder übersteigen ihn. Im hellen Bereich wird der Dynamikbereich durchwegs durch den Sensor begrenzt wohingegen im dunklen Bereich, also Schattenpartien, anscheinend das Luftlicht der begrenzende Faktor ist. Allerdings sollte es möglich sein das Luftlicht durch eine geeignete Filterung in den Schattenpartien besser zu durchdringen. Wahrscheinlich ließe sich auch die Dynamik im hellen Bereich durch eine entsprechende Belichtung verbessern.

1 Problemstellung

Beim Testflug Vaihingen von 2008, unter der Leitung des Instituts für Photogrammetrie der Universität Stuttgart, wurden die wichtigsten digitalen Aufnahmesysteme und die Filmkamera RMK-Top eingesetzt. Ziel des groß angelegten Tests war es, die verschiedenen Aufnahmesysteme vergleichend zu analysieren. Der Versuch konnte inzwischen mit einer sehr umfangreichen Publikation abgeschlossen werden (CRAMER u.a.). Nur am Rande wurde dabei auch die Frage nach dem Dynamikbereich der neuen Kamerasysteme im Vergleich zu den Filmkamaras behandelt. Für den Anwender und Benutzer der Aufnahmen ist der Dynamikbereich durchaus von Bedeutung. Gerade bei großmaßstäblichen Bildern ergibt sich ein großer Kontrastumfang, da man anstrebt Schattenpartien einzusehen und auch helle Partien noch wiederzugeben. Ergibt sich nun mit den digitalen Kamerasystemen die Möglichkeit diese Aufgabe besser zu lösen als mit den Filmaufnahmen, bei denen vor allem die Einsehbarkeit in Schattenpartien recht begrenzt war? Entsprechend den radiometrischen Angaben der Hersteller weisen digitale Kamaras durchaus einen Dynamikbereich von 1:1000 oder 60 Dezibel auf, wohingegen dieser Wert bei Luftbildfilmen, vor allem bei Farbfilmen wesentlich kleiner ist.

Im Folgenden wird nun versucht den Dynamikbereich an Hand der Bilder des Testflugs abzuleiten. An sich wurden für derartige Analysen Testtafeln ausgelegt und zum Zeitpunkt des Überflugs verschieden radiometrische Messungen ausgeführt. Auswertungen dieser Messungen erfolgten etwa in Hinblick auf die automatische Objektklassifikation basierend auf der spektralen Bildwiedergabe (vgl. VON SCHÖNERMARKER). Mit der Linearität der Sensoren und dem Rauschen befasste sich auch HANUSCH ohne aber unmittelbar auf den eigentlichen Dynamikbereich der Aufnahmen einzugehen.

1) Otto Kölbl, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, Chemin de l'Eglise 17, CH-1066 Epalinges, Schweiz; E-Mail: otto.koelbl@epfl.ch

In der nachfolgenden Analyse wird im Wesentlichen der Dynamikbereich aus einem Vergleich der digitalen Aufnahmen mit den Filmaufnahmen abgeleitet. Diese Filmaufnahmen lassen sich an Hand von sensitometrischen Kontrollstreifen eichen. Damit lässt sich auf die Leuchtdichte an der Aufnahmekamera schließen. Da die digitale Kamera DMC und die Filmkamera RMK-Top simultan geflogen wurden, lassen sich die Werte unmittelbar auf diese digitale Kamera übertragen. Eine Übertragung auf die anderen Aufnahmesysteme ist an sich nur sehr begrenzt möglich, liefert aber trotzdem recht interessante Aufschlüsse.

Entsprechend dieser Analyse ist der Dynamikbereich von digitalen Bildaufnahmen keinesfalls größer als bei den vergleichenden Filmaufnahmen, abgesehen vielleicht von der UltraCam. Dies ist im Wesentlichen darauf zurückzuführen, dass bei sämtlichen digitalen Aufnahmen an hellen Objekten die Grenze der Leistungsfähigkeit erreicht wurde. Im dunklen Bereich wird der Dynamikbereich wohl durch das Luftlicht beschränkt. Die panchromatischen Sensoren, welche im Zuge des Pansharpenings für die Dynamik bestimmend sind, registrieren aber über den gesamten Spektralbereich einschließlich des Blaulichtes. Dadurch dürfte die Detailerkennbarkeit in Schattenpartien beträchtlich reduziert werden. Im Gegensatz dazu werden beim Film die 3 Farbkanäle unabhängig registriert. Trotzdem ist hierbei die Objekterkennbarkeit in den Schattenpartien gegenüber den digitalen Aufnahmen wegen des stärkeren Rauschens reduziert.

Diese Untersuchungen wurden aus technischen Gründen auf die flächenbasierten Aufnahmesysteme beschränkt. In die Untersuchungen wurden die Digicam von IGI, die DMC von Z/I-Imaging und die UltraCam von Microsoft, Vixel Imaging, einbezogen. Die Filmaufnahmen erfolgten mit dem Agfa Negativfilm X100 PE1 und der RMK_Top von Zeiss Oberkochen, heute Z/I Imaging.

2 Dynamikbereich entsprechend Angaben der Hersteller

2.1 Definition des Dynamikbereichs der Kamera

Als Dynamikbereich (DR) wird das Verhältnis des maximalen Ausgangssignals (Sättigungsgrenze eines Pixels) zu seiner Lichtempfindlichkeit bezeichnet. Die Lichtempfindlichkeit eines CCD wird begrenzt durch das Dunkelstromrauschen. Die Angabe des Dynamikbereichs erfolgt in elektronischen Fachkreisen in logarithmischer Form also in Dezibel [dB] (vgl. u.a. : SANDAU).

$$DR = 20 * \log (FW/D) \quad \begin{array}{l} DR: \text{Dynamikbereich; FW Totale Ladungsmenge (Full Well)} \\ D: \text{generierter Dunkelstrom} \end{array}$$

Im Folgenden wird der Dynamikbereich vorwiegend mittels des einfachen Verhältnisses angegeben und nicht in der logarithmischen Form, dies wegen der größeren Anschaulichkeit. Dabei wird die höchste noch fassbare „Belichtung“ (Leuchtdichte mal Belichtungszeit) anstelle der totalen Ladungsmenge benutzt, da letztere nur indirekt ermittelt werden kann. Auch der Dunkelstrom ist im Allgemeinen nicht fassbar, denn dieser wird bei der Bildprozessierung meist korrigiert. Demgegenüber sind aber die dunkelsten Bildstellen nach dem Grau- oder Farbwert (DN: digital number) und dem Rauschen charakterisiert. Im Folgenden wurde der Dynamikbereich der Kameras aus dem Verhältnis zwischen Rauschen im Dunkelbereich (DN=0) und dem maximalen Farbwert (Pixelwert) berechnet. Für die analysierten Bilder wurde dagegen auf die

Belichtung zurückgegriffen und es wurde das Verhältnis zwischen minimal noch bildwirksamer Belichtung und maximaler Belichtung zur Berechnung des Dynamikbereichs verwendet.

2.2 Dynamikbereich der Kamera DMC abgeleitet aus dem Kalibrierungsprotokoll

Die Firma Z/I Imaging liefert ein sehr umfangreiches Kalibrierungsprotokoll zu jeder Kamera, in dem auch radiometrische Angaben gemacht werden. Unter anderem wird die spektrale Empfindlichkeit der Kameras, die Sensorempfindlichkeit (Sensor linearity) und das Rauschen in Abhängigkeit der Grauwert ausgewiesen.

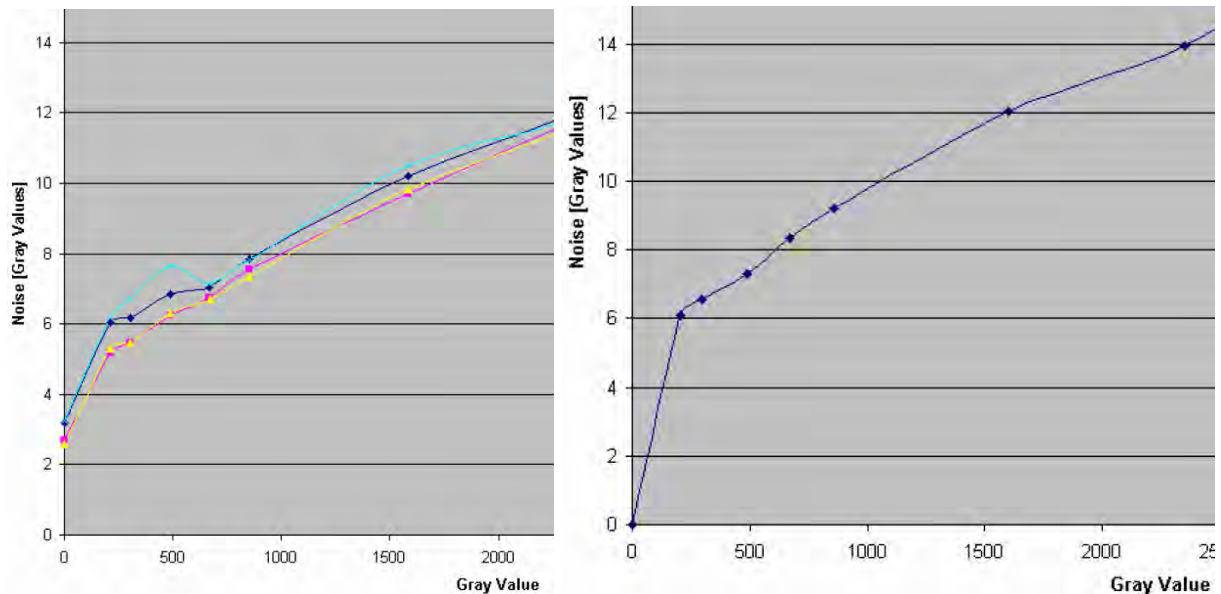


Abb. 1: Rauschen in Funktion der Grauwerte, links die Werte für die Pan Kamera, rechts für die blauempfindliche Kamera mit kleinerem Bildformat.

Eine explizite Angabe zum Dynamikbereich wird nicht gegeben. Will man diesen aus obigen Angaben berechnen, so ergibt sich der Dunkelstrom für die Pankamera aus dem Rauschen mit 3 und der maximale Grauwert mit 4095; es resultiert also eine Verhältniszahl von 1:1350 oder in Dezibel ein Wert von 63. Etwas geringer ist der Dynamikbereich bei den Farbkameras wegen des höheren Rauschens.

2.3 Dynamikbereich der UltraCam

In dem Kalibrierungsdokument der UltraCam werden keine Angaben zum Rauschen oder der Linearität der Sensoren gemacht; ausgewiesen wird lediglich ein Schwellwert für den Grauwert (Intensity Threshold), **dieser wird mit 7600 DN beziffert.**

Auf eine entsprechende Rückfrage bei der Herstellerfirmen Vexcel erhielt ich Bildbeispiele mit denen einerseits die Linearität zwischen der Belichtung und den Grauwerten nachgewiesen wird. Zudem wurde im Rahmen einer internen Studie der Dynamikbereich mit ca. 1:1000 abgeschätzt. (GRUBER). Das Rauschen wurde bei einem Grauwert von 4000 mit 22 beziffert. Für kleinere Grauwerte nimmt die Streuung entsprechend der Binomialformel ab. Für höhere Grauwerte, etwa ab 7000, nimmt die Streuung ebenfalls ab, was auf eine Übersteuerung zurückgeführt wird.

Diese Untersuchungen wurden mit der UltraCam Xp ausgeführt, wohingegen beim Bildflug Vaihingen/Enz die UltraCam X eingesetzt wurde. Trotzdem dürften diese Überlegungen in etwa übertragbar sein. Man muss aus dieser Untersuchung schließen, dass der Schwellwert von 7600 wohl eher an der oberen Limite liegt und vorwiegend der Bereich bis 4000 für die Abbildung verwendet werden sollte. Höhere Belichtungen als 7600 werden aber noch bildwirksam wiedergegeben, sind aber nur mit Einschränkungen numerisch nutzbar.

2.4 Dynamikbereich der RMK-Top Filmaufnahmen entsprechend der Leistungsfähigkeit des Films.

Bei photographischen Aufnahmen wird der Dynamikbereich im Wesentlichen durch den Film vorgegeben. Bei den Vergleichsaufnahmen wurde die RMK-Top, bestückt mit dem Agfa Negativfilms X100 PE1, eingesetzt. Diese Aufnahmen erfolgten simultan mit der DMC-Kamera. Die Farbdichtefunktion und Angaben zur Körnigkeit lassen sich den technischen Datenblättern des Filmherstellers entnehmen. In Abb. 2 wird die Farbdichtefunktion für eine Entwicklungszeit von 5 Minuten 20 Sekunden wiedergegeben.

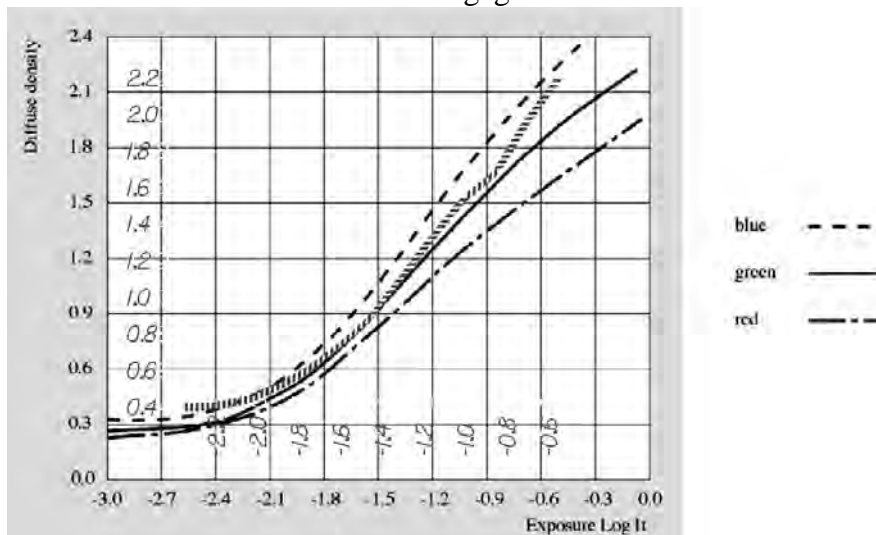


Abb. 2: Farbdichtefunktion des Agfa Negativfilms X100 PE1 überlagert mit den am Graukeil gemessenen Werten für den Grünkanal (kurz-strichliert und Werte in Italic).

Um die effektive Farbdichtefunktion zu überprüfen wird der Film im Allgemeinen sensitometrisch überprüft. Dazu wurden von der Flugfirma RWE Graukeile am Anfang und Ende der Flugstreifen aufbelichtet. Die Kontrollmessung dieser Graukeile an einem Densitometer liefert die kurzgestrichelte Kurve von Abb. 2; diese bezieht sich nur auf den Grünkanal. Entsprechend den Sensitometermessungen liegt der Schleier bei einer Dichte von 0.33 im Blau- und Rotbereich und bei 0.37 im Grünbereich.

Die größten Werte wurden am Graukeil mit 1.50, 1.80 und 1.55 D in den Kanälen rot grün und blau gemessen. Allerdings lassen sich in den Randbereichen des eigentlichen Graukeils Zonen ausmachen, die im Grünbereich bis zu einer Dichte von 2.2 D ansteigen. Aus diesem Grund wurde die gestrichelte Kurve in der Abb. 2 bis 2.2 verlängert, dafür liegen allerdings keine Abszissenwerte vor. Entsprechend der Agfa-Information würde hier die Dichtefunktion abflachen. Welche maximale Schwärzung effektiv möglich ist lässt sich nicht feststellen. Ganz groß

lässt sich damit der Dynamikbereich des Films mit 2.0 D (Belichtung von -2.35 D bis -0.35 D) oder 1:100 angeben. Dieser Wert ist um einen Faktor 10 geringer als für die digitalen Kameras.

3 Abschätzung des Dynamikbereichs der Luftbilder des Testflugs

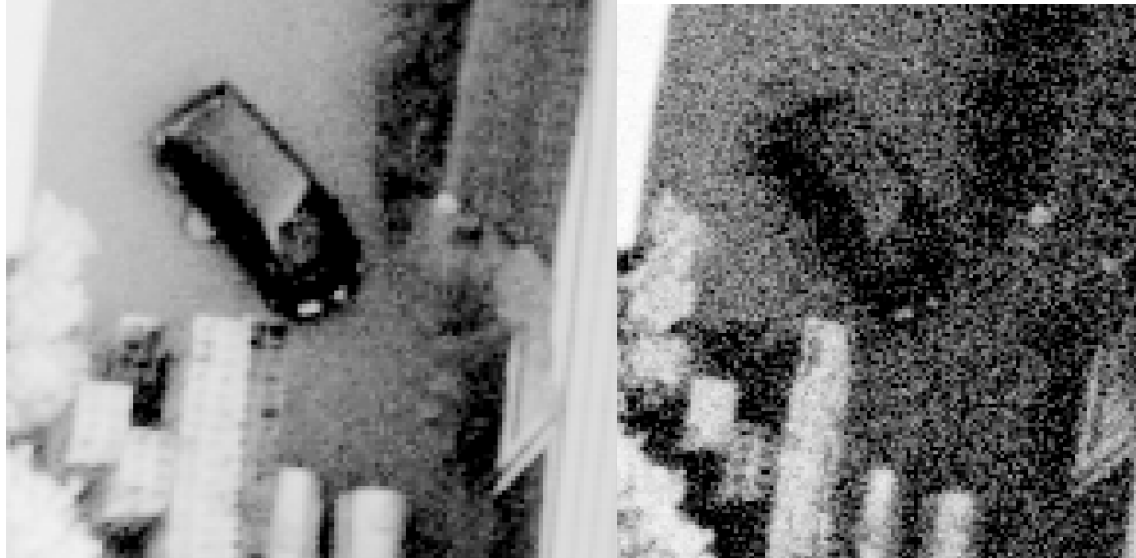


Abb. 3: Illustration des unterschiedlichen Rauschens an einem dunklen Objekt bei einer digitalen Kamera (DMC, links) und der Filmkamera RMK-Top (rechts); es handelt sich um ein schwarzes Auto im Schatten

Obgleich digitale Kameras einen höheren Dynamikbereich aufweisen als Filmkameras kommt dieser Effekt bei den praktischen Aufnahmen nicht zum Tragen, viel entscheidender ist dagegen ihr geringeres Rauschen (vgl. Abb. 3). Wahrscheinlich ließe sich das RMK-Bild noch durch Bildverarbeitung etwas verbessern, aber die Problematik, der verminderten Bildererkennung durch das Rauschen an Filmaufnahmen bleibt bestehen.

3.1 Vergleichende Abschätzung des Dynamikbereichs von RMK-Top und DMC

Im Folgenden wird an Hand der Simultanaufnahmen von der RMK-Top und der DMC der Dynamikbereich abgeschätzt. Dabei kann man davon ausgehen, dass die Beleuchtungsverhältnisse praktisch ident sind. Als Referenz für die Abschätzung der Leuchtdichte im Objektraum konnten die RMK-Top Bilder zusammen mit den sensitometrischen Kontrollstreifen herangezogen werden. Zur Erzeugung dieser Kontrollstreifen wird ein standardisierter Graukeil mit einer logarithmischen Abstufung von 0.15 verwendet. Diese Kontrollstreifen wurden an einem Densitometer ausgemessen, ferner wurden sie an einem Scanner zusammen mit einigen Luftbildern erneut abgetastet. Dabei wurde darauf geachtet, dass der gesamte Dynamikbereich der Filmnegative innerhalb des Abtastbereichs des Scanners liegt. Die Abtastung erfolgte am PhotoScan von Z/I Imaging in 12 bit freundlicherweise durch das Schweizer Bundesamt für Landestopographie.

In der Folge wurde eine Serie von Objekten auf den beiden Aufnahmen identifiziert und deren Grauwerte gemessen (vgl. Tabelle 1). Die Messungen beschränkten sich nicht auf einzelne Pixel,

sondern es wurden Profile zwischen 10 und 200 Pixel gemessen und Mittelwert und Streuung ermittelt.

Tab. 1: Gegenüberstellung der Grautonwerte und der entsprechenden logarithmischen Werte von ausgewählten Objekten im RMK-Bild 027 und dem Bild 63 (Nr.10030063) der DMC

Nr.	Objekt- beschreibung	RMK	RMK-Top	RMK	RMK-Top	Belichtung relativ	DMC 63	DMC 63	DMC 63	DMC 63
		Negativ Grauwert	Rauschen des Mittels	Positiv Dichte log.	Rauschen log. Wert		Farbwert	Rauschen log. Wert	Farbwert natürlicher Wert	Rauschen des Mittels
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)
T1	Extrem DMC	--	--	--	--	0.407	2.714		518	
T2	Extrem RMK	1729	10.1	0.603	0.003	0.460	2.776	0.002	596	2.3
P1	Mauer Schatten	1729	10.1	0.603	0.003	0.460	2.776	0.002	584	2.3
P8	Hof Schatten	1642	13.3	0.627	0.004	0.500	2.802	0.004	694	5.3
P11	Hof Schatten hell	1326	11.4	0.726	0.005	0.666	2.990	0.001	1004	2.3
P4	Tafel dunkel	803	14.0	0.959	0.009	0.918	3.136	0.000	1645	
P5	Asphalt besonnt	619	6.3	1.080	0.005	1.058	3.295	0.001	1907	3.8
P6	Dach	607	5.4	1.089	0.006	1.068	3.301	0.001	2012	5.4
P9	Parkplatz besonnt	316	7.5	1.393	0.012	1.361	3.559	0.001	3635	4.4
P10	Pflaster besonnt	282	7.5	1.445	0.017	1.410	3.601	0.001	4023	3.2
T3	Extrem DMC					1.418	3.612		4095	3.2
P20	Hauswand	137		1.781		1.783	überstr.	überstr.	überstr.	
	Differenz			RMK :	P20-T2	1.383	DMC :	T3-T1 (7)	1.012	
	Dynamikbereich			RMK :	P20-T2	21.0	DMC :	T3:-T1 (7)	10.3	

Zur Veranschaulichung des Vorgehens wurden in Tabelle 1 die entsprechenden Messwerte für den Grünkanal zusammengefasst. Zunächst wurde der mittlere Grauton (DN) im RMK-Negativ ermittelt (Kolonne (3)). Dieser wurde durch Inversion (k/DN) in den entsprechenden Grauwert des Positivs umgewandelt. Anschließend wurde der Logarithmus berechnet und eine Gammaanpassung vorgenommen (5). Diese Anpassung errechnete sich aus den Sensitometerstreifen und beträgt für den Grünkanal 1.070. k ist eine Konstante und wurde so gewählt, dass die resultierenden logarithmischen Werte im hellen Bereich (dunkel im Negativ) möglichst gut mit der ebenfalls logarithmisch ausgewiesenen Belichtung übereinstimmen. Dieser Wert (k) erleichtert nur den Vergleich der Zahlen, ist aber an sich bedeutungslos. Die relative Belichtung (korrekter Leuchtdichte) selbst (7) wurde ebenfalls an Hand des Sensitometerstreifens bestimmt, wobei die Zuweisung nach einer Interpolation entsprechend dem gemessenen Densitometerwert und der relativen Belichtung erfolgte. Dabei wurde davon ausgegangen, dass die einzelnen Felder des Sensitometerstreifens entsprechend dem $\text{Log}(\sqrt{2})$ abgestuft sind. Bei der Grautonmessung wurde auch noch der mittlere Fehler des Mittels (4) ermittelt und der entsprechende logarithmische Wert (6) ausgewiesen. Die Differenz aus der relativen Belichtung für die Objekte T2 und P20 ergibt nun unmittelbar den Logarithmus des Dynamikbereichs des RMK-Bildes.

Die analogen Werte für das DMC-Bild wurden in den nachfolgenden Spalten ausgewiesen; der DN-Wert (Farbwert) findet sich in Kolonne (10) der entsprechende logarithmische Wert in Kolonne (8) und der Logarithmus des Dynamikbereichs errechnet sich aus der Differenz von T1 und T3 wieder von Kolonne (7) da die Leuchtdichte an den entsprechenden Objekten gleich ist.

Für die drei Kanäle des RMK-Bildes ergeben sich die Werte: 22; 21; 16 und für die DMC die Werte 13; 11; 9 (vgl. auch Tabelle 2). Der Dynamikbereich für die DMC ist kleiner, da die hellsten Objekte bei der DMC überstrahlt sind. Keine großen Unterschiede ergeben sich bei den dunklen Tönen obgleich im Wald bei der DMC noch Bildelemente (T1) mit dunkleren Tönen auszumachen sind als die dunkle Mauer (P1); offensichtlich dürfte das Luftlicht im dunklen Bereich den Dynamikbereich begrenzen (vgl. auch Abb. 4).

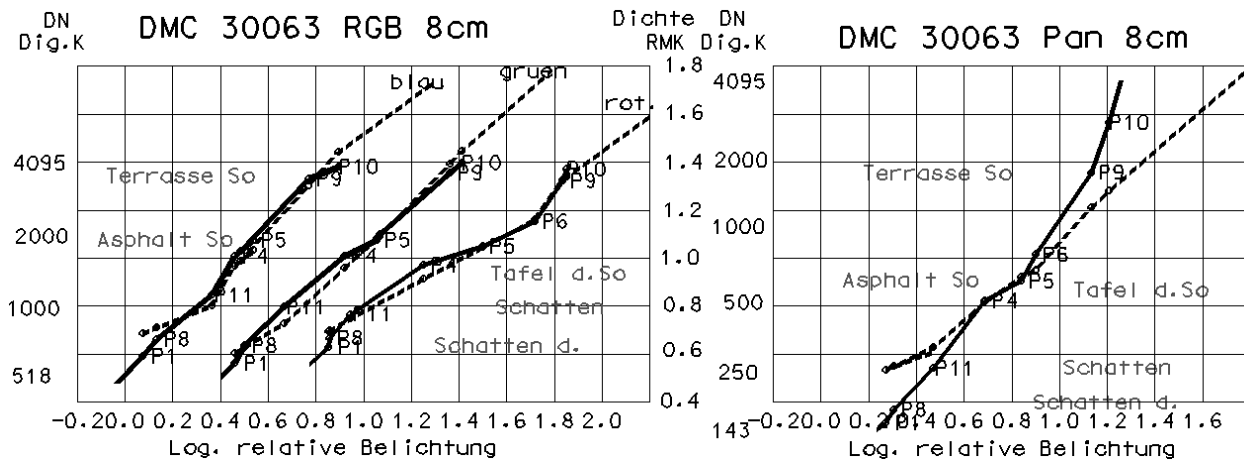


Abb. 4: Empirisch ermittelte Farbwertkurven für die DMC (durchgezogen) im Vergleich mit der RMK-Top bzw. dem Agfa-Negativfilm (gestrichelte Linien). Links die Kurven für das Bild 63 RGB, rechts das Pan Bild 63; die entsprechenden Grauwerte wurden für den Farbfilm durch Mittelung der 3 Kanäle berechnet. Beim RGB-Bild links wurden die Kurven für die 3 Kanäle auseinander gezogen, um die Erkennbarkeit zu verbessern. Die Punktnummern P1 usw. bezeichnen spezifische Objekte (vgl. auch Tabelle 1). Die Dichtewerte für die RMK gelten für beide Darstellungen

Die dunkelsten Objekte bei der RMK mit einem Grauwert von ca. 1700 oder einem logarithmischen Wert von 0.46 reichen noch nicht an den Schleier heran, dieser liegt bei 2800 bzw. bei 0.35 D. Genauso wenig wird der Dynamikbereich der DMC ausgeschöpft. Mit 500 DN im RGB-Bild oder 143 im Pan-Bild ist die Empfindlichkeit der DMC im Prinzip noch nicht ausgeschöpft. Wohl wurde aber bei den hellen Tönen eine Sättigung erreicht. Man kann sich daher fragen, ob die Bilder der DMC nicht um etwa einen Faktor 2 überbelichtet sind? Wahrscheinlich ließe sich der Dynamikbereich der DMC-Aufnahmen durch eine geringere Belichtung erhöhen.

Die Tonwiedergabe bei der RMK und dem DMC-RGB-Bild ist sehr ähnlich (vgl. Abb. 4); die logarithmischen Grautonwerte weisen für alle Objekte eine nahezu konstante Differenz von 2.17 auf. Das bedeutet, dass in den dunklen Bereichen die Empfindlichkeit etwas abnimmt und kein streng linearer Zusammenhang zwischen der Belichtung und den Grauwerten besteht. Das zeigt sich auch, wenn man den Dynamikbereich an Hand der gemessenen Grauwerte ermitteln würde. Hierbei ergeben sich für die 3 Farbkanäle die Verhältniszahlen: 7; 8 und 8. Diese Werte sind kleiner als entsprechend der Belichtung.

Betrachtet man die Pan-Bilder der DMC so resultiert eine beträchtlich steilere Grauwertkurve als bei den RGB-Bildern (vgl. Abb. 4 rechts); das bedeutet, dass die Pan-Bilder eine größere Grada-

tion aufweisen als die Farbbilder; dies ist wohl auf unterschiedliche Look-up-Tables zurückzuführen; leider liegen darüber keine speziellen Angaben vor.

Schließlich sei noch darauf hingewiesen, dass der Dynamikbereich im Rotkanal bei den RMK-Bildern höher ist als im Blaukanal. An sich nicht überraschend, denn bei Schwarzweissaufnahmen wird doch im Allgemeinen mit einem Gelbfilter geflogen, um den Effekt des Luftlichtes zu reduzieren. Man kann sich nun fragen, ob es nicht sinnvoll wäre auch beim Pankanal der Digitalkameras ein Gelbfilter oder gar ein Orangefilter zu verwenden um das Luftlicht besser zu durchdringen. Jedenfalls scheint dieser Effekt zu bestätigen, dass die Tonwiedergabe im dunklen Bereich durch das Luftlicht begrenzt wird.

Leider konnten die Testtafeln nur sehr begrenzt zur Analyse der Gartonwiedergabe benutzt werden, da die dunkelsten Partien erst in den Schatten gefunden werden und hier keine Tafeln ausgelegt wurden. Bei einer globalen Beurteilung der Bilder ist es sicher wichtig auch die Detailwiedergabe in den Schattenpartien mit einzubeziehen.

3.2 Dynamikbereich der Bilder der UltraCam

Die UltraCam (UC) wurde nicht am gleichen Tag eingesetzt wie die RMK; das gleiche Problem ergibt sich übrigens auch bei der Digicam. Ferner weisen die großmaßstäblichen Bilder der UltraCam Wolkenschatten auf. Das hat zwar den Vorteil, dass man Schattenzonen, die in den Bildern der DMC kaum einsehbar sind, nun einsehen kann. Für eine Analyse des Dynamikbereichs sind sie aber wegen der wechselnden Beleuchtungsverhältnisse kaum geeignet. Demgegenüber erfolgte der Hochflug bei sonnigen Wetter (Flughöhe ca. 2500m über Grund). Die Farbbilder liegen nur in 8-bit vor und das Histogramm umspannt den Bereich von 0 bis 255; demgegenüber liegen die Pan-Bilder in 16-bit vor und umfassen den gesamten Dynamikbereich. Um sicherzustellen, dass die Beleuchtungsverhältnisse homogen sind wurden die Grauwerte von Asphaltstraßen über das ganze Bild gemessen. Diese variieren bei vergleichbaren Straßen lediglich um 10%. Weiters wurde die Grauwertkurven vergleichend mit den DMC-Bildern kartiert (vgl. Abb. 5). Demnach sind die Abstände zwischen dunklen Objekten in der Sonne (P4 oder P5) und Schattenobjekten (P8 oder P11) in etwa proportional. Daraus wurde geschlossen, dass die Beleuchtungsverhältnisse bei den beiden Hochbefliegungen in etwa vergleichbar sind, jedenfalls innerhalb der hier angestrebten Genauigkeit von vielleicht 20%.

Bei der Ermittlung des Dynamikbereichs wurde analog vorgegangen wie bei der DMC. Für das Panbild ergibt sich ein Dynamikbereich von 27 aus der Belichtung und ein Wert von 18 falls die Grauwerte betrachtet werden. Der minimale DN-Wert beträgt 411 für Bildelemente (tiefe Schatten unter Bäumen) und der Maximalwert 7600, entsprechend dem vorgegebenen Schwellenwert. An sich können noch Bildelemente mit höheren DN-Werten gefunden werden, allerdings lassen sich diese nicht mehr eindeutig den RMK-Bildern zuordnen, da es sich wahrscheinlich um Spiegelreflexion handelt und sie dürften zudem übersteuert sein. Die Grauwertwiedergabe ist nicht streng linear zur Belichtung wie Abb. 5 zeigt, was wohl auf den größeren Luftlichtanteil bei der Hochbefliegung zurückzuführen ist; der dunklere Teil des Bildes ist wesentlich flacher. Allerdings konnten noch sehr tiefe Schatten im Wald identifiziert und gemessen werden, ähnlich wie bei den großmaßstäblichen Aufnahmen der DMC. An sich ergibt sich für die UltraCam nun ein höherer Dynamikbereich als für die DMC; dieser Wert erklärt sich wohl durch den höheren Schwellenwert von 7600 gegenüber 4095 für die DMC.

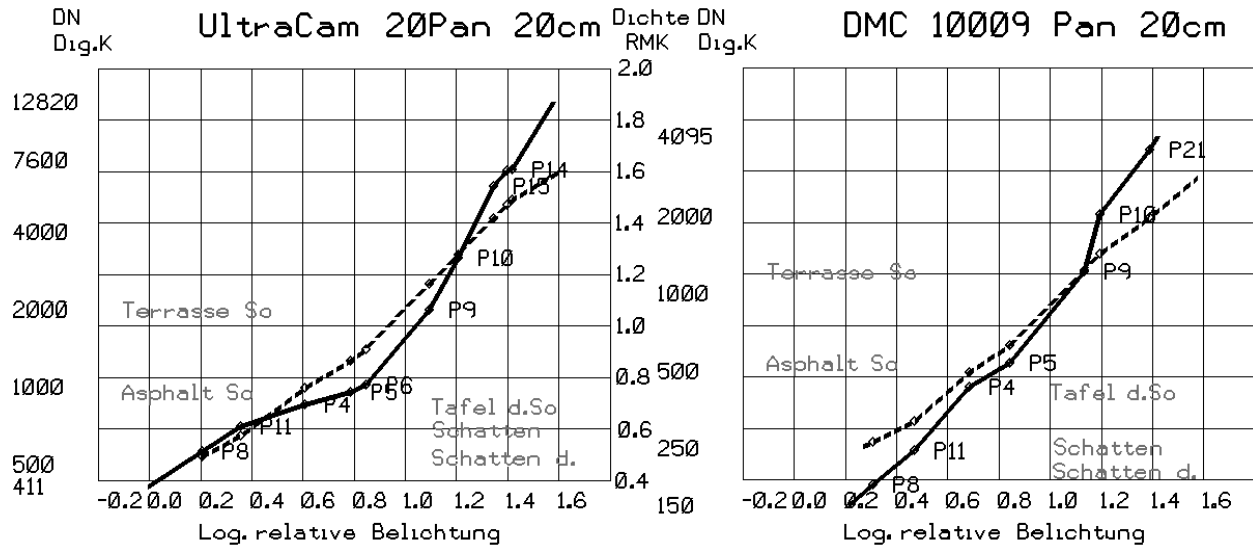


Abb. 5: Vergleichende Darstellung der Grauwertkurven für Hochbefliegungen mit der UltraCam (links) und der DMC (rechts). Die Kurven für die spezifischen Kameras sind durchgezogen wohingegen die Vergleichskurven der RMK-Top bzw. dem Agfa-Negativfilm gestrichelt sind. Diese stammen aus der Tiefbefliegung; verwendet wurde das Mittel aus den 3 Kanälen rot, grün und blau.

In Abb. 5 wird zum Vergleich auch die Grauwertkurve der Hochbefliegung für die DMC wiedergegeben. Entsprechend der hier vorgenommenen Berechnung des Dynamikbereichs ergibt sich für die DMC ein Wert von 16, gegenüber 11 bei der Tiefbefliegung (vgl. auch Tabelle 2). Dieser Wert ist um ca. 30% höher als bei den DMC-Bildern der Tiefbefliegung. Bei der Hochbefliegung wird der Kontrast weiter abgeschwächt, daher die etwas höheren Zahlen, die auch bei der nachfolgenden Digicam aufscheinen. Will man nun den Dynamikbereich der Ultracam mit den Bildern der Tiefbefliegung vergleiche, so sollte er um etwa 30% reduziert werden, würde dann nicht mehr 27 sondern nur 18 betragen; das würde auch dem Verhältnis-zahlen der Grauwerte entsprechen. Diese Überlegung setzt voraus, dass die Grauwerte bei den Pan-Bildern der Ultracam proportional zur Belichtung sind. Damit wird ein Dynamikbereich wie etwa beim Farbfilm erreicht. Ein höherer Dynamikbereich ergibt sich für die UltraCam erst, wenn man in Betracht zieht, dass über den Schwellwert von 7600 hinaus noch Objekte bildwirksam wiedergegeben werden (vgl. auch Abb. 7).

3.3 Analyse der Aufnahmen der Digicam

Bei dem in Vaihingen/Enz eingesetzten Aufnahmesystem Digicam handelt es sich um ein Multikamerasystem. Insgesamt wurden vier divergierende Kameras auf eine Plattform montiert. Es liegen folglich keine Senkrechtaufnahmen vor sondern Schrägaufnahmen mit einem Nadirwinkel von ca. 15°. Die Kamera wurde vom Hersteller IGI für metrische Luftbildaufnahmen angepasst, basiert aber auf der digitalen Hasselblad. Die Farbaufnahmen entstehen mit Hilfe des Bayerfilters. Die Bilder liegen im 16-bit Format vor, wobei die hellsten Bildtöne auf einen DN-Wert von 65'532 begrenzt sind, der durchaus erreicht wurde.

Bei den analogen Untersuchungen des Dynamikbereichs an der Digicam wurden Werte von 20, 15 und 9 für die tiefgeflogenen Bilder festgestellt und 22, 16 und 14 für den Hochflug. Die Farbwertkurven werden in Abb. 6 dargestellt. Auch hier wurde bei der Hochbefliegung die

Kontrastwiedergaben in den dunklen Zonen deutlich abgeschwächt. Durch das Messverfahren ergibt sich aber ein scheinbar größerer Dynamikbereich, ein Effekt der bereits weiter oben diskutiert wurde.

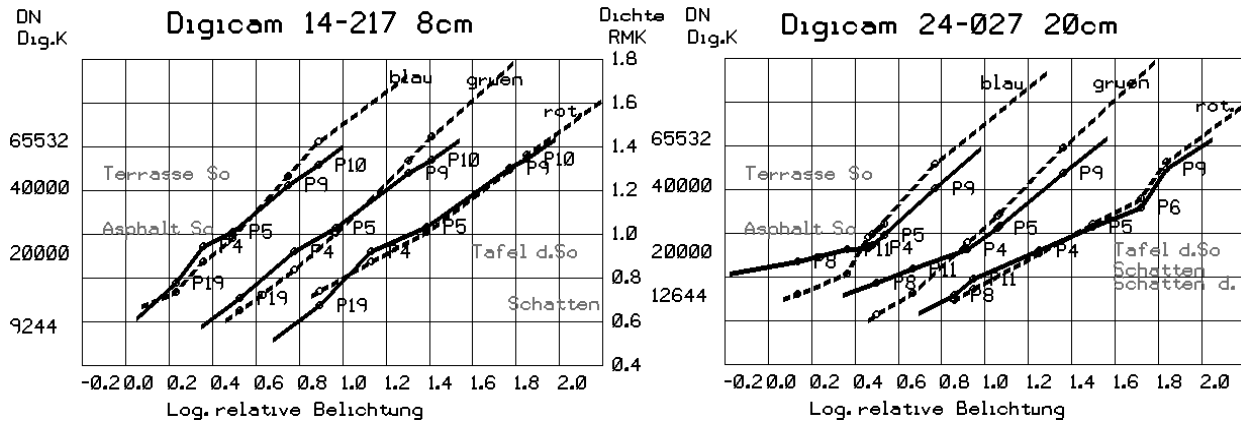


Abb. 6: Empirisch ermittelte Farbwertkurven für die Digicam (durchgezogen) im Vergleich zur RMK-Top bzw. dem Agfa-Negativfilm (gestrichelte Linien), links die Tiefbelichtung, rechts die Hochbelichtung.

3.4 Übersicht über die empirischen Analyse

In der nachfolgenden Tabelle 2 wird versucht die ermittelten Werte für den Dynamikbereich der analysierten Aufnahmen zusammenzustellen. Die Zahlen zeigen, dass für eine derartige Analyse unbedingt ein Maß für die relative Belichtung oder die Leuchtdichte am Ort der Kamera gefunden werden sollte. Dies gelang hier über die RMK, an sich aber nur für die Tiefbelichtung und für den Simultanflug mit der DMC. Bei der Hochbelichtung schwächt das Luftlicht den Kontrast weiter ab. Liegen derartige Aufnahmen nicht vor, könnte man sich mit verschiedenen Belichtung über dem gleichen Aufnahmegebiet behelfen.



RMK Dichte ca. 1.6

DMC DN=3445

UC DN ca. 9500

Digicam DN ca. 62'000

Abb. 7: Illustration des Dynamikbereichs an einem sehr hellen Objekt. Bei der RMK (Bild 51) ist der Aufbau des Wohnwagens noch erkennbar; bei der DMC (Bild 83) ist die Zone mit einem konstanten Wert von DN=3445 bereits überstrahlt; bei der UltraCam (Bild Pan 40) übersteigt der DN-Wert beträchtliche den Schwellwert von 7600, trotzdem ist der Aufbau gut erkennbar und auch bei der Digicam (Bild 17-219) bei einem DN-Wert um 62'000.

Mit der vorhergehenden Abbildung 7 wurde versucht den begrenzten Dynamikbereich bildlich darzustellen. Es handelt sich um ein Wohnmobil mit Aufsatz. Dieser ist bei allen Aufnahmen, noch erkennbar, allerdings kaum bei der DMC, obwohl der Grauwert des Dachs den Grenzwert von 4095 nicht überschreitet.

Tab. 2: Übersicht über die ermittelten Zahlen für den Dynamikbereich der verschiedenen Kameras; bei den panchromatischen Bildern DMC und UltraCam wurde versucht den stärkeren Anteil der Luftlichts bei den Hochbefliegungen zu berücksichtigen, Originalwerte in Klammer

Kamera	Boden- auflös- ung	Bildnummer	Dynamik nach Belichtung			Dynamik nach Farbwert			Farbwert	
			rot	grün	blau	rot	grün	blau	grün min	grün max
RMK LT	8cm	51/27	22	21	16	8	12	12	1729	137
RMK Stutt.	8cm			n. messbar					0	255
DMC RGB	8cm	10030063.tif	12	10	9	7	8	8	518	4095
DMC pan	8cm	10030063.tif		11					143	4095
DMC RGB	20cm	20010009.tif	19	11	9	8	9	10	473	4095
DMC pan	20cm	20010009.tif		11 (16)					150	4095
UC RGB	8cm			n. messbar					0	255
UC RGB	20cm			n. verfügbar						
UC pan	20cm	PAN20020020.tif		18 (27)			18		411	7600
Digicam	8cm	14040217.tif	20	15	9	8	7	6	9244	65532
Digicam	20cm	24020027.tif	(22)	(16)	(14)	6	5	4	12644	65532

4 Schlussfolgerungen

4.1 Zusammenfassung der Ergebnisse der empirischen Analyse

Vorliegende Untersuchung zeigt, dass der Dynamikbereich von digitalen Luftbildern eher kleiner ist als bei Filmaufnahmen oder diesen am Beispiel der UltraCam nur erreicht oder geringfügig übersteigt je nach Betrachtungsweise. Dieser reduzierte Dynamikbereich steht im Widerspruch zu den potentiellen Möglichkeiten dieser Kamerasysteme, deren Dynamikbereich etwa 10-mal größer ist als von Farb-Luftbildfilmen. Dieser Widerspruch erklärt sich zum einen durch die strikte obere Begrenzung der Bildwiedergabe bei Sättigung des Sensors an hellen Bildelementen. Zum anderem wird in dunklen Bildpartien die Bildwiedergabe wohl weitgehend durch das Luftlicht begrenzt. Freilich stellt sich nun die Frage ob Belichtung und Filterung bei der Bildaufnahme optimal waren. Entsprechend dem großen Dynamikbereich der digitalen Kameras wäre es wohl möglich gewesen die Aufnahmen mit 1-2 Blenden dunkler zu belichten. Zudem sollte es durch entsprechende Filterung (Gelb- oder Orangefilter) möglich sein das Luftlicht besser zu durchdringen. Inwieweit bei einer geringeren Belichtung das Rauschen die Aufnahmequalität bereits wieder beeinträchtigt kann hier nicht beurteilt werden.

Wie Abb. 3 vor Augen führt stört bei Filmaufnahmen vor allem das starke Rauschen und dies ganz besonders in den dunklen Bereichen. Wahrscheinlich ließe sich das Rauschen in den Schattenpartien durch eine stärkere Belichtung der Filme reduzieren. Jedenfalls wurde der Dynamikbereich des Films keinesfalls ausgeschöpft. Trotzdem sind wohl Filmaufnahmen auf Grund ihres großen Rauschens im Nachteil im Vergleich zu digitalen Aufnahmesystemen.

Zweifellos können die hier angewendeten Untersuchungsmethoden kritisiert werden und weisen auch ihre Grenzen auf. Ewa bei der Digicam wurden Aufnahmen einer Kamera ausgemacht, die anscheinend stärker belichtet wurden und dementsprechend einen geringeren Dynamikbereich aufweisen als die übrigen Aufnahmen. Sicher sollten auch noch mehr Aufnahmen ausgewertet werden, obgleich natürlich bei den Untersuchungen mehr Bilder verwendet wurden, als hier aufgezeigt. Die wohl stärkste Einschränkung ergibt sich bei der Übertragung der Belichtung der RMK-Bilder auf Bildflüge, welche nicht simultan erfolgten. Bedauerlicher Weise wurden beim Testflug Vaihingen keine Bilder mit unterschiedlicher Belichtungen erstellt.

4.2 Empfehlungen für den praktischen Einsatz von digitalen Aufnahmesystemen

Für den Praktiker ist es wichtig sich der begrenzten Dynamik der digitalen Kamerasysteme im praktischen Einsatz bewusst zu sein. Zum einen wird die Erkennbarkeit in den Schattenbereichen durch das Luftlicht begrenzt. Inwieweit diese Begrenzung durch eine entsprechende Filterung oder durch die Verwendung von Bildern anderer Kanäle reduziert werden kann, muss hier offen bleiben. Jedenfalls sollte der Praktiker bei der Bestellung eines Bildflugs fordern, dass etwa dunkle Autos in Schattenpartien noch erkennbar sein sollten. Damit wird wohl die Belichtung definiert, aber vor allem auch vermieden, dass bei zu starkem Dunst geflogen wird.

Im hellen Bereich, wird sich bei Spiegelreflexion wohl immer Überstrahlung ergeben. Es dürfte aber möglich sein die Bilder so dunkel zu belichten, so dass die meisten Objekte noch abgebildet werden.

4.3 Danksagung

Vorliegende Untersuchung erfolgte erst nach dem weitgehenden Abschluss des Projekts und war als Ergänzung gedacht. Der Autor möchte sich bei der Projektleitung und vor allem bei Herrn Cramer für die sehr entgegenkommende Unterstützung bedanken. Sehr dankbar bin ich auch den Firmenvertretern, Herrn Dörstel (Z/I Imaging), Herrn Gruber (Vexcel) und Herrn Kremer (Digicam) für ihre entgegenkommende Beratung; sehr wertvolle Ergänzungen lieferte auch Herr Weyand (RWE). Die Firma RWE führte den Bildflug mit der RMK-Top und der DMC aus. Die nachträgliche Bildabastung wurde freundlicher Weise vom Schweizer Bundesamt für Landestopographie ausgeführt, wofür ich mich bei den Herrn Streilein, Bovet und Röthlisberger bedanken möchte.

4.4 Literaturangaben

CRAMER, M., 2010: The DGPF-Test on Digital Airborn Camera Evaluation – Overview and Test Design. PFG 2/2010, 1-10 in Vorbereitung.

von Schönermarker, M., 2010: Status Status Report on the Evaluation of the Radiometric Properties of Digital Photogrammetric Airborne Cameras. PFG 2/2010, 1-10 in Vorbereitung.

HANUSCH, T., UND BALTSAVIAS, E.: 2009: Radiometric Evaluation of DMC, ADS 40 and Ultracam X. 1-11, DGPF Tagungsband 18/2009

SANDAU, R., 2005: Digitale Luftbildkamera: Einführung und Grundlagen. 342 S., Wichmann, ISBN 3-87907-391-0.

GRUBER, M., 2010: Neue Testaufnahmen und erste Auswertungen zur Radiometrie der UltraCam. 5 S, interne Publikation von Microsoft.

Evaluierung des digitalen photogrammetrischen Luftbildkameranagements UltraCamX der Firma Vexcel Imaging GmbH

MAGDALENA LINKIEWICZ¹ & MICHAEL BREUER²

Zusammenfassung: Mit Luftbildern der UltraCam-X des Testgebiets Vaihingen/Enz bei Stuttgart wurden mit der Software ORIMA für LPS der Firma Leica Geosystems verschiedene Bündelblockausgleichungen durchgeführt. Ziel war die vergleichende Analyse der Ergebnisse, die bei unterschiedlichen Ausgangsszenarien erzielt wurden. Die Untersuchung ist Teil des von der DGPF initiierten Projektes „Evaluierung digitaler photogrammetrischer Luftbildkameranagements“, Arbeitsgruppe „Geometrie“.

Unter Berücksichtigung der vorgegebenen Parameter des Luftbildblocks werden die verschiedenen Ausgangsszenarien beschrieben. Sie unterscheiden sich z.B. durch die Anzahl und Verteilung der verwendeten Passpunkte.

Sämtliche Ergebnisse der einzelnen Tests werden übersichtlich dargestellt.

1 Einleitung

Die Deutsche Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation (DGPF) konzipierte Ende 2007 einen Test zur Evaluierung verschiedener zurzeit kommerziell verfügbarer Kameranagements. Das Potenzial der Kameranagements sollte mit den Auswerteschwerpunkten Geometrie, Radiometrie, Höhenmodelle und Stereoauswertung untersucht werden [CRAMER, 2009].

In diesem Beitrag werden Ergebnisse einer Bachelorarbeit präsentiert, die sich mit dem Auswerteschwerpunkt Geometrie beschäftigt hat. Sie wurde im Juli 2009 an der Beuth Hochschule für Technik Berlin eingereicht.

2 Problemstellung

Die Aufgabe bestand darin, die geometrische Genauigkeit der Kamera UltraCamX der Firma Vexcel Imaging GmbH (Microsoft) zu untersuchen. Als Datengrundlage diente ein Luftbildblock des Testgebietes Vaihingen/Enz (bei Stuttgart) der mit einer geometrischen Auflösung 20 cm aufgenommen worden war.

¹ Magdalena Linkiewicz, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Institut für Robotik und Mechatronik, Optische Informationssysteme, Rutherfordstraße 2, 12489 Berlin; E-Mail: Magda.link@gmx.net

² Michael Breuer, Beuth Hochschule für Technik Berlin, Luxemburger Str. 10, 13353 Berlin; E-Mail: breuer@beuth-hochschule.de

Die UltraCam X ist eine Weiterentwicklung der UltraCam D und gehört zu den optoelektronischen Flächenkameras [ALBERTZ, 2007:50]. Sie besteht aus acht optischen Systemen mit unabhängigen Objektiven. Vier Objektive dienen panchromatischen Aufnahmen und vier weitere multispektralen Aufnahmen (RGB und NIR). Die panchromatischen Bilder haben eine Größe von 9420·14430 Pixel [SANDAU, 2010:314].

Die Untersuchung erfolgte mit Software der Firma ERDAS (www.erdas.com). Folgende Produkte und Versionen wurden dabei verwendet:

- ERDAS IMAGINE 9.3.2
- ORIMA-LPS-TE/GPS Rel. 9.30
- CAP-A als Teil von ORIMA

Die Befliegung wurde im Auftrag der Firma Vexcel Imaging GmbH (Microsoft) von der Luftbildfirma BSF Swissphoto GmbH am 11.9.2008 durchgeführt. Die Aufnahme dauerte von 11:53:03 bis 12:14:48 MESZ. Die absolute Flughöhe betrug ~3200 m und die Höhe des Flugzeuges über die Erdoberfläche ~2900 m. Die effektive Größe eines Pixels in Geländeeinheiten variiert zwischen 20cm in den höher liegenden Geländebereichen und 21cm in den tiefer liegenden. 20cm wird als nomineller Wert für die geometrische Auflösung verwendet.

Das Testgebiet Vaihingen/Enz wurde von 3 Längsstreifen (jeweils 12 Bilder) und 2 Querstreifen (jeweils 8 Bilder) bedeckt (Geometriestreifen). Die Längsüberlappung beträgt ~75% und die Querüberlappung ~70%. Darüber hinaus wurden auch noch Radiometriestreifen aufgenommen. Sie spielen in der hier präsentierten Untersuchung keine Rolle.

Zur Verfügung stehen also jeweils 52 panchromatische und multispektrale Luftbilder. Diese Daten waren mit der Methode des Pan-Sharpenings in farbige Bilder umgewandelt worden. Sie liegen in derselben geometrischen Auflösung (20cm) und Größe (9420·14430 Pixel) vor, wie die ursprünglichen panchromatischen Bilder. Die für diese Bilder gegebenen Parameter der Inneren Orientierung werden im Folgenden verwendet. Ansonsten basiert die vorliegende Untersuchung auf den hochauflösenden Farbbildern.

Die Parameter der Inneren Orientierung sind im Kalibrierungsprotokoll der UltraCamX vom 8.6.2007 dokumentiert. Die Kameranummer beträgt UCX-SX-1-50810149. Die Koordinaten des Bildhauptpunktes betragen bezogen auf das panchromatische Gesamtbild: $PPA(x, y) = (0,000\text{mm}; 0,144\text{mm})$.

Die übrigen Werte lauten:

- Kamerakonstante $c = 100,5$ mm,
- die radiale Verzeichnung wird bei der Kamera UltraCamX kompensiert und wird für ein Gesamtbild mit $0,0 \mu\text{m}$ angegeben (verzeichnungsfreie Abbildung),
- die Pixelgröße beträgt in der Bildebene $7,2 \mu\text{m}$.

Für die Absolute Orientierung liegt eine Text-Datei mit den GPS/INS-Daten vor. Die Pass- und Kontrollpunkte sind in zwei separaten Text-Dateien gespeichert. Insgesamt stehen 110 Passpunkte und 77 Kontrollpunkte zur Verfügung, wobei die genauen Koordinaten von den Kontrollpunkten nicht bekannt sind.

2.1 Untersuchungsmethode

Die Orientierung der Luftbilder erfolgte nach der Methode der Bündelblockausgleichung. Dabei sollte der Luftbildblock unter verschiedenen Ausgangsbedingungen orientiert werden. Folgende Fälle wurden behandelt und verglichen:

- Fall 1: Bündelblockausgleichung mit 4 Passpunkten
- Fall 2: Bündelblockausgleichung mit 1/3 aller zur Verfügung stehenden 110 Passpunkte (=31 Passpunkte)
- Fall 3: Bündelblockausgleichung mit 2/3 aller zur Verfügung stehenden 110 Passpunkte (=75 Passpunkte)
- Fall 4: Bündelblockausgleichung mit allen 110 zur Verfügung stehenden Passpunkten

In einer späteren Analyse, die nicht Teil der vorliegenden Untersuchung ist, soll die Qualität der Ergebnisse der verschiedenen Bündelblockausgleichungen mit Hilfe unabhängiger Kontrollpunkte bestimmt werden. Ihre Geländekoordinaten lagen nur als Näherungswerte vor, sodass sich die Punkte zwar gut identifizieren ließen, die Punktmessung aber unabhängig und individuell erfolgen konnte. Anschließend nahmen sie – ohne Zwang auf die Gesamtgeometrie auszuüben – an der Berechnung teil. Auf diese Weise wurden die Koordinaten der Kontrollpunkte für jeden der oben genannten Fälle bestimmt. Sie stehen nun für einen Vergleich mit den Ergebnissen anderer Arbeitsgruppen des Teams Geometrie zur Verfügung.

Bei der Reduzierung der Passpunktanzahl, ausgehend von den insgesamt zur Verfügung stehenden 110 Punkten, wurde darauf geachtet, dass auch die reduzierte Anzahl eine gute räumliche Verteilung über den gesamten Block aufwies. Im Fall 1 befinden sich die verbleibenden 4 Passpunkte in den Blockecken.

Die hier dokumentierten Ergebnisse basieren auf den jeweils nicht verwendeten Passpunkten, deren Koordinaten mit einer Standardabweichung von $\sigma=0,01\text{m}$ angegeben sind. Sie nehmen – ohne Zwang auf die Berechnung auszuüben – an der Berechnung teil und übernehmen hier die Rolle unabhängiger Kontrollpunkte.

Für die Fälle 1-3 werden so deren Residuen analysiert. In den Fällen 1, 2 und 3 liegen jeweils 106, 76 und 33 nicht verwendete Passpunkte vor. Da ihre Koordinaten mit $\sigma=1\text{cm}$ bekannt sind,

kann mit Hilfe der Residuen an den nicht verwendeten Passpunkten die Genauigkeit der einzelnen Bündelblockausgleichungen beurteilt werden.

Da die meisten Passpunktmarken gut signalisiert sind, wurde a priori die theoretisch maximal erreichbare Bildpunktmessgenauigkeit mit $1/3$ Pixel (σ) angenommen. Sie entspricht in der Bildebene einem Wert von $\sigma=2,4\mu\text{m}$ und in Bezug auf das Gelände $\sigma=6,6\text{cm}$. Die mit $\sigma=1\text{cm}$ angegebene Passpunktgenauigkeit liegt also um den Faktor 6,6 unterhalb dieser Grenze. Dadurch ist ihre Verwendung als unabhängige Kontrollpunkte gerechtfertigt.

Um die Passpunkte als Festpunkte in die Bündelblockausgleichung einzuführen, wurden ihre Koordinaten mit den Standardabweichungen a priori $\sigma=0,6\text{cm}$ (Fälle 2-4) bzw. $\sigma=2\text{cm}$ (Fall 1) definiert. Im Fall 1 war die Definition eines größeren Wertes notwendig, weil die Bündelblockausgleichung bei $\sigma=0,6\text{cm}$ grobe Fehler identifizierte, die sich aber nicht als solche verifizieren ließen. Bei $\sigma=2\text{cm}$ lief die Berechnung problemlos durch. Da dieser Wert immer noch um das Dreifache kleiner ist, als die theoretisch maximal erreichbare Bildpunktmessgenauigkeit (s.o.), gelten die Passpunkte auch in diesem Fall als „festgehalten“.

Alle 110 Passpunkte waren bei jedem Berechnungslauf in ein und derselben Eingabedatei gespeichert. Ihre Verwendungsart (als Passpunkt oder als Kontrollpunkt) wurde über die unterschiedlich definierten Standardabweichungen gesteuert. Anschließend wurden mit dem Programm ORIMA für alle Passpunkte die Residuen (RMS-Werte, RMS=root mean square) bestimmt. Passpunkte, die als Kontrollpunkte verwendet werden sollten, erhielten eine Standardabweichung a priori von $\sigma=500\text{m}$. Durch diese Einstellung wurde sichergestellt, dass die nicht verwendeten Passpunkte keinen Einfluss auf das Berechnungsergebnis hatten. Anschließend konnten die für sie berechneten Residuen als Qualitätsmaß verwendet werden. Die Ergebnisse sind in Abb. 1 dargestellt.

Die Daten der Absoluten Orientierung waren mit dem GPS/INS System AEROcontrol der Firma IGI (www.igi-systems.com) bestimmt worden. Da dessen Positionierungsgenauigkeit im Vorhinein nicht bekannt war, wurde für die Standardabweichung a priori der Objektkoordinaten der Projektionszentren ein Wert von $\sigma=0,5\text{m}$ eingestellt. Das entspricht einer mittleren bis hohen Systemgenauigkeit [KRAUS, 2004:168]. Die drei Raumwinkel ω , ϕ , und κ wurden nur als Näherungswerte, nicht als Beobachtungen verwendet.

808 Verknüpfungspunkte wurden mit ORIMA durch automatische Punktzuordnung generiert. Grobe Fehler waren zuvor mit Hilfe der in ORIMA implementierten Methoden zur automatischen Suche nach groben Fehlern eliminiert worden [HINSKEN, 2008:70 ff]. Für die nur noch mit zufälligen Fehlern behafteten Punkte wurde die bereits erwähnte theoretisch maximal erreichbare Bildpunktmessgenauigkeit angenommen ($\sigma=2,4\mu\text{m}$).

2.2 Ergebnisse

Die methodische Korrektheit der Bündelblockausgleichungen wurde mit der Erfüllung der folgenden Kriterien gewährleistet:

- SIGMA-0 a priori \approx SIGMA-0 a posteriori,
- Nichtauftreten von groben Fehlern (nur noch zufällige Fehler vorhanden),
- annähernde Kreisform der Fehlerellipsen (homogene Fehlerverteilung) und Zuverlässigkeit der Projektionszentren (gute Kontrolliertheit),
- zufällige Verteilung der Residuen der verwendeten Passpunkte (keine Systematik erkennbar).

Im Folgenden werden die Residuen (RMS-Werte) analysiert. Dabei wird zunächst der Mittelwert aller Residuen betrachtet, die zu einer Beobachtungsgruppe gehören. Tab. 1 zeigt die Ergebnisse der einzelnen Bündelblockausgleichungen.

Anzahl der verwendeten Passpunkte	Koordinate	RMS der verw. Passpunkte [m]	RMS der nicht verwendeten Passpunkte [m]	RMS der Kontrollpunkte [m]
Fall 1: 4 Passp.	X	0,012	0,030	0,599
	Y	0,008	0,039	0,594
	Z	0,003	0,109	0,503
Fall 2: 31 (1/3 Passp.)	X	0,001	0,026	0,599
	Y	0,001	0,028	0,582
	Z	0,000	0,076	0,525
Fall 3: 75 (2/3 Passp.)	X	0,001	0,032	0,599
	Y	0,001	0,040	0,580
	Z	0,000	0,072	0,517
Fall 4: 104 (alle Passp.)	X	0,001	-	0,600
	Y	0,001	-	0,580
	Z	0,000	-	0,519

Tab. 1: Übersicht der Ergebnisse der Bündelblockausgleichungen

Die RMS-Werte sind die Differenzen zwischen den ausgeglichenen und den ursprünglich gemessenen Werten (Beobachtungen). „Verwendete“ Passpunkte sind „festgehaltene“ Passpunkte. Sie sollen sich nicht bewegen. Daher sind die Werte in Spalte 1 nahezu Null. Spalte 2 gibt mit den mittleren RMS-Werten der nicht verwendeten Passpunkte Aufschluss über die Qualität des Ergebnisses. In der Lage sind die Werte kleiner als der theoretisch erwartete Wert von $\sigma=6,6\text{cm}$ (s.o.: theoretisch maximal erreichbare Bildpunktmessgenauigkeit). Eine Erklärung ist, dass die meisten Punkte in vier und mehr Bildern gemessen wurden und so ausreichend Überbestimmungen vorhanden sind. Das erhöht die Genauigkeit. In Z sind die Werte ungefähr um den Faktor 2 größer als in der Lage. Hierfür liefert das Basis-Höhenverhältnis von 1/3,9 die Erklärung (mittlere Basislänge $\sim 750\text{m}$, mittlere Flughöhe über Grund $\sim 2900\text{m}$) [KRAUS, 2004:31]. Spalte 3 zeigt die RMS-Werte der Kontrollpunkte. Gut zu sehen ist, dass die ursprünglichen Koordinaten systematisch um einen halben Meter verfälscht wurden.

Wie bereits erwähnt, werden die nicht verwendeten Passpunkte als Kontrollpunkte für die Beurteilung der Genauigkeit der Bündelblockausgleichungen verwendet. Da es für den Fall 4 keine nicht verwendeten Passpunkte gibt, kann dieser nicht betrachtet werden. Die RMS-Werte der X- und Y-Koordinaten der nicht verwendeten Passpunkte betragen ca. 0,04m für die Fälle 1, 2 und 3. Die RMS-Werte der Z-Koordinaten sind größer und nehmen Werte von 0,08m bis 0,10m an. Hier nimmt die Genauigkeit mit steigender Anzahl verwendeter Passpunkte zu. Vermutlich liegt die Ursache darin, dass die geometrische Stabilität des Gesamtblocks mit zunehmender Passpunktanzahl gesteigert wird. Insgesamt bleibt anzumerken, dass die Genauigkeit in Z-Richtung relativ am geringsten unter allen Koordinatenrichtungen ist. Absolut ist sie aber immer noch hoch. Zum Vergleich: sie liegt in der Größenordnung eines halben Pixels.

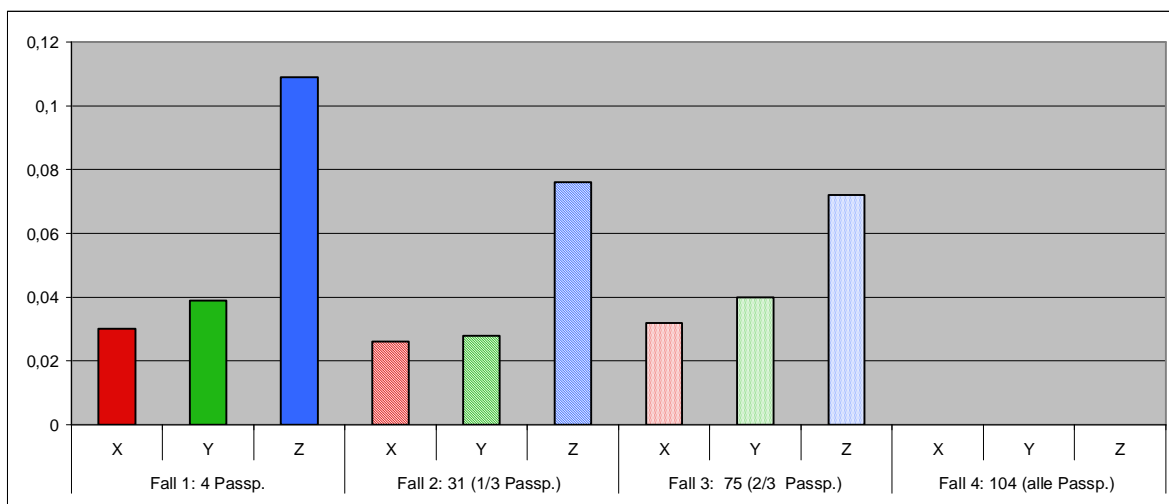


Abb. 1: RMS-Werte für die als Kontrollpunkte verwendeten Passpunkte für die Fälle 1-3 in Metern

Da die RMS-Werte nur Mittelwerte sind, lässt sich anhand der RMS-Werte keine Aussage über die maximalen Abweichungen treffen. Dies ist jedoch mit einer Histogrammanalyse möglich (LINKIEWICZ, 2009). Dort wurde gezeigt, dass die maximalen Abweichungen der nicht verwendeten Passpunkte bei den X- und Y-Koordinaten unter 0,15 m und bei den Z-Koordinaten unter 0,25 m liegen.

2.3 Bewertung der Ergebnisse

Es kann festgestellt werden, dass mit der UltraCam X bei einer Befliegung mit einer geometrischen Auflösung von 20cm eine Punktbestimmung erreichbar ist, die auch noch im ungünstigsten Fall einer Passpunktconfiguration bestehend aus nur 4 Passpunkten in der Lage eine Genauigkeit im Subpixelbereich liefern kann. In der Höhe ist die Genauigkeit aufgrund des Basis-Höhenverhältnisses von 3,9 um den Faktor 2 schlechter. Dies darf als sehr gutes Ergebnis gelten.

Auf der anderen Seite ist es wichtig zu sagen, dass für Praxisprojekte die Querüberlappung eines Blocks in der Regel geringer als ~70% ist und nicht in jedem Fall Querstreifen vorhanden sind. Die vorliegende Blockconfiguration entspricht daher einer Idealkonfiguration, die in der Praxis nicht immer gegeben ist. Unter Umständen ist zu erwarten, dass unter ungünstigeren Bedingungen mit gewissen Abstrichen hinsichtlich der erreichbaren Genauigkeit in Lage und Höhe gerechnet werden muss. Dem nachzugehen könnte Gegenstand einer weiterführenden Untersuchung sein, die die Abhängigkeit zwischen verschiedenen Blockconfigurationen und erzielbaren Genauigkeiten analysiert.

3 Literaturverzeichnis

- ALBERTZ, J. (2007): Einführung in die Fernerkundung. 3. akt. u. erw. Auflage. Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt, 254 S.
- CRAMER, M.; KRAUß, H.; JACOBSEN K.; SCHÖNERMARK VON, M.; HAALA, N. & SPRECKELS, V. (2009): Das DGPF-Projekt zur Evaluierung digitaler photogrammetrischer Kamerasysteme. DGPF-Band 18 zur Tagung vom 24.-26. März 2009 in Jena. S. 9-21.
- HINSKEN, L. (2008): CAP-A Combined Adjustment Program. Handbuch zur Software ORIMA. Erdas Inc., Atlanta USA. 130 S. (als PDF-Datei Teil der Softwareinstallation)
- KRAUS, K. (2004): Photogrammetrie – Band 1 – Geometrische Informationen aus Photographien und Laserscanneraufnahmen. 7. Auflage, Walter de Gruyter Verlag, Berlin. 516 S.
- SANDAU, R. (Ed.) (2010): Digital airborne Camera. Introduction and Technology. Springer, Dordrecht, 343 S.
- LINKIEWICZ, M. (2009): Evaluierung des digitalen photogrammetrischen Luftbildkameranagements UltraCam X der Firma Vexcel Imaging GmbH. Bachelorarbeit an der Beuth-Hochschule für Technik Berlin. 47 Seiten und 1 CDROM. (unveröffentlicht)

Neue luftgestützte Sensoren und Plattformen für verschiedenste Aufgaben in der Fernerkundung

GERHARD KEMPER¹

Zusammenfassung: Eine große Zahl kleinerer und mittlerer Sensoren ist in den letzten Jahren auf den Markt gekommen. Heutige mittelformatige Kameras erreichen 60 Megapixel und ermöglichen den Einsatz auch von mittleren Projektgrößen. Neben den Standardprodukten (z. B. Hasselblad, Capture One, Sinar...) wurden diese auch für photogrammetrische Anwendungen optimiert (z.B. Alpa, Trimble, Dimac...). Photogrammetrische Auswertungen sind damit mittlerweile weit verbreitet, sei es in Kombination mit weiteren Sensoren insbesondere Lidar, oder aber als eigenständige Luftbildanwendung. Die Möglichkeit, hierzu kompakte Trägersysteme und Plattformen zu verwenden wird nachfolgend vorgestellt. Die Kombination mehrerer Sensoren ermöglicht kostengünstig und effizient multispektrale oder gar hyperspektrale Anwendungen. Beispiele hierfür sind ökologisches Monitoring, Forstapplikationen oder auch Anwendungen für die Landwirtschaft (Projekt AirAgro). Für solche Anwendungen sind heute geeignete Flugführungssysteme und stabilisierte Plattformen erhältlich welche auch in Kleinflugzeugen Anwendung finden. GPS und IMU zur direkten Bildorientierung kann ebenfalls integriert werden was das Daten-Processing signifikant erleichtert und teilsautomatisch drastisch beschleunigt. Auch die Thermographie erlebt heute eine „Wiedergeburt“ wobei automatisierte Ansätze der Photogrammetrie die Bearbeitung der zahlreichen Daten erleichtert. Nachfolgend sollen einige Sensoren, Plattformen und Anwendungen das Anwendungsspektrum in heutiger Praxis darstellen.

1 Ballon und Blimb-Anwendungen

Transportabilität, Kosten und Flexibilität in der Anwendung besonders für die Archäologie waren die Rahmenfaktoren für die Ballonphotogrammetrie des Projektes Patara (Türkei) und Akropolis Athen (Griechenland). In beiden Fällen war Ziel die photogrammetrische Aufnahme und Auswertung historischer Objekte, in Patara das lykische Theater und in Athen die Akropolis. Die GSD betrug jeweils etwa 0.5-2 cm. Hierfür wurden kalibrierte Klein- bzw. Mittelformatkameras eingesetzt und „gefesselt“ via Heliumballon über das Zielobjekt geführt. In beiden Fällen wurde die Kamera kardanisch aufgehängt um sie möglichst senkrecht zu stabilisieren. Ein Heliumballon diente dabei als Trägersystem. In „Patara“ wurde eine kalibrierte 4 MPix Olympus Kompaktkamera eingesetzt und über Kabel fern ausgelöst. Über einen angeschlossenen Monitor wurde das Sucherbild zum Operateur übertragen und der Ballon visuell zum Zielpunkt geführt. Bei der Anwendung für die Akropolis wurde eine digitale Rollei 6008 Mittelformatkamera mit GPS und einem Release-Event Regler verbunden. Über eine Wide-Range-Bluetooth Verbindung kommunizierte so die Kamera und GPS mit dem Notebook, auf dem eine modifizierte Flugführung installiert wurde. So konnte die Kamera zu geplanten Zielpunkten geführt und dann ausgelöst werden. Der Auslöseimpuls wurde dann als GPS

1) Gerhard Kemper, GGS GmbH, Kämmererstr. 14, D-67346 Speyer, E-Mail: kemper@ggs-speyer.de

Position festgehalten auf einer Moving Map dargestellt. Zusätzlich konnte die Kamera ferngesteuert gedreht werden. Damit wurde der Kappa Winkel korrigiert.



Abb. 1: Ballonphotogrammetrie auf der Akropolis Athen in Griechenland.

Abb. 2: He-Blimp der Universität Beijing mit Gondel, welche eine stabilisierte Kameraplattform und eine digitale Mittelformatkamera beherbergt.



Ebenfalls kardanisch unter einem He-Ballon aufgehängt wurde ein Radiometer betrieben, der im Rahmen einer Ground-Truth-Überwachung in Portugal zum Einsatz kam. Der Radiometer-Scanner erfasste fortlaufend die Oberflächentemperatur eines Segmentes. Die Datenkommunikation erfolgte hier via DECT-Modem. Es wurden auch verschiedene Profile gemessen, hierzu wurde der Ballon schrittweise über Transekte des Untersuchungsgebietes bewegt.

Eine vierte Applikation wurde mit der Universität in Beijing umgesetzt. Es ging hierbei um fast klassische Luftbildprojekte um die Stadtentwicklung in China zu dokumentieren und zu vermessen. Die Universität Beijing entwickelt und produziert HE-Luftschiffe, besser gesagt HE-Blimps, die vom Boden aus ferngesteuert werden. In einer Testreihe wurde bereits eine stabilisierte Kameraplattform eingesetzt (AeroStab-1 der Firma GGS) und eine Rollei Metric AIC Luftbildkamera. Über die Funkverbindung wurden die GPS-IMU Daten zur Navigation and das Flugführungssystem AeroTopoL übertragen und von oder die Steuerbefehle an die Geräte in der Gondel unterhalb des Blimp zurückgesandt. Der „Pilot“ musste wie ein richtiger Flugzeugpilot nun nur anhand der Flugführung (AeroTopoL) das Luftschiff auf Kurs halten damit die Bilder automatisch ausgelöst wurden.

2 Trikes und Paratrikes

Mit zu dem kleinsten bemannten Fluggeräten zählen Trikes und Paratrikes. Paratrikes, auch Motorgleitschirme genannt, sind eigentlich Gleitschirme mit einem Fahrgestell und Motor. Diese sind als Ein- und Zweisitzer erhältlich. In einer solchen Applikation wird sogar die Kombination SLR Kamera und Laserscanner mit direkter Orientierung eingesetzt. Hierzu wurde ein Laserscanner von Riegl plus AeroDiDOS zur Direkten Referenzierung und zur Steuerung der Kamera verwendet. AeroTopoL dient hierbei als Flugführung zur automatischen Steuerung beider Sensoren simultan. Das System kommt für archäologische Anwendungen zum Einsatz. Das nächst größere Fluggerät sind sogenannte Trikes, eigentlich Delagleiter mit Gondel und Motor. Diese sind meist als Zweisitzer auf dem Markt. Ein solche im Routinebetrieb befindliche Applikation ist beim Bureau for Surveying and Mapping der Provinz Hebei / China vorhanden. Hier wird eine Rollei AIC 39 Megapixelkamera zusammen mit der gyrostabilisierten Plattform AeroStab-2 eingesetzt. Auch hier dient AeroTopoL als Flugführung.



Seit 2006 fliegt dieses Landesvermessungsamt regelmäßig Projekte um die Stadtentwicklung in Karten fortzuschreiben. 2008 wurde das System auch zur Erfassung der Erdbebenschäden eingesetzt da es schnell verfügbar, leicht zu transportieren und auf kurzen Rasenflächen starten und landen kann.

Abb. 3: Trike des „Landevermessungsamt“ der Provinz Hebei / China



Abb. 4: Mittelformatkamera auf der gyrostabilisierten Plattform AeroStab-3

Die Projekte wurden mit Pilot und Operator durchgeführt und erfolgten analog zu klassischen Luftbildbefliegungen mit entsprechender Planung und „Zielführung“. Selbst die relativ ungenauen Werte der gyrostabilisierten Plattform (X,Y,Z in etwa 1-2 m, Roll-Pitch-Heading bei etwa 0.5-1 Grad) ermöglichten eine automatische Bildverknüpfung mit

anschließender Aerotriangulation. Eine Stereoauswertung wurde analog zu klassischen großfor-

matigen Bildern durchgeführt und Autokorrelationen zur Erhaltung von Höhenpunkten. Es wurden auch Orthophotomosaik und True-Orthophotos gerechnet. Damit kann dieses System als praxistauglich gelten, natürlich mit Einschränkungen in Geschwindigkeit, Reichweite und Flughöhe. Andererseits können auch größte Bildmaßstäbe ohne FMC realisiert werden da die Mindestgeschwindigkeit eines Paratrikes bei nur 60 km/h liegt. Die Pendelbewegung der Gondel hingegen ist groß und zahlreiche Schieb-Bewegungen sind festzustellen. Ohne Kamerastabilisierung sind Bildflüge daher kaum möglich.

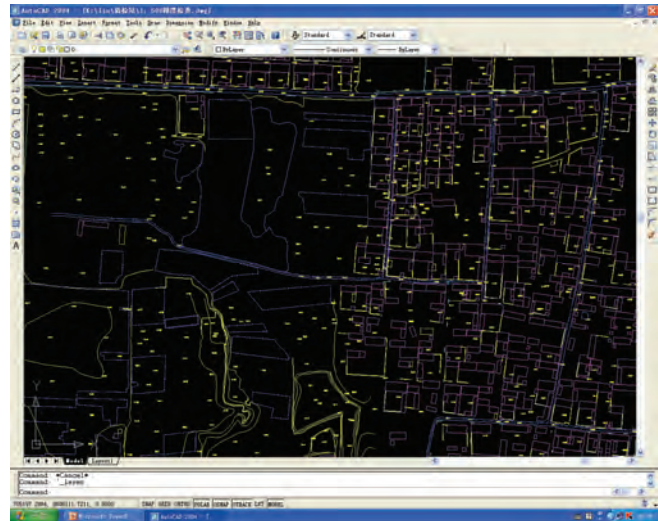


Abb. 5: Orthophoto-Mosaik für den Maßstab 1:500

Abb. 6: Digitale Karte im Maßstab 1:2.000 basierend auf einer GSD von 10 cm

3 Experimental und Ultraleichtflugzeuge

Diese Flugzeugklassen besitzen eine enorme Vielfalt an Fluggeräten, von einfachen Selbstbausystemen bis zu ausgewachsenen Flugzeugen die in Ausstattung und Leistung denen der Eclass identisch sind. Mehrere Firmen nutzen diese Fluggeräte da hier Veränderungen und Anpassungen ohne größere Probleme möglich sind. Ein Selbstbauflugzeug einer kleinen Chinesischen Firma wurde bereits für den Einsatz für Fotoflüge modifiziert und besitzt zwischen Piloten- und Operatorsitz (die Sitze sind hintereinander) eine entsprechende Öffnung für Kamera samt Plattform. Der Operator hat damit das gesamte Equipment vor sich und die Flugführung auf dem Notebook. Der Pilot wird mittels Pilotenscreen mit den notwendigen Informationen versorgt.



Der Pilot wird mittels Pilotenscreen mit den notwendigen Informationen versorgt.

Abb. 7: Eigenbaukonstruktion eines „Entenflüglers“ einer chinesischen Firma mit Ausstattung für Fotoflüge



Abb. 8: Experimental Flugzeug der Firma Pauly Luftbildfotographie. Die Kamera samt Plattform wurde am Flugzeug seitlich in einer GFK Box angebracht.

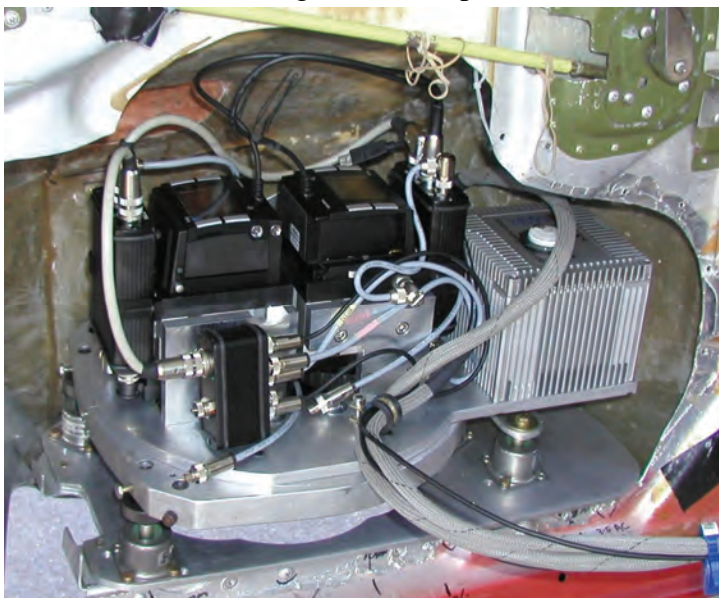
Bei dieser Flugzeugklasse sind vor allem die Flugeigenschaften ausschlaggebend für die

Eignung als Bildflug-System. Einige Fluggeräte sind durchaus instabil und erst bei höheren Geschwindigkeiten für präzises Streifenfliegen geeignet. Dies schränkt natürlich die Möglichkeiten für große Bildmaßstäbe ein. Hochdecker mit hohen Flügelprofilen können dagegen langsam und dennoch stabil auf der Linie die Bildpunkte anfliegen und auslösen.

So wurden mit der Firma Pauly und dessen Experimental Flugzeug verschiedene Testbefliegungen durchgeführt und in Kooperation mit der Universität Düsseldorf ausgewertet. Auf der „Dahlemer Binz“ wurde hierfür auch ein Passpunktfeld eingerichtet und Bildflüge bis GSD 5 cm durchgeführt.

4 Klassische Flugzeuge und deren Träger und Sensoren

Eines der meist eingesetzten Flugzeuge ist die Cessna 175, 206 und 210, die weltweit immer irgendwo anzutreffen sind. Diese lassen sich auch fast überall chartern und zum Teil sind diese Flugzeuge bereits mit Bodenlöchern ausgestattet. Ohne Bodenluke werden aber auch andere Installationen notwendig, so zum Bsp. bei der 2-Kameralösung für den IR und RGB Bereich mit



direkter Orientierung. Aufgabenstellung war das Monitoring des Algenwachstums (speziell der Grün- und Blaualgen) in Australien. Ohne eine ausreichende Anzahl von Passpunkten war die Erstellung eines Orthophotomosaiks nur mittels hochgenauer Bestimmung der Projektionszentren und der Drehwinkel möglich.

Abb. 9: Installation von 2 Mittelformatkameras samt AeroDiDOS (hier FSAS IMU) zur Direkten Orientierung in der Tür einer Cessna 210)

Beide Kameras (Rollei AIC P45 IR und RGB) wurden zusammen mit der FSAS IMU auf einer mechanischen Driftkompensation in der Türverkleidung installiert. Die Flugzeugtür bekam dadurch eine Beule was aber bei der ohnehin mäßigen Aerodynamik einer Cessna 210 wenig ins Gewicht fällt. AeroDiDOS, AeroTopoL und ein anschließendes fast vollautomatisches Datenprocessing liefern Orthophotodaten in ausreichender Qualität um die Wasserversorgung und ökologische Beurteilung der

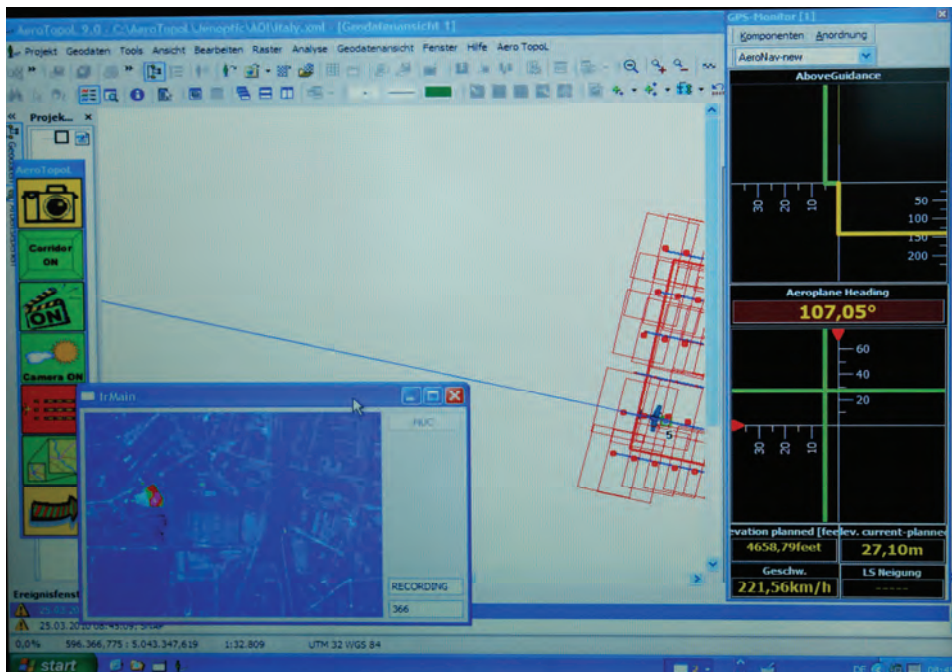


Gewässer sicherzustellen. Eine andere Lösung wurde für das Coca-Monitoring in Bolivien gefunden. Dieses Flugzeug hatte ein einziehbares Fahrwerk und damit keine Möglichkeit, eine Bodenöffnung herzustellen. So wurde kurzerhand die Gepäckfachtüre ausgebaut und Kamera samt AeroStab-Plattform in ein außen liegendes Gehäuse untergebracht.

Abb. 10: Außen liegendes Kameragehäuse in Bolivien für das Coca-Monitoring

5 Thermographie

Die Firma Jenaoptronic entwickelt neben der bekannten Luftbildkamera JAS auch eine Thermale Infrarotkamera für luftgestützte Anwendungen. Diese Kamera „JAIR“ wurde tief mit der stabilisierten Plattform AeroStab-3 und dem Flugführungssystem AeroTopoL integriert. Thermalkameras arbeiten im Bereich des Thermischen Infrarot und können somit Wärme-



strahlung detektieren. Neben der Messung der Emission langwelliger Wärmestrahlung sind damit aber auch sekundäre Effekte, wie die der Verdunstungswärme usw. messbar.

Abb 11: Flugführung AeroTopoL und Erfassungsprogramm IR Main mit Livebild

Heute gibt es verschiedenste Anwendungen, neben der Gebäudeüberwachung auch im Bereich der Landwirtschaft, der Ökologie, der Hydrologie und auch der Hydrographie z.B. durch Messen der Wasserströme. Thermalkameras besitzen leider eine sehr geringe geometrische Auflösung, mit 640*480 Pixel ist schon das Maximum der ungekühlten Systeme erreicht. Zwar sind Auflösungen von 0.3-1 m für die meisten Fälle ausreichend, dennoch werden bei großen Flächen entsprechend viele Bilder erzeugt die es auch effizient zu verarbeiten gilt. Thermalkameras arbeiten eigentlich wie Videokameras, d.h. es werden an entsprechenden Stellen Bilder aus dem Datenstrom herausgenommen. Die Kamera wird über eine eigene Software via Firewire bedient, dadurch ist ein Echtzeitbild verfügbar. Auf dem gleichen Computer kann aber auch die Flugführung betrieben werden. Via TCP-IP kommunizieren beide Programme miteinander und das hier adaptierte Flugführungssystem AeroTopoL triggert die Software welche dann Bilder aus dem Datenstrom herausnimmt. Gleichzeitig bedient die Flugführung das Datenhandling, d.h. die Bilder werden unter entsprechenden Namen der Flugplanung abgelegt und damit die Synchronität zu den Reportdaten der Flugführung garantiert. Ferner werden jeweils am Streifenbeginn Befehle zur Kalibration der Kamera übermittelt.

Mit dieser Integration stehen auch Orientierungsdaten für das automatische Matching zur Verfügung. Durch die geringe Bildgröße und 16 Bit Graustufen ist dies jedoch nicht ganz problemlos. Dennoch ist die Datenverarbeitung unter Nutzung möglichst vieler Automatismen der einzige Weg, die enorme Bildmenge zu bewerkstelligen. Gute Ergebnisse wurden mit dem Programm PhoTopoL erreicht. Weitere Entwicklungsziele sind die Integration von 2 oder 3 Kameras parallel und die Nutzung der neuen AeroStab-Twin Plattform, die neben den Kameras auch das hochgenaue GPS-IMU System AeroDiDOS tragen kann. Damit sollte die Zahl der notwendigen Flugstreifen minimiert werden und der Workflow dramatisch besser werden.

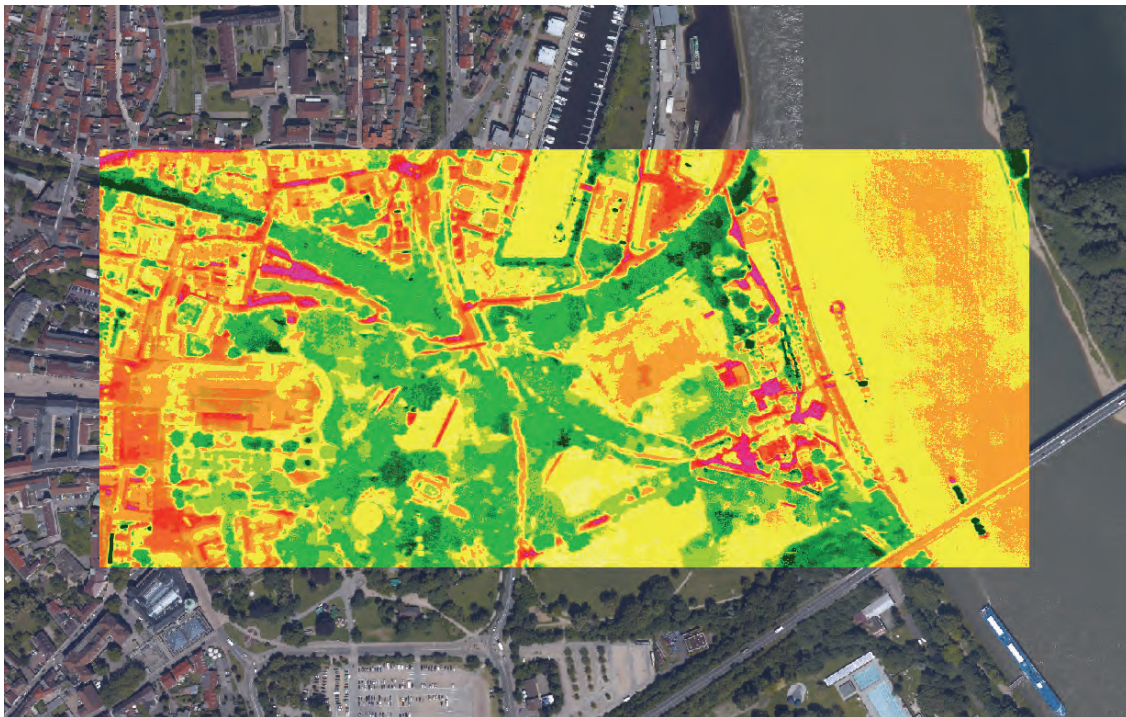


Abb 12: Beispiel eines ThIR Orthomosaiks überlagert über ein Orthomosaik der Testfläche in Speyer

6 Multispektrale Applikation – AirAgro

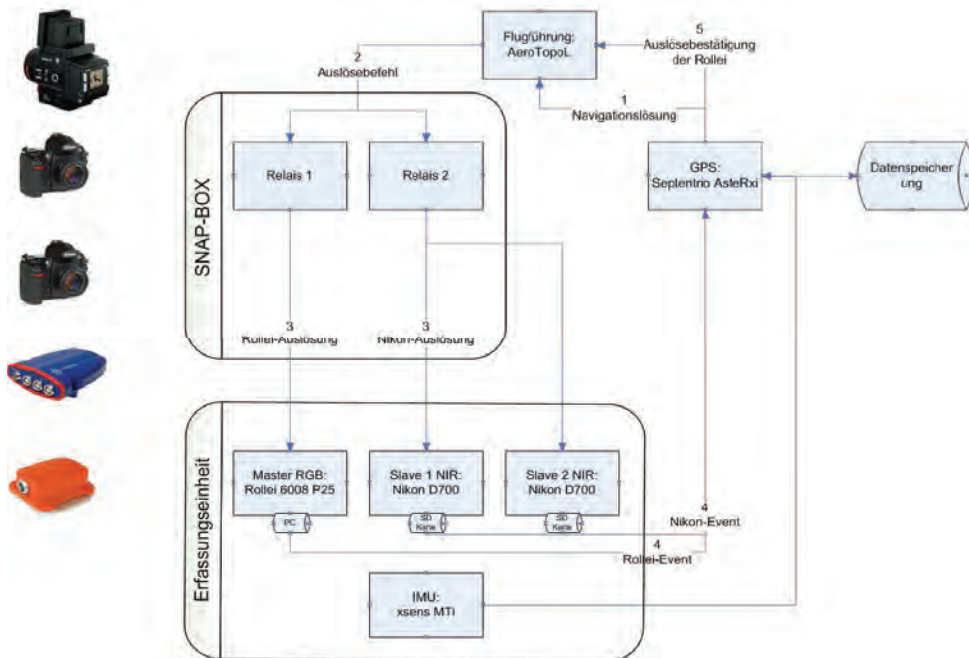


Abb.13:

Integrationschema der Technik für das Projekt AirAgro

Eine neue Applikation wurde mit der Kombination einer RGB Mittelformatkamera und von 2 IR Kameras entwickelt. Im Forschungsprojekt AirAgro geht es speziell um das Monitoring von landwirtschaftlichen Flächen via luftgestützter Systeme. Preiswerte Technik und kostengünstige flexible

Trägersysteme spielen hierfür eine entscheidende Rolle. Als Masterkamera dient hierbei eine Rollei P25 ergänzt durch 2 auf IR Bereich sensibilisierte Nikon D700 Kameras, welche 2 Wellenlängenbereiche um das „Rededge“ abdecken. Über genaue Projektionszentren mittels L1 GPS und etwas ungenauere Rollwinkelmessung einer „loosely coupled“ MEMS-IMU soll das Datenprocessing automatisiert werden. Dabei dienen die RGB Daten als Master an dessen Bildorientierungen die IR-Kameras unter Berücksichtigung der Offsetwerte angelehnt werden.

7 Literaturverzeichnis

- KEMPER, G., ALTAN, O., CELIKOYAN, M., TOZ, G., (2003): Ballonluftbild- und GIS-basierte photogrammetrische Auswertung kulturhistorischer Objekte in Patara / Türkei. Angewandte Geographische Informationsverarbeitung IX – Agit 2003, Wichmann, Heidelberg
- KEMPER, G., (2006): New airborne Sensors and Platforms for solving experimental Applications in Photogrammetry and Remote Sensing. Fifth International Symposium “Turkish-German Joint Geodetic Days”, Berlin.
- KEMPER, G. (2006): Spezialapplikationen in der luftgestützten Fernerkundung- Preiswerte Systeme, Plattformen und Trägersysteme– Angewandte Geographische Informationsverarbeitung XII – Agit 2006, Wichmann, Heidelberg
- CAO LI, LI HONGBO, KEMPER, G. (2008): Monitoring urban development of small Chinese cities using innovative aerial surveying technologies; Proceedings of the ISPRS Congress 2008 in Beijing
- KEMPER, G., LI HONGBO, PAULY, K. † (2008): New airborne Sensors and Platforms for specific applications in Photogrammetry and remote sensing; Proceedings of the ISPRS Congress 2008 in Beijing
- Hine, D., Kemper, G., Pivnicka, F., Li Hongbo (2008): Innovation in Flight Management Systems using real-time topological GIS Analysis; Proceedings of the ISPRS Congress 2008 in Beijing.
- VASEL, R., KEMPER, G., SCHUHMAN, R., KÖNIGER, F. (2008): New airborne Thermal Infrared photogrammetric applications and sensors for moisture detection; Proceedings of the ISPRS Congress 2008 in Beijing.

Kalibrierung und Validierung von Fernerkundungssensoren und -daten (ISO/TS 19159)

WOLFGANG KRESSE¹

Zusammenfassung: Im Herbst 2009 wurde die Technische Spezifikation "Calibration and validation of remote sensing imagery sensors and data" (ISO/TS 19159) als Normungsprojekt bestätigt, so dass nun im Zeitraum bis 2014 alle notwendigen Arbeiten erledigt werden müssen, vor allem die Konsensbildung und die Erarbeitung des Dokuments selbst. Wesentliche Grundlagen für die Norm wurden von der Gruppe EuroDAC² (European Digital Camera Certification) und CEOS (Committee on Earth Observation Satellites) gelegt. Besonders für digitale Luftbildkameras und das flugzeuggestützte LIDAR gibt es konkrete Vorschläge für die zu normenden Inhalte. Abhängig von weiteren Zuarbeiten kann der Umfang der Norm auf Thermalkameras, Multi- und Hyperspektralkameras, SAR/InSAR, SONAR (Tiefenmessung im Meer) und satellitengestützte Systeme ausgedehnt werden. Der Bedarf an der Norm wurde vor allem von den Sensorherstellern geäußert. Das Normungsprojekt ist beim ISO/TC 211 "Geographic information / Geomatics" angesiedelt. Der Beitrag berichtet vom Stand der Arbeiten.

1 Einleitung

Seit mehreren Jahren war eine ISO-Norm für die Kalibrierung und Validierung von Fernerkundungsdaten im Gespräch. Aber erst im Herbst 2009 fiel der Startschuss. Im Nachhinein mag man über die Gründe für den späten Start spekulieren. Eine Rolle dürfte die noch junge Technik gespielt haben. Erst im Jahre 2000 kamen die ersten operationellen digitalen Luftbildkameras auf den Markt. Bis umfassende Erfahrungen gesammelt waren, dauerte es weitere Jahre. Ein zweiter Grund dürfte in der Normung selbst zu suchen sein. Die Normung für die Geoinformatik begann 1994 mit der Gründung des ISO/TC 211 "Geographic information / Geomatics". Danach dauerte es über ein Jahrzehnt, bis die wesentlichen Basisnormen fertig gestellt waren. Erst danach hat sich das Technische Komitee 211 der Photogrammetrie und Fernerkundung zugewandt. In dieser Phase ist beispielsweise die ISO/TS 19101-2 "Reference model – Part 2: Imagery" entstanden. Diese ist eine wesentliche Grundlage für die jetzt in Entwicklung befindliche ISO/TS 19159 "Calibration and validation of remote sensing imagery sensors and data", kurz die KalVal-Spezifikation.

Die neuen digitalen Kameras haben sehr viele Eigenschaften, die bei analogen Kameras unbekannt waren. Als Beispiele seien die große Dynamik der Radiometrie, die Mehrkamerasystemkopfsysteme und die hohe geometrische Auflösung (geringe GSD, Ground Sampling Distance) einiger optischer satellitengestützter Kameras genannt. Darüber hinaus haben ganz neue Sensortypen den Markt erobert, zum Beispiel das Airborne Laser Scanning (ALS) und die flugzeuggestützten Zeilenkameras.

Zu alledem existiert heute eine unüberschaubare Vielfalt von Systemanbietern mit ganz unterschiedlichen technischen Lösungen, die einen Qualitätsvergleich der erzeugten Daten sehr erschweren.

1) Wolfgang Kresse, Hochschule Neubrandenburg, Brodaer Straße 2, 17033 Neubrandenburg; E-mail: kresse@hs-nb.de

Die aktuelle Situation verlangt nach einer Internationalen Norm für die Kalibrierung und Validierung.

2 ISO/TS 19159, KalVal-Spezifikation

2.1 Anwendungsbereich

Die ISO/TS 19159 wurde im November 2009 bestätigt und muss daher vor Ende 2014 fertig gestellt sein. Die Norm wird als Technische Spezifikation veröffentlicht. Das bedeutet, dass innerhalb der ISO im Vergleich zu einer Internationalen Norm ein etwas vereinfachtes Abstimmungsverfahren durchlaufen werden kann, jedoch schon nach drei Jahren das Dokument erneut bestätigt werden muss.

Der Anwendungsbereich der Norm bestimmt das Arbeitsfeld der Projektgruppe. Die ISO/TS 19159 befasst sich mit der Kalibrierung und Validierung von flugzeug- und satellitengestützten Fernerkundungssensoren und den von ihnen erfassten Daten, die optischen Systeme eingeschlossen. Der Begriff Kalibrierung umfasst die Geometrie und die Radiometrie und schließt Labor- und Feldmethoden ein. Die ISO/TS 19159 wird auch jene zugehörigen Metadaten enthalten, die noch nicht in den anderen ISO-Normen der Geoinformatik definiert wurden.

In der Projektgruppe herrscht die Auffassung vor, dass der Begriff "Imagery Sensors" (bildgebende Sensoren) recht großzügig auszulegen ist und Airborne Laser Scanning (ALS) und SONAR (Tiefenmessung im Meer) einschließt.

2.2 Abriss

Zusammen mit der Aufforderung zur Abstimmung wurde ein Abriss über die geplante Technische Spezifikation verschickt. Da dieser Überblick der Dokumentvorlage der ISO folgte, seien hier nur die Besonderheiten der KalVal-Spezifikation dargestellt.

Aus der Erkenntnis heraus, dass eine eindeutige Terminologie die Voraussetzung für eine gute Norm ist, wurden als erstes das Kapitel 4 "Terms and definitions" aufgebaut. Es enthält mehr als 100 Begriffe aus den ISO Guides 98 und 99, aus anderen Normen der ISO 19100-Serie, aus CEOS-Dokumenten und aus einer nicht offiziellen Übersetzung der DIN 18740-4 "Anforderungen an digitale Luftbildkameras und an digitale Luftbilder".

Das Kapitel 6 "Calibration" besitzt bislang nur Entwurfscharakter und enthält Titel für Teilgebiete, für die eine Normung sinnvoll sein könnte:

Geometrie	Kalibrierung für Flächen- und Zeilenkameras
	Kalibrierumgebung: Labor, Testfeld
	Wellenlängenabhängige Aspekte: sichtbares Licht, Infrarot usw.
	Zeitabhängige Aspekte: Kalibrierdatum, zeitabhängige Parameter, Raketenstart
Radiometrie	Art der Kalibrierung: absolut oder relativ
	Referenzstandard

Das Kapitel 7 "Validation" besitzt einen allgemein gehaltenen Titel, der konkretisiert werden muss, sobald der Inhalt schärfer umrissen ist. Der Begriff Validierung besitzt je nach Anwendungsfeld ganz unterschiedliche Bedeutungen. In der Fernerkundung versteht man darunter meistens die Überprüfung von Datenprodukten, z.B. eines Höhenmodells, anhand der gemessenen Originalgrößen, z.B. Grauwerten, und des benutzten Instrumentariums, z.B. der Kamera. Validierung wird auch eingesetzt, um die richtige Funktionsweise von Software, der in ihr implementierten Algorithmen oder der zugrunde liegenden funktionalen Modelle zu überprüfen.

In den ersten Diskussionen der Projektgruppe wurde der Wille zu einem vorsichtigen Umgang mit dem Begriff Validierung deutlich. Er soll nicht im oben genannten Sinne interpretiert werden, sondern ausschließlich für die Überprüfung von Daten einer weiter zurückliegenden Kalibrierung Verwendung finden.

Der Anhang A "Conformance and testing" legt das Prozedere fest, mit dem die Normgerechtigkeit einer Implementierung überprüft wird. Dieser Anhang wird zuletzt geschrieben.

Der Anhang B "Metadata" ist normativ und wird die Metadaten enthalten, die woanders noch nicht definiert wurden.

Der Anhang C "Level definitions for Earth Observation products" ist normative und enthält, wenn ein Konsens gelingen sollte, genormte Produktlevel für Datenprodukte der in der Technischen Spezifikation behandelten Sensoren.

Der Anhang D "Approach for certification" ist nicht normativ und wird alle Aspekte enthalten, die mit einer Zertifizierung in Zusammenhang stehen.

Die Zertifizierung selbst kann nicht Gegenstand der Normung sein, denn die Rolle der ISO beschränkt sich auf die Definition der Regeln, nach denen später eine Zertifizierungsagentur die Zertifizierung vornehmen kann. In der Vergangenheit war die Zertifizierung von Luftbildkameras meist national organisiert und aus Gründen der Praktikabilität den Kalibrierlaboren der Kamerahersteller übertragen. In der heutigen Zeit sollte die Kalibrierung international organisiert werden. Genau diesen Ansatz unterstützt die KalVal-Spezifikation.

2.3 Projektgruppe

Der Inhalt einer Norm wird von den Mitgliedern der Projektgruppe gemeinsam entwickelt. Bei der Bestätigung der Norm hatten im Jahre 2009 22 der beteiligten 32 nationalen Normungsorganisationen die Wichtigkeit des Vorhabens unterstrichen. Neun der nationalen Organisationen haben zusätzlich ihre Mitarbeit in der Projektgruppe durch Benennung eines Experten zugesichert. Inzwischen hat sich die Gruppe noch etwas erweitert. Die folgende Tabelle stellt links die Herkunft der Normungsorganisation, in der Mitte die Arbeitsstelle oder den interessierten Kreis und rechts das Thema der zu erwartenden Fachbeiträge dar. Da aus ihrer Benennung nicht immer das genaue Arbeitsgebiet der Experten hervorgeht, müssen einige Felder leer bleiben.

China		
Deutschland	EuroSDR, ISPRS	Flugzeuggestützte Kameras
Finnland	Finish Geodetic Institute	Radiometrie, Geometrie
Frankreich	Université de Provence	

Frankreich	IGN	RADAR
Italien		
Japan	Luftbildfirma	Flugzeuggestützte Kameras
Japan	Universität	
Kanada	Canadian Hydrographic Service	SONAR
Kanada	University of Calgary	LIDAR
Monaco	IHO	SONAR
Thailand		
USA	George Mason University, CEOS	Satellitengestützte Kameras
USA	USGS, FIG	Flugzeug- und satellitengestützte Kameras

Aus der Tabelle lässt sich immerhin ablesen, dass die ISO/TS 19159 wahrscheinlich flugzeug- und satellitengestützte Kameras, sowie LIDAR, RADAR und SONAR beinhalten wird.

EuroSDR ist die Abkürzung von European Spatial Data Research und bezeichnet eine europäische Forschungsgruppe, die etwa 20 Länder vertreten durch ihre Landesvermessungsverwaltungen und eine oder mehrere Forschungsinstitute, vor allem auf dem Feld der Photogrammetrie und Fernerkundung, bezeichnet. EuroSDR besteht aus mehreren Kommissionen und Gruppen, deren für die zu entwickelnde Norm wichtigste die Kommission 1 "Sensors, Primary Data Acquisition and Georeferencing" und die "Inter-Commission Working Group on Standards" sind. Innerhalb von EuroSDR existiert EuroDAC² (European Digital Airborne Camera Certification), eine kleine im Jahr 2007 eingerichtete Expertengruppe, die zielgerichtet die Interessen von Forschung und Industrie bündelt.

Das Finish Geodetic Institute ist eine weltbekannte geodätische Forschungsstätte, die im Rahmen des Themas wichtige Grundlagen für die Behandlung der Radiometrie gelegt hat.

Der kanadische Hydrographische Dienst (Canadian Hydrographic Service, CHS) verwaltet eine der längsten Küstenlinien der Welt. Der CHS wird seine Erfahrung in der Erhebung und Modellierung hydrographischer Daten einbringen und eine wesentliche Rolle bei der Gestaltung des Kapitels zur Kalibrierung von SONAR-Geräten übernehmen.

Das Department of Geomatics Engineering der Universität von Calgary gehört zu den führenden Entwicklungsstellen für die Kalibrierung und Validierung von ALS, das ein wesentlicher Teil der KalVal-Spezifikation werden soll. Allerdings ist die Zahl der Experten weltweit nicht allzu groß.

Die IHO ist die International Hydrographic Organization und zuständig für die Hydrographie.

CEOS bedeutet Committee on Earth Observation Satellites und ist eine internationale Organisation, die die meist nationalstaatlichen Einrichtungen vertritt, die zivile optische Fernerkundungssysteme betreiben. CEOS hat in den letzten Jahren eine umfangreiche Dokumentation zur Qualitätssicherung von Fernerkundungssysteme herausgegeben (A Quality Assurance Framework for Earth Observation, QA4EO). Obwohl dieses Werk wertvolle Hinweise für die neue Norm liefert, sind dennoch erhebliche Konkretisierungen für einen fertigen Normungstext erforderlich.

Der USGS (United States Geological Survey) besitzt eine jahrzehntelange Erfahrung in der Kalibrierung, Validierung und Zertifizierung von Sensoren der Photogrammetrie und Fernerkundung. Wichtige Standorte von Kalibriereinrichtungen sind das Stennis Space Center im Bundesstaat Mississippi und das Kalibrierfeld in der Region um Sioux Falls in South Dakota. Wegen vielfältigen anderen Projekten haben die Kollegen vom USGS sich bisher nicht zu einer Mitarbeit in der Normungsgruppe bewegen lassen, stehen aber in regelmäßigem Austausch mit der Projektgruppe.

Viele der deutschen Kamerahersteller haben Details zu ihren firmeninternen Kalibrierverfahren bereitgestellt und so einen wichtigen Beitrag zur Entwicklung einer Norm, die heutigen Anforderungen genügt, geleistet.

2.4 Umsetzung

Die ISO/TS 19159 gehört zu den sehr praxisnahen Technischen Spezifikationen. Seitens der Anwender wird eine Lösung erwartet, die ähnlich der früheren Richtlinien der ISPRS für die Kalibrierung und Zertifizierung von Sensoren eingesetzt werden kann.

Diese Forderung widerspricht teilweise der Grundidee der ISO-Normen. Sie bilden meistens nur die abstrakte Basis, auf der die Implementierungsebene ausgebaut wird. Konkret heißt dieses, dass die ISO nicht für wichtige Details wie Grenzwerte zur Beurteilung einer bestimmten Qualität zuständig ist.

Die Projektgruppe ist sich daher einig, dass trotz Trennung von abstrakter Norm und Implementierung die letztere schon bei der Entwicklung der Spezifikation berücksichtigt und die Einbindung einer geeigneten Organisation vorbereitet werden muss.

Die ISO wird für das Datenmodell, die Kalibrierverfahren und die Metadaten zuständig sein und dieses in die Spezifikation aufnehmen. Eine andere Stelle wird die Qualitätsmaße definieren und aufbauend auf der ISO-Spezifikation ein XML-Schema definieren, das in der Praxis Anwendung finden kann. Für die formale Umsetzung könnten die Formatvorgaben zum "ISO/TC 211 XML" zugrunde gelegt werden. Die Definition der Qualitätsparameter erfordert die fachliche Kompetenz einer anerkannten internationalen Organisation. Hier wäre an die ISPRS und an EuroSDR zu denken.

3 Fragebogen während EuroCOW 2010

EuroCOW steht für European Calibration and Validation Workshop. Dieser Workshop wird alle zwei Jahre in Castelldefels nahe Barcelona veranstaltet und steht unter der Schirmherrschaft der ISPRS und des EuroSDR. Diese wichtige Veranstaltung versammelte im Februar 2010 etwa 50 Experten aus der ganzen Welt, vor allem aber aus Europa und Nordamerika. Die vielfältigen Beiträge haben das Normungsprojekt einen guten Schritt voran gebracht.

Der EuroCO-Workshop 2010 bot die Möglichkeit zu einer kleinen Erhebung zum Bedarf für und den Erwartungen an eine KalVal-Spezifikation. Dafür wurde ein kompakter Fragebogen mit dem Umfang von einer Seite an die Teilnehmer verteilt und am Ende des Workshops wieder eingesammelt. Zwei Drittel der Teilnehmer antworteten.

Die wichtigste Botschaft war die Unterstützung aller Antwortenden für die Entwicklung einer KalVal-Spezifikation. Fast jeder bestätigte die digitalen Luftbildkameras, die satellitenge-

stützten optischen Kameras, LIDAR und SAR/InSAR. Ergänzend wurden andere Sensoren wie z.B. Thermalkameras, Multi- und Hyperspektralkameras und terrestrische Kameras genannt.

Ein wichtiger Hinweis war die Warnung vor einer allzu detaillierten Norm, denn solche Normen könnten schnell von der Entwicklung überholt werden und dann entweder neue Methoden ausschließen oder an Bedeutung verlieren.

Die Antworten zum Fragebogen bestätigten die im Abschnitt 2.2 genannten Unterthemen des Kapitels "Calibration" und fügten wichtige Hinweise hinzu, beispielsweise die Notwendigkeit der genauen Beobachtung und Dokumentation von atmosphärischen Gegebenheiten während einer Testfeldkalibrierung.

Die Bedeutung der radiometrischen Kalibrierung wurde ebenfalls von fast allen bestätigt. Ein Kommentator schlug einen standardisierten File-Header z.B. für TIFF vor, in dem die Kalibrierparameter abgelegt werden können.

Eine Kalibriernorm erfüllt nicht ihren Zweck, wenn die Kalibrierergebnisse nicht durch eine autorisierte Stelle bestätigt – zertifiziert – werden können. Die letzte Frage bat daher um Vorschläge für Kalibrierstellen. Die Antworten reichten von "privat" wie ISPRS bis "öffentlich" wie die European Association of Metrology Institutes EURAMET. Welche Stelle ausgewählt wird, ist noch offen. Bei der Auswahl wird es wichtig sein, dass die Stelle unabhängig ist und eine nachhaltige Lösung gefunden wird.

Eine detaillierte Darstellung des Fragebogens steht im Anhang.

4 Zusammenfassung

Der Titel und der Anwendungsbereich der KalVal-Spezifikation umfassen die Kalibrierung und die Validierung von flugzeug- und satellitengestützten Sensoren und Daten. Die Kalibrierung betrifft Geometrie und Radiometrie und schließt die Labor- und die Testfeldkalibrierung ein. Der Begriff "Imagery Sensors" wird sehr weit ausgelegt und bezieht sich auch auf Airborne Laser Scanning (ALS) und SONAR (Tiefenmessung im Meer).

Die Spezifikation wird keine Regelung für Zertifizierungen enthalten, aber die Grundlage für dieselben legen.

An der Entwicklung sind beteiligt EuroSDR/EuroDAC², CEOS, der USGS, die Universität von Calgary, der kanadische Hydrographische Dienst, die IHO, viele Kamerahersteller und andere Stellen.

Die Spezifikation muss spätestens 2014 fertig gestellt werden.

5 Literaturverzeichnis

ISO/TS 19101-2:2008 "Reference model – Part 2: Imagery"
ISO 19115-2:2009 "Metadata – Part 2: Extensions for imagery and gridded data"
ISO/TS 19130 "Imagery sensor models for geopositioning"

QA4EO "Quality Assurance for Earth Observation". Key Guidelines, September 2008, Version 2.0

SWE "Sensor Web Enablement". Open Geospatial Consortium.

<http://www.opengeospatial.org/ogc/markets-technologies/swe>

Anhang: Darstellung des Fragebogens EuroCOW 2010

A1. Do we need a standard for the calibration of the geometry?

Digital aerial cameras: 26 yes, 1 no

Space borne cameras: 18 yes, 2 no

Lidar sensors: 24 yes, 1 no

SAR/InSAR: 13 yes, 2 no

Other proposed sensors: Thermal cameras, Multi- and Hyperspectral cameras, Navigation sensors, Terrestrial cameras, UAV, light weight

Comments: Any method cannot be standardized; better standardize test procedures to test calibrated systems. There are many cases where a certification process needs to be incorporated. Also, the standards should not be restrictive/detailed that new (and maybe better) methods will not fit the definitions.

A2. What shall be standardized?

Degree of integration (component, multi-head systems etc.): 7 yes, 7 no

Calibration environment (laboratory, in-situ): 19 yes, 3 no

Test site calibration (real-time/post processing): 17 yes, 3 no

Reliability: 18 yes, 1 no

Wavelength dependent issues (bands, spectral resolution etc.): 18 yes, 3 no

Time (calibration date, influence of striking events, e.g. launch): 14 yes, 4 no

Other standardization topics: Atmospheric condition: pressure, AOT, visibility, relative humidity, wind speed, model (MODTRAN, 6S), Time and location, Definition of all parameters

A3. Do we need a standard for the calibration of the radiometry?

Do we need this standard: 15 yes, 1 no

Calibration type (absolute radiometric, spectral, vicarious, others)? 17 yes, 0 no

Reference standard (desert test site, moon etc. water bodies, artificial standards for the lab, lab-conditions): 10 yes, 2 no

Other aspects: Targets with known reflection, Radiometric situation at time of acquisition, Calibration environment, Distribution format of calibration results, e.g. TIFF-header, Coefficients (gain, offset)

A4. Do we need a standard for validation?

Do we need this standard? 9 yes, 2 no

Qualification: 14 yes, 2 no

Process: 18 yes, 0 no

product / Product type: 15 yes, 2 no

Others: Procedures, Product standards

A5. Which should be the certification body?

Independent Research Institutes on behalf of ISPRS, IGARSS, EuroSDR ...

Team of end-users, service providers, and manufacturers

something like TÜV

Independent European or global institute

Government

EUFAR

EURAMET

Nationale Geoportale: Metadaten-Standards als Grundlage des Qualitätsmanagements - am Beispiel von AGEOportal

JOSEF STROBL¹, MANFRED MITTLBÖCK² UND MARIANA BELGIU³

Zusammenfassung: Das Themenfeld von Metadaten zur insbesondere auch qualitativen Beschreibung von Geodaten stellt sich vor dem Hintergrund der Entwicklung hin zu verteilten Geodaten-Infrastrukturen (GDI) in neuem Licht dar und erfordert neue Zugänge und Ablaufkonzeptionen. Richtlinien und Normen für Metadaten in GDIs stützen sich weitgehend auf etablierte Vorgangsweisen zur Beschreibung von Geodatenständen, die im Wege von Geoportalen administriert und in weiterer Folge auch als Suchkriterien herangezogen werden. Im vorliegenden Beitrag wird einerseits die Entwicklung des nationalen Metadatenstandards profil.AT und dessen Umsetzung im Rahmen eines österreichischen Geoportals diskutiert, in der Folge darüber hinaus noch die Frage eines bedingt durch GDIs zunehmend bedeutenden integrierten Qualitätsmanagements von GDI-basierten Abläufen thematisiert.

1 Einleitung

Geodaten werden heute immer weniger nur als Grundlagen einzelner Projekte oder auch spezifischer Anwendungen verwendet, sondern sind zunehmend zentrale Bausteine von Geodateninfrastrukturen (GDI). Ziel dieser Entwicklung hin zu verteilten, aber gut definiert organisierten GDIs ist die effiziente Nutzung der Investition in Geodaten quer über unterschiedliche Anwendungen und Institutionen hinweg, die Vermeidung unbegründeter Mehrfacherfassung und ‚Versionierung‘ sowie die Absenkung der Hürden für neue Anwendungen.

Daraus ergibt sich vielfach eine Entkopplung von Datenerfassung, Datenorganisation, und anwendungsorientiertem Einsatz. Anwender kennen den Kontext der Datenerfassung und die ‚Lineage‘ der Verarbeitung nicht vollständig, Merkmale die eine Beurteilung der Eignung für bestimmte Anwendungen (‚fitness for use‘) erlauben müssen daher explizit gemacht werden.

Die dafür eingesetzten Beschreibungen für Metadaten machen naturgemäß nur Sinn wenn diese in einheitlicher Form die Kommunikation zwischen Sender und Empfänger unterstützen. Standards für Metadaten gehörten daher zu den frühen Entwicklungen (FGDC, 1998) im Bereich Geodaten und auch zu den zentralen Initiativen im Rahmen von OpenGIS (KOTTMANN, 2001), und sind auch wichtige Bausteine INSPIRE-konformer Implementationen (DRAFTING TEAM, 2009).

Qualität von Geodaten wird letztlich nicht als absolute Eigenschaft, sondern aus der Sicht unterschiedlicher Anwendungen bedeutsam sein. Wichtig ist daher eine Beschreibung qualitätsrelevanter Eigenschaften, die dem Benutzer die Beurteilung der Eignung gestatten – Beispiele für

¹ Zentrum für Geoinformatik der Universität Salzburg und Institut für Geographic Information Science der Österreichischen Akademie der Wissenschaften – josef.strobl@sbg.ac.at

² Forschungsstudio iSPACE der Research Studios Austria – manfred.mittlboeck@researchstudio.at

³ Institut für Geographic Information Science der Österreichischen Akademie der Wissenschaften - mariana.belgiu@oeaw.ac.at

solche Eigenschaften sind Lagegenauigkeit, räumliche Auflösung, Aktualität – Gültigkeit etc. Metadaten als Beschreibung von (u.a.) Qualitätseigenschaften sind somit unentbehrliche Komponenten einer GDI und damit Gegenstand der Standardisierung (siehe folgender Abschnitt). Weltweit und über alle Domänen hinweg eingesetzte Metadatenstandards sind naturgemäß umfassend und damit umfangreich (lies: hoher Aufwand zur Datendokumentation). Sie stellen damit erfahrungsgemäß eine große Hürde zum Einsatz dar, und decken gleichzeitig immer noch nicht alle regionalen bzw. domänenspezifischen Anforderungen ab. Diese Problematik wird durch die Erstellung von ‚Profilen‘ als definierte Teilmengen umfassender Standards adressiert. Der gegenständliche Aufsatz präsentiert in kompakter Form die Ergebnisse der Entwicklung von ‚profil.AT‘ im Auftrag des Österreichischen Dachverbands für Geographische Information (AGEO) und dessen Einsatz als Grundlage des Datenkatalogs bzw. der Suchfunktionalität eines prototypischen Geo-Portals als Benutzerschnittstelle einer GDI für Österreich. Zur Illustration einiger Aspekte insbesondere qualitativer Metadaten wird hier ein digitales Orthophoto mit daraus abgeleiteter Landbedeckungs-Klassifikation verwendet. Die Qualität des letzteren Produkts ist abhängig von einer ganzen Reihe von Faktoren: räumliche, radiometrische und spektrale Auflösung sowie Lagegenauigkeit des Orthophotos, eingesetztes Klassifikationsverfahren, gewünschte Klassen (Ontologie) und der Lage im Raum (Besonnung) – also ein reiches Betätigungsfeld für Metadaten jeder Art:

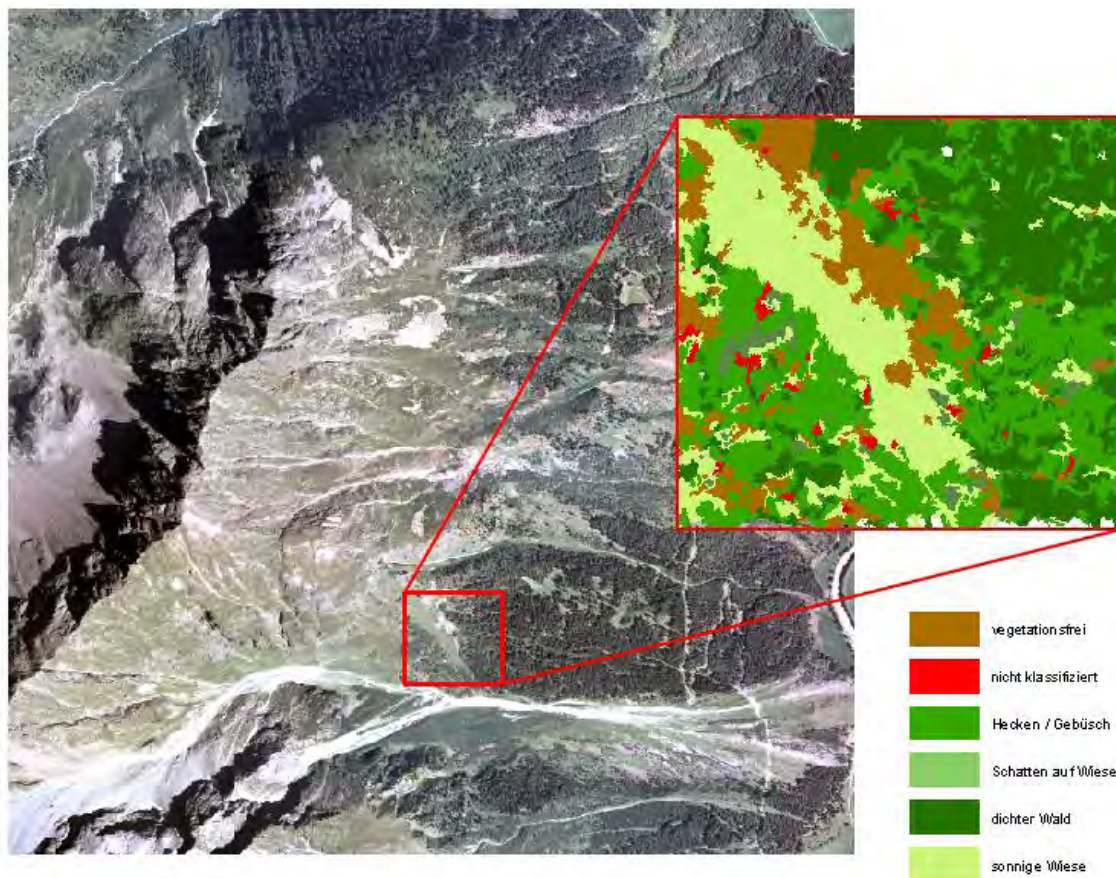


Abbildung 1: Herausforderungen an die Dokumentation der Datenqualität - Orthophoto und Klassifikation der Landbedeckung (Datengrundlage © Land Tirol, Klassifikation ÖAW GIScience - Gudrun Wallentin)

2 (Qualitäts-) Standards für Geoinformation

Standards für Geodaten und deren Metadaten sind Grundlage jeglichen Qualitätsmanagements von und mit Geoinformation. Involviert bei der Entwicklung der aktuell relevanten Standards sind das OpenGIS Consortium (www.opengis.org), ISO (www.tc211.org) und INSPIRE (inspire.jrc.ec.europa.eu). Während Qualität von Geodaten per se u.a. durch zahlreiche Standards abgesichert wird, erfolgt die Dokumentation qualitätsrelevanter Eigenschaften in Form von Metadaten, die folgende kompakte Aufstellung aktueller Spezifikationen der ON/EN/ISO 19100 Serie fokussiert daher auf diese.

Tabelle 1: Liste der Qualitätsstandards der ON/EN/ISO 19100 Serie (beschrieben nach ISO)

ON/EN/ISO 19113:2002 Geographic Information -- Quality principles	definiert die Prinzipien der Beschreibung der Qualität geographischer Datensätze und spezifiziert die Komponenten die notwendig sind, Qualitätsinformation bereitzustellen. Des weiteren wird ein Weg der Beschreibung von Qualitätsinformation aufgezeigt.
ON/EN/ISO 19114:2003 Geographic Information - Quality evaluation procedures	stellt ein Framework von Prozeduren für die Feststellung und Bewertung der Qualität digitaler geographischer Datensätze bereit, konsistent mit den Daten- Qualitätsprinzipien definiert in der ON/EN/ISO 19113:2002
ON/EN/ISO 19115:2003 Geographic Information - Metadata	definiert ein Schema für die Meta-Beschreibung geographischer Information und Dienste.
ON/EN/ISO 19131:2007 Geographic Information - Data product specifications	definiert die Anforderungen an geographische Datenprodukte basierend auf Standards der ON/ISO 19100 Serie. Zusätzlich unterstützt wird die Erstellung von Daten-Produktspezifikationen im Rahmen von Verständlichkeit und Anwendungsfitness.
ON/EN/ISO 19138:2006 Geographic Information - Data quality measure	erläutert eine Sammlung von Datenqualitäts-Messgrößen. Diese können als Daten- Qualitäts- Unterelemente für die Qualitätsbeschreibung herangezogen werden. Für die jeweiligen Subelemente können je nach Datentyp und Anwendungszweck unterschiedliche Messgrößen definiert werden.
ON/EN/ISO 19139:2007 Geographic Information – Metadata – XML Schema Implementation	definiert das geographische MetaData XML (gmd) encoding, eine XML Schema Implementierung abgeleitet aus ONEN/ISO 19115:2003

Die in obiger Tabelle angeführten Standards der ISO 19100 Serie werden seit mehreren Jahren herangezogen, die Qualität geographischer Ressourcen zu beschreiben. Wesentliches Ziel der Beschreibung der Qualität geographischer Daten ist dabei die Unterstützung der Wahl des bestgeeigneten räumlichen Datensatzes, bezogen auf den jeweiligen Anwendungskontext für die gemeinsame Nutzung und den Austausch von Geoinformation.

Die ON/EN/ISO 19113 definiert dabei die Qualitätsprinzipien und spezifiziert die notwendigen Komponenten um Qualitätsinformation zu beschreiben und zu organisieren. Die Norm unterstützt somit Datenproduzenten bei der Festzuschreibung von Produktspezifikationen und ermöglicht Datennutzern mit Hilfe dieser Beschreibung einen Überblick über die Qualität und ‚Fitness for Use‘ der Daten zu erlangen. Die Qualität wird dabei nach ISO 8402 (1986) als ‚Präzisierung der Gesamtheit der Charakteristika und Eigenschaften‘ eines Produktes (=geographischer Datensatz) für die Eignung in einem spezifischen Anwendungskontext definiert. Der Standard fokussiert auf die Definition der Prinzipien für die Beschreibung der Qualität von geographischen Datensätzen und Datenserien und definiert die einzelnen Komponenten für die Definition für die Bereitstellung von Qualitätsinformation. Nicht festgelegt werden die minimalen Qualitätsanforderungen an Geoinformation.

Die Qualitätsbeschreibung erfolgt anhand zweier Hauptkriterien. Die *quantitativen Qualitätskriterien* beschreiben die Eignung des Datensatzes hinsichtlich ihrer Eignung anhand der Produktspezifikationen mit Hilfe der Datenqualitätselemente, der Subelemente und deren Beschreibung. Unter diese Kategorien fallen die

- *completeness* = *Vollständigkeit* von räumlichen Elementen, Attributen und Beziehungen
- *logical consistency* = *logische Konsistenz* (z.B. topologische Konsistenz)
- *positional accuracy* = *Positionsgenauigkeit* räumlicher Elemente
- *temporal accuracy* = *zeitliche Genauigkeit* der Attributinformation
- *thematic accuracy* = *thematische Exaktheit* beschreibt die Genauigkeit der quantitative Attribute und der Richtigkeit der nicht-quantitativen Elementbeschreibungen

Datenqualitätsübersicht- Elemente wie *Purpose* (*Verwendungszweck*), *Usage* (*Anwendung*) und *Lineage* (*Herkunft*) beschreiben die allgemeinen *nicht quantitativen Qualitätsbeschreibungen*. Die Herkunft bezieht sich dabei auf die Beschreibung des zugrunde liegenden Ausgangs- Datensatzes, sowie der durchgeführten Verarbeitungsschritte.

Der Standard ON/EN/ISO 19138:2006 beinhaltet die Rahmendefinitionen von Verfahren zur Bestimmung und Bewertung der Qualität geographischer Datensätze. Zusätzlich werden Methoden für die Evaluierung und Berichterstattung der Qualitätsergebnisse definiert, einerseits als Teil der Qualitätsbeschreibung in den Metadaten als auch in Form von Qualitätsberichten. Darauf aufbauend beschreibt die ON/EN/ISO 19138:2006 häufig verwendete Qualitätsgrößen für die Datenqualitäts-Unterelemente der ON/EN/ISO 19113.

Mit der Implementierung und der Anwendung der Beschreibung von Qualität geographischer Datensätze traten einige Inkonsistenzen und Defizite der in Tabelle 2 angeführte Standards zu Tage, sodass 2009 durch die ISO TC211 die Neustrukturierung und Zusammenfassung als Projekt *ISO 19157 Geographic information - Data quality* und *ISO 19158 Geographic information – Quality assurance of data supply* gestartet wurde.

Für die Metadaten-Discovery sind vor alle die nicht-quantitativen Qualitätsbeschreibungen von wesentlicher Bedeutung, die parallel zur INSPIRE Metadaten Verordnung im österreichischen Metadatenprofil nach ON A 2270:2010 verankert wurden.

2.1 ON A 2270:2010 - profil.AT

Mit der ON A 2270:2010 wurde durch die ÖNORM eine Handlungsanleitung zur Dokumentation von Geodaten normiert, in der festgelegt wird, wie neben den verschiedenen anderen Metadatenelementen die Datenqualität von geographischen Datensätzen in österreichweit gültigen Metadatensätzen zu strukturieren und zu dokumentieren ist.

Die Dokumentation beinhaltet gemäß ON/EN/ISO 19115:2003 sowohl die beschriebenen quantitativen als auch nicht-quantitative Qualitätselemente. Die Entwicklung dieses eigenständigen Metadatenprofils wurde notwendig, da zahlreiche Erfahrungen in Europa zeigen, dass trotz der umfangreichen Definition Auffassungsunterschiede und Interpretationsvarianten bei der Anwendung der angeführten Normen bestehen. Vor diesem Hintergrund wurde im Jahr 2007 vom Österreichischen Dachverband für Geoinformation (AGEO) ein breit angelegter „*Community*“ - Konsultationsprozesses gestartet um ein Metadatenprofil zu entwickeln. Dies mit dem Ziel jenes Subset an Metadatenelementen zu definieren (MITTLBOECK, 2008), das in Zukunft für die Beschreibung Geographischer Ressourcen in Österreich herangezogen werden sollte.

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
<MD_Metadata>...
  <dataQualityInfo>
    <DQ_DataQuality>
      <scope>
        <DQ_Scope>
          <level>
            <MD_ScopeCode
codeList="http://www.isotc211.org/2005/resources/Codelist/gmxCodeLists.xml#MD_ScopeCode" codeListValue=""/>
          </level>
        </DQ_Scope>
      </scope>
      <report>
        <DQ_DomainConsistency xsi:type="DQ_DomainConsistency_Type">
          <measureIdentification>
            <RS_Identifier>
              <code>
                <gco:CharacterString>Conformity</gco:CharacterString>
              </code>
              <codeSpace>
                <gco:CharacterString>INSPIRE </gco:CharacterString>
              </codeSpace>
            </RS_Identifier>
          </measureIdentification> ...
        </DQ_DomainConsistency>...
      </report>...
      <lineage>
        <LI_Lineage>
          <statement>
            <gco:CharacterString/>
          </statement>
        </LI_Lineage>
      </lineage>
    </DQ_DataQuality>
  </dataQualityInfo>...
</MD_Metadata>
```

Abbildung 2: XML Auszug zur Beschreibung von quantitativen (thematische Genauigkeit) und nicht-quantitativen (Herkunft) Qualitätsparametern

2.2 Metadaten-Editor

Da Metadaten in maschinenlesbarer Form vorgehalten werden, und auch XML im Normalfall nicht manuell editiert wird, werden üblicherweise Metadaten-Editoren verwendet mit denen abgeleitete Metadaten direkt aus Datensätzen extrahiert und gebundene Metadaten interpretiert werden (Beispiele: Koordinatensystem, räumliche Ausdehnung), zusätzliche Metadaten erfasst werden (wie Herkunft, Verfügbarkeit) und insbesondere auch Metadaten validiert werden.

Als Bestandteile von Portalen dienen Metadaten-Editoren demnach primär der Registrierung von Geodatenätzen und Diensten in Datenkatalogen und unterstützen Bearbeiter bei dieser Aufgabe.

Abbildung 3: Definition von Qualitätsinhalten eines Geographischen Datensatzes im Metadateneditor des AGEO Metadatenportals.

The screenshot shows a web-based form for defining metadata. It includes several sections:

- Räumliche Auflösung**: Contains input fields for 'Maßstab 1', 'Distanz' (set to 2), and 'Einheit' (set to meter).
- Übersichtsgrafik**: A checkbox that is currently unchecked.
- ISO 19115 Themenkategorien**: A section with a checked checkbox.
- Angaben zum Koordinatensystem**: A section with a checked checkbox.
- Räumliche Ausdehnung**: A section with a checked checkbox.
- Angaben zu Herkunft und Qualität**: A section with a checked checkbox. It includes a dropdown for 'Geltungsbereich' (set to 'Dataset') and a text area for 'Detaillierte Beschreibung' containing the text: 'Als Landnutzung wird die Art der Inanspruchnahme und Landflächen (Teilen der festen Erdoberfläche) Menschen bezeichnet.'
- Qualitätsbericht:**: A section with a checked checkbox. It includes a dropdown for 'Qualitätsprüfungsverfahren' (set to 'INSPIRE Conformity').
- Berichtsangaben**: A sub-section containing:
 - 'Titel' field with the value 'Landnutzung'.
 - 'Typ' dropdown set to 'Erstellung'.
 - 'Grad' dropdown set to 'Not evaluated'.
 - 'Erläuterung' field with the same text as in the 'Angaben zu Herkunft und Qualität' section.

3 Architekturen und Portale

Der Weg der Entwicklung gängiger Geoinformations-Plattformen führt von der Dominanz von Arbeitsplatzrechnern und von Unternehmens-Netzwerken hin zu teilweise offenen, jedenfalls aber verteilten Architekturen auf der Grundlage des Konzepts von GDI.

Metadaten werden in zentralen oder auch verteilten Datenbanken gehalten, an die Suchanfragen gestellt werden. Diese Suchanfragen kommen in der Regel aus Portalen, die als allgemeine Benutzerschnittstellen für GDI dienen. Portale dienen regional oder auch sektoral (Disziplinen, Anwendungsdomänen) definierten Communities und sind im allgemeinen Fall nicht 1:1 an Datenkataloge und Datenbestände gebunden.

Vielmehr wird im Sinne offener, Dienste-orientierter Architekturen (SOA) ein flexibler Verbund an Services geschaffen, um aus Benutzersicht über Metadaten auf Daten zugreifen zu können. Die qualitativen Ansprüche von letztendlicher Anwendung bzw. Benutzern stellen dabei zentrale Such- und Auswahlkriterien dar.

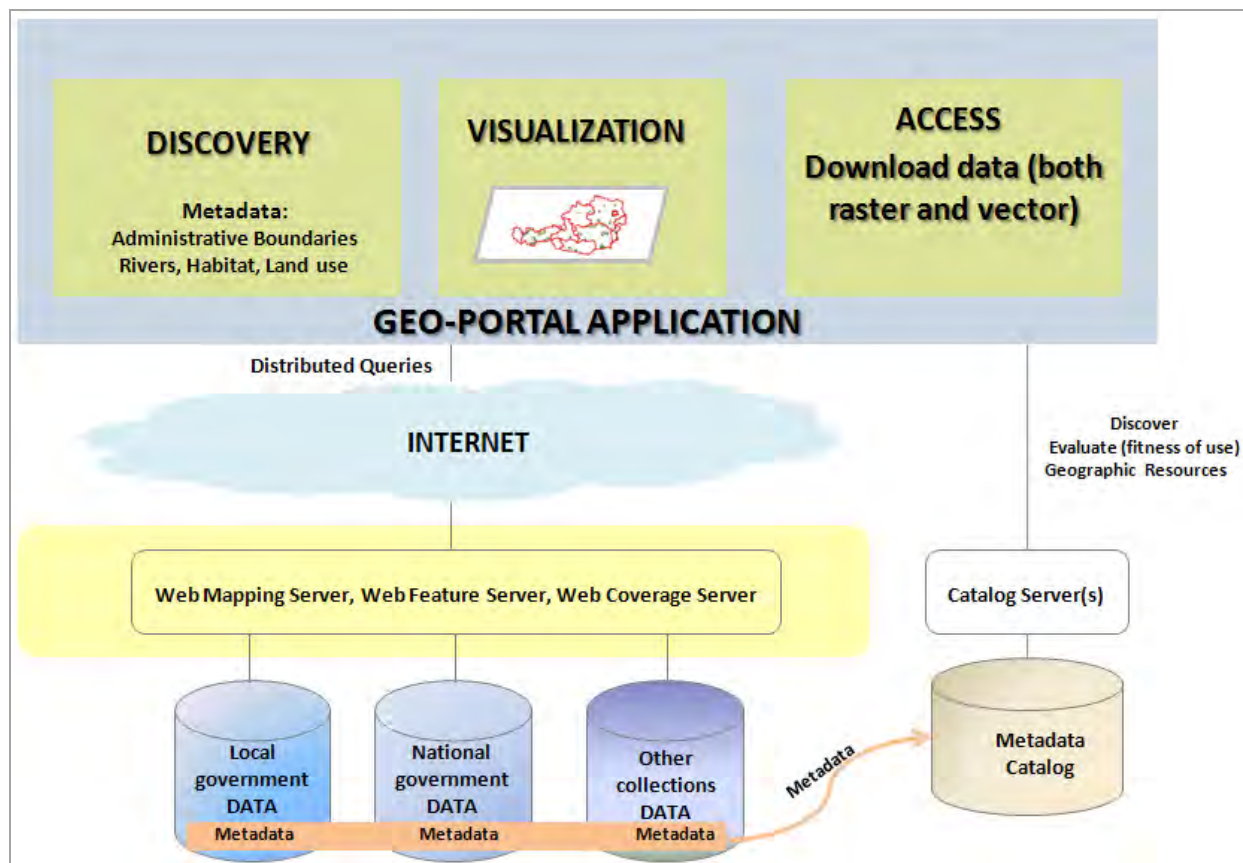


Abb. 4: Ausgewählte Architekturelemente einer GDI, mit Betonung von Metadaten und Portalfunktionen

Die Metadaten werden in spezifischen Datenbanken gespeichert. Die gute technische Verwaltbarkeit von XML in relationalen Datenbanken, bzw. die Verwendung von XML Datenbanken (z.B. Open Source eXist) ermöglicht die eine optimierte Organisation der Metadatenelemente in einem XML-Blob. Als Austauschchnittstelle wird fokussiert auf das OGC Catalogue Service (CSW 2.0.2).

3.1 Das AGEOportal

Metadaten, und auch Datenbanken, sind als strukturierte Information zwar computerlesbar und eine geeignete Grundlage für interoperable Abläufe, benötigen jedoch Benutzerschnittstellen für die direkte Interaktion mit diversen Akteuren. Geoportale sind zunehmend die Standard-Benutzerschnittstellen für GDIs und stellen damit auch den Zugang zu Metadaten dar. In diesem Sinn sind Portale unentbehrliche Elemente zur Steuerung und Nutzung von GDIs, und unterstützen damit in der Regel auch das ‚publish-find-bind‘ Paradigma typischer Abläufe (GIFF et al, 2008). Zentrale Aufgabe von Geoportalen aus Sicht von Endbenutzern ist jedenfalls die Bereitstellung von Suchfunktionen („discovery“) für Geodaten und Dienste:

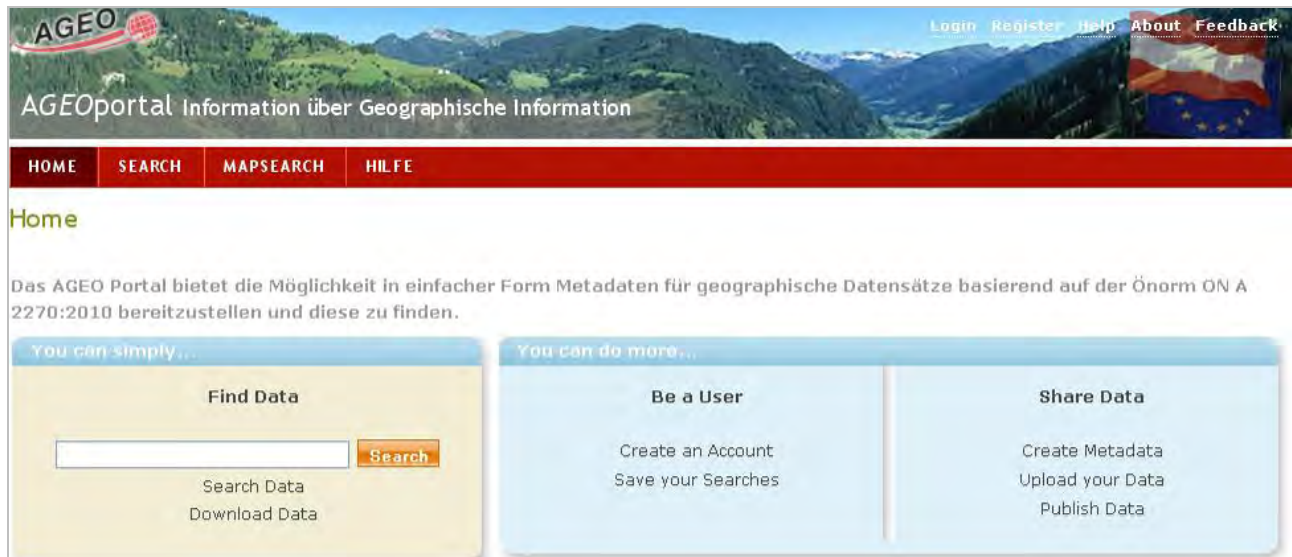


Abb. 5: Geoportal des Österreichischen Dachverbandes für Geographische Information - www.ageo.at

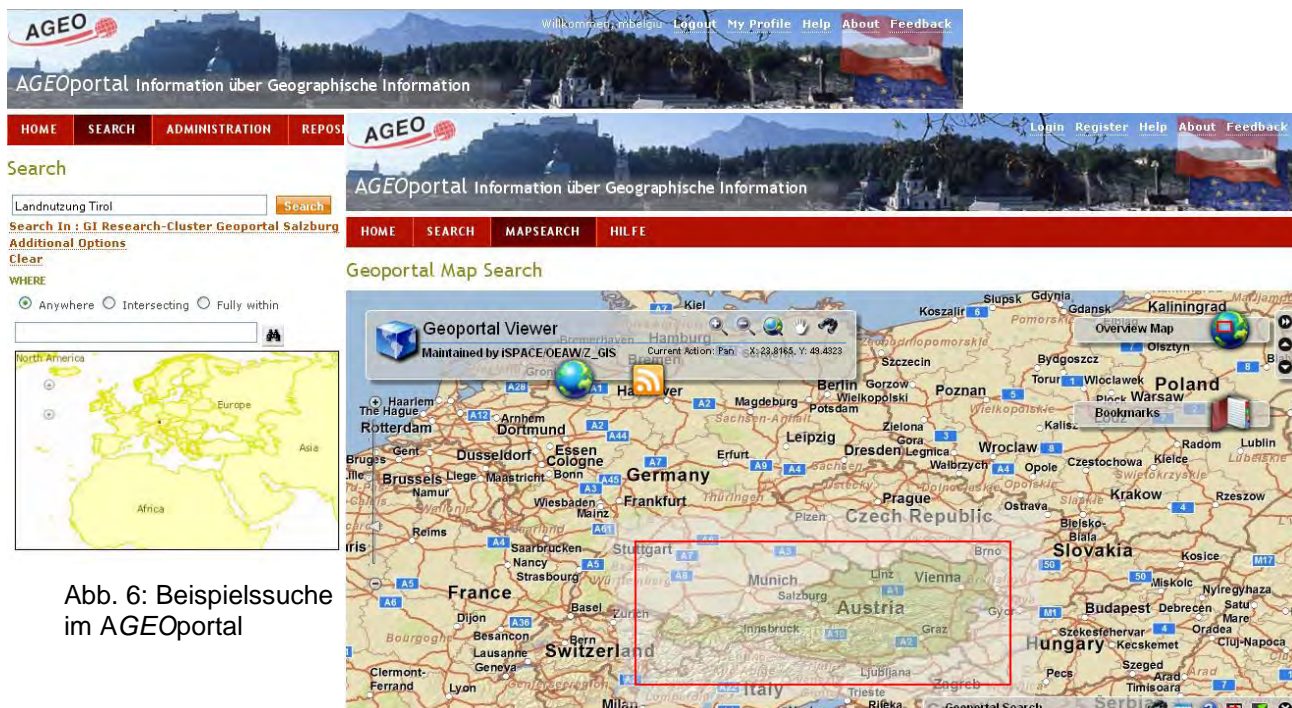


Abb. 6: Beispielssuche im AGEOportal

Das Geoportal von AGEO dient wie oben erwähnt als prototypischer Demonstrator um generell Architektur, Logik und Nutzwert einer GDI zu kommunizieren, zur Inwertsetzung von profil.AT und als Plattform für die landesweite Integration von discovery-Potenzialen über unterschiedliche Nutzergruppen in Wirtschaft, Wissenschaft und Verwaltung hinweg. Komplexe Suchkriterien, im Sinn der Suche nach für bestimmte Anwendungen geeigneten Daten und Diensten, sind häufig von qualitativen Merkmalen geleitet.

4 Qualitätsmanagement

Während die Definition und Beschreibung zahlreicher qualitativer Aspekte von Geodaten auf etablierte Grundlagen und auch in Standards einigermaßen klar definierte Metriken zurückgreifen kann, stehen wir heute durch die Entwicklung von Geodaten-Infrastrukturen vor neuen Herausforderungen. Einerseits erfolgt der Zugriff auf Daten zunehmend über Dienste-Schnittstellen, die eine Übersetzung datengebundener Charakteristika in Merkmale der Dienste-Instanz erfordert. Andererseits unterstützen und fördern GDIs die Integration von Abläufen in ‚workflows‘, die eine entsprechend integrierte Verarbeitung qualitativer Metainformation erfordern.

Während also Datenqualität als Auswahlkriterium für einen Datensatz, und als Steuergröße für dessen Visualisierung weitgehend auf etablierte Mechanismen zurückgreifen kann, ist das ablauforientierte Qualitätsmanagement einer Verarbeitungskette von mehreren Datensätzen hin zu einem Endprodukt heute noch ein weitgehend offenes Forschungsthema (die primär geometrische Fehlerfortpflanzung der *positional accuracy* einmal ausgenommen).

Wird eine der gängigen Definitionen von Datenqualität „*totality of characteristics of a product that bear on its ability to satisfy stated or implied needs*“ (ISO 8402:1994) auf ein Endprodukt eines komplexen Verarbeitungsablaufs angewandt, demonstriert dies den Bedarf nach umfassender Konzeption von Qualitätsmanagement.

Die mittlerweile schon als historisch und teils überholt anzusehende Motivation eines „*need to assess data quality because of the increase of spatial data exchange*“ (Goodchild, 1995) ist im Zusammenhang mit den weit über einfachen Datenaustausch hinausreichenden Ambitionen von Geodaten-Infrastrukturen in einem neuen Licht zu sehen. Dies ist vielmehr eine neue Aufgabenstellung, für die derzeit mit der Entwicklung grundlegenden (Meta-) Datenmanagements in Datenkatalogen und im Wege von Portalen die Ausgangspositionen etabliert werden.

5 Zusammenfassung und Ausblick

In Ergänzung zu klar auf bestimmte Zielgruppen fokussierten Portalen wie zB geoland.at für Aufgaben von Landesverwaltungen und deren interne und externe Zielgruppen, einem zukünftigen GeoDIG-konformen (BGBL, 2010/14) INSPIRE-Portal für die Bundesverwaltung oder auch sektoralen Portalen (zB <http://geoportal.icimod.org> des International Centre for Integrated Mountain Development) ist die Initiative AGEOportal auf die Anforderungen eines breiten Querschnitts an Nutzern aus Wirtschaft, Wissenschaft und Verwaltung abgestimmt. In erster Linie dient dieses Portal auch der Kommunikation und Förderung der GDI-Idee, indem die Integration von Daten, Metadaten und Diensten jeglicher Art von Geodaten unterstützt wird und solcherart der Wert universeller GDI demonstriert wird.

Im Mittelpunkt steht die Unterstützung einer qualitätsorientierten Vorgangsweise jeglicher Auskünfte und Arbeiten auf der Basis von Geodaten. Während dies generell ohne die Spezifikation und Akzeptanz von Standards nicht möglich ist, steht die qualitative bzw. quantitative Beschreibung von Geodaten-Charakteristika im Wege von Metadaten im Mittelpunkt und bildet ein unentbehrliches Zentralstück jeglicher GDI. Wenn allerdings der Gebrauch von Metadaten nicht selbst durch Standards geregelt ist, kann die Weitergabe von Qualitätsinformation an Empfänger (DEVILLERS et al, 2005) und insbesondere die Arbeit mit verteilten GDI nicht adäquat unterstützt werden.

In weiterer Folge ist davon auszugehen, dass Arbeitsabläufe mit und von Qualitätsmerkmalen von Geodaten gesteuert werden, diese somit ein unentbehrlicher Baustein im ‚Geoprocessing‘ wie auch in der Visualisierung sind. Beispiele dafür sind integrierte Fehlerstatistik (Fehlerfortpflanzung) bei der Integration von Datenbeständen, oder maßstäbliche Einschränkungen bei der visuellen Anzeige von Geodaten.

Während die oben erwähnten Qualitätskategorien (*completeness, consistency, accuracy, ...*) als etabliert –wenngleich nicht punktuell vollständig umgesetzt- zu betrachten sind, steckt die Handhabung semantischer Eigenschaften und damit deren Qualitätsmerkmale trotz langjähriger Vorarbeiten (CHEN, 2008) noch in ihren Anfängen. Der Aufbau von Ontologien für kontrollierte Domänen ist heute ein aktuelles Forschungsfeld und gleichzeitig Illustration dafür, dass Qualitätsmanagement von Geodaten gerade im Kontext von Geodaten-Infrastrukturen eine noch weiterhin zunehmende Herausforderung darstellt.

6 Danksagungen

Die ausschlaggebenden Beiträge und das Engagement des Österreichischen Dachverbands AGEO (insbesondere zur Entwicklung und Dokumentation von profil.AT), von Akteuren aus der Geoinformatik-Wirtschaft zur Implementation des Geoportals und des Österreichischen Normungsinstitut zur Umsetzung von ON A 2270:2010 werden dankbar anerkannt.

7 Literaturverzeichnis

- BGBL, (2010): Geodateninfrastrukturgesetz – GeoDIG. 14. Bundesgesetz über eine umweltrelevante Geodateninfrastruktur des Bundes (Geodateninfrastrukturgesetz – GeoDIG) . –online (06.06.2010): http://www.ris.bka.gv.at/Dokumente/BgblAuth/BGBLA_2010_I_14/BGBLA_2010_I_14.pdf
- CHEN, X., X. XHU, UND D. DU, (2008): Ontology Based Semantic Metadata for Imagery and Gridded Data. Online 06060.2010: http://www.isprs.org/proceedings/XXXVII/congress/2_pdf/6_WG-II-6/11.pdf.
- DEVILLERS, R., BÉDARD, Y., JEANSOULLIN, R. (2005): Multidimensional management of geospatial data quality information for its dynamic use within GIS. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 71(2), pp. 205–215.
- DRAFTING TEAM: Metadata and European Commission Joint Research Centre (2009): INSPIRE Metadata Implementing Rules: Technical Guidelines based on EN ISO 19115 and EN ISO 19119. Online 04.01.2010: http://inspire.jrc.ec.europa.eu/reports/ImplementingRules/metadata/MD_IR_and_ISO_20090218.pdf

- FGDC (1998): Federal Geographic Data Committee, FGDC-STD-001-1998. Content Standard for Digital Geospatial Metadata Workbook version 2.0. Federal Geographic Metadata Committee, Washington DC. 5/1/200.
- GIFF, G., B. VAN LEONEN, CROMPVOETS, J., ZEVENBERGEN, J. (2008): Geoportals in Selected European States: a non-technical Comparative Analysis. In: International Journal of Spatial Data Infrastructures Research, Special Issue GSDI-10.
- GOODCHILD, M. F. (1995): Sharing Imperfect Data. In: Sharing Geographic Information (eds. ONSRUD, H. J. and RUSHTON, G.), Rutgers University Press, New Brunswick, NJ, pp. 413-425.
- GOODCHILD, M.F., (2007), Beyond Metadata: Towards User-Centric Description of Data Quality. <http://www.itc.nl/ISSDQ2007/proceedings/Keynotespeakers/paper%20goodchild.pdf>
- MITTLBOECK M., GRILLMAYER R. UND SCHREILECHNER P., 2008: profil.AT - ON/EN/ISO 19115/19119 und INSPIRE konformes Metadatenprofil für Österreich. In: Strobl, J., Blaschke, T., Griesebner, G. [Hrsg.]: Angewandte Geoinformatik 2008, Wichmann Verlag, Heidelberg, 705-710.
- OGC Consortium (2001): The OpenGIS Abstract Specification, Topic 11 OpenGIS Metadata. Version 5. Online 06.06.2010: http://portal.opengeospatial.org/files/?artifact_id=1094.
- ÖSTERREICHISCHES NORMUNGSINSTITUT (ON) [Hrsg.] (2002): Geographic information – Quality principles. –Wien (ISO 19113:2002).
- ÖSTERREICHISCHES NORMUNGSINSTITUT (ON) [Hrsg.] (2003): Geographic information – Quality evaluation procedures. –Wien (ISO 19114:2003).
- ÖSTERREICHISCHES NORMUNGSINSTITUT (ON) [Hrsg.] (2008): Geographic information – Metadata. –Wien (ISO 19115:2003 + Cor 1:2006).

Immobilien- und Infrastruktur-Management in Österreichs grösstem Wirtschaftspark IZ NÖ-Süd

HANNS H. SCHUBERT ¹, PETER WONDRA ², THEO MEUSBURGER ³

Grosse Wirtschaftsparks sind in ihrer Struktur durchaus mit Städten vergleichbar. Eine effiziente Verwaltung erfordert ein gleichzeitiges Management von Verkehrswegen, Infrastruktur, Grundstücken und Gebäuden in einem einheitlichen Informationssystem. War es bisher üblich, für die Aussenbereiche GIS-Systeme und für die Gebäude CAFM (Computer Aided Facility Management) -Systeme getrennt einzusetzen, wurde für Österreichs grössten Wirtschaftspark IZ NÖ-Süd ein integriertes Management- und Auskunftssystem entwickelt.

Die grossen Herausforderungen dabei bestanden einerseits in der Schaffung einer einheitlichen Struktur für sämtliche Sach- und Plandaten, andererseits in der Erstellung geometrisch richtiger und aktueller CAD-Pläne, sowie einem lebenszyklusbegleitenden Daten- Aktualisierungskonzept..

1 ecoplus – Betreiber von 16 Wirtschaftsparks

ecoplus ist Niederösterreichs Wirtschaftsagentur GmbH und betreibt 16 Wirtschaftsparks und 4 Technologiezentren. Der Wirtschaftspark IZ NÖ-Süd liegt im Industrieviertel südlich von Wien und ist der größte Wirtschaftspark Österreichs. Auf einer Fläche von 280 Hektar sind über 300 Betriebe (REWE/Billa Zentrale, Isovolta, LKW-Walter etc.) mit rund 11.300 Mitarbeitern angesiedelt. Sämtliche Infrastruktur (17,2 km Straße, 13 km Eisenbahngleis, Wasserversorgung und -entsorgung inkl. Kläranlage, 100.000 m² Grünanlage etc.) befindet sich im Eigentum und in Betreuung von ecoplus.

Als herausragendes Service konzipiert ecoplus Mietobjekte – aktuell 58 im IZ NÖ-Süd - maßgeschneidert nach den Wünschen der Mieter.

Die übergreifende Konzeption für CAFM Bestandspläne der Gebäude UND komplette Außenanlagenpläne inkl. Infrastruktur bildet die Grundlage für das umfassende Management der Immobiliendaten.

Die Projektpartner aus dem GIS / CAFM- und dem Vermessungsbereich wurden im Rahmen einer 2-stufigen EU-weiten Ausschreibung ausgewählt. Die Projekt-Realisierung erfolgte in enger Zusammenarbeit aller Beteiligten in einem Zeitraum von rund einem Jahr.

1) DI Hanns H. Schubert ZT GmbH, A-3100 St. Pölten, Kremser Landstrasse 2,
h.schubert@schubert.at, www.schubert.at

2) DI Peter Wondra, ecoplus, A-2355 Wiener Neudorf IZ NÖ-Süd, Straße 3,
p.wondra@ecoplus.at, www.ecoplus.at

3) Mag. Theodor Meusburger, SYNERGIS, A-6020 Innsbruck, Wilhelm-Greil-Strasse 17,
t.meusburger@mysynergis.com, www.mysynergis.com

1.1 Kennzahlen der ecoplus-Wirtschaftsparks

923 ha voll aufgeschlossener Grundstücke in den 8 ecoplus-eigenen Wirtschaftsparks sowie 8 ecoplus-Beteiligungsparks entsprechen einer Fläche von 1.293 Fußballfeldern. Die insgesamt 17.525 MitarbeiterInnen in den Wirtschaftsparks entsprechen der Einwohnerzahl einer Kleinstadt.

1.2 IZ NÖ-Süd – Österreichs grösster Wirtschaftspark

Österreichs größter Wirtschaftspark, der mit einer Fläche von 280 ha und rund 300 angesiedelten Betrieben schon zur Kleinstadt angewachsen ist, punktet mit einer besonders verkehrsgünstigen Lage und umfangreicher Infrastruktur:

- Unternehmen vor Ort:
 - Rewe/Billa Zentrale, Castrol Austria, Essilor, IGM Robotersysteme, Isovolta, Kenwood, LKW Walter, Ölz, Tupperware Austria, u.a.
- 58 Mietobjekte der ecoplus, konzipiert nach den Wünschen der Mieter
- direkte Autobahnanschlüsse (A2): Wiener Neudorf und IZ NÖ-Süd

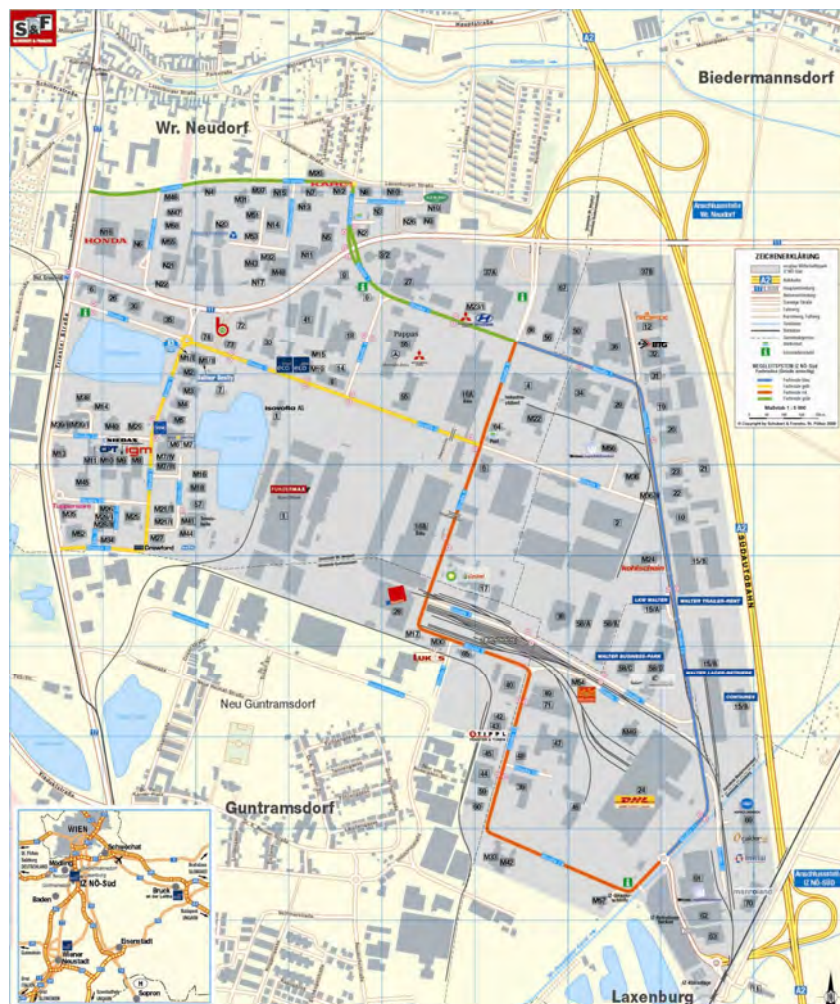


Abb. 1: Übersichtsplan ecoplus-Wirtschaftspark IZ NÖ-Süd

Sämtliche Infrastruktur befindet sich im Eigentum und in Betreuung von ecoplus:

- 17,2 km Straße
- 13,0 km Eisenbahngleise
- Waggonaufkommen/Jahr: 16.000 Waggonen und 195.000 Tonnen
- 17,4 km Regenwasserleitung
- 13,9 km Schmutzwasserleitung
- 16,7 km Trinkwasserleitung
- Kläranlage (15.000 EGW)
- 100.000 m² Grünfläche mit Wiese, Büschen + Bäumen

2 Herausforderung: Plan- und Sachdaten

2.1 Historisch gewachsene Dokumentationen

Das IZ NÖ-Süd wurde vor rund 40 Jahren gegründet. Während dieser Zeit entstanden zahlreiche Pläne und Objekt-Dokumentationen entsprechend den jeweils gebräuchlichen Standards und Normen in den verschiedensten Ausprägungen.

Gerade bei der Herstellung von Plänen gab es in den letzten Jahrzehnten derart gravierende Veränderungen, dass die vielen vorhandenen Dokumente zueinander nicht mehr kompatibel waren. Auch die amtlichen Festpunkte im Landeskoordinatensystem änderten sich zum Teil im Zuge der technischen Weiterentwicklung.

Durch dieses „Historische Wachstum“ gibt es eine große Menge von Bestands-Plänen im Aussenbereich und innerhalb der Gebäude in verschiedenster Qualität, in den verschiedensten Maßstäben, auf verschiedenen Medien (Papier, CAD), mit den unterschiedlichsten Zeichenschlüsseln. Dazu kommen noch die nicht zu unterschätzenden „menschlichen Fehler“ bei der Planerstellung. Die grösste Rolle dabei spielt dabei das bei den meisten Planern sehr schwach ausgeprägte geometrische Grundwissen. Seit der Einführung von CAD wird noch mehr auf das Einmessen von Naturmaßen verzichtet, als früher. Dadurch entstehen zwar grafisch gut aussehende, aber inhaltlich oft unbrauchbare, falsche Plangrundlagen.

Eine weitere Ursache für die vielen mangelhaften Pläne ist die Tatsache, dass stattgefundenen Änderungen wie Neu- Zu- und Umbauten bestenfalls in den dafür benötigten Einreichplänen dokumentiert wurden. Alle übrigen, davon betroffenen Planwerke und Sachdokumentationen wurden meist nicht dem aktuellen Stand entsprechend fortgeführt.

Die Deutsche Sachverständigen-Organisation DEKRA hat in einer umfassenden Studie ermittelt, dass rund 80% aller Mietflächen falsch sind. Ein RTL-Stern-TV-Bericht am 24. Jänner 2007 zu diesem Thema hat die Immobilienbranche im deutschsprachigen Raum gehörig wachgerüttelt. Was für die Mietflächen in Deutschland gilt, gilt generell auch für Bestandspläne in Österreich.

Nachdem mit den vorhandenen Plan- und Objektdokumentationen der hohe Servicelevel der ecoplus nicht auf Dauer fortgeführt hätte werden können, entschloss sich die Unternehmensführung, ein modernes, leistungsfähiges Facility Management auf Basis lebenszyklusbegleitender Plangrundlagen und einem integrierten GIS-CAFM-System einzusetzen.

2.2 Der Universal-CAD-Plan – Hohe Qualitäts-Ansprüche

Unverzichtbare Grundlage effizienter GIS- und CAFM- Systeme sind datenbankfähige, stets aktuelle (und leicht aktualisierbare) CAD-Bestandspläne. Um von den zahlreich vorhandenen, inkompatiblen „Insel-Plänen“ kostengünstig zu einem einheitlichen „Universal-CAD-Plan“ zu kommen, ist Expertenwissen aus den Fachgebieten Vermessung und Planmanagement gefragt.

Es ist nämlich keinesfalls erforderlich, alle Pläne neu zu vermessen. Erfahrene Spezialisten wissen genau, wie viel Potenzial in manchen vorhandenen Planunterlagen steckt, die mit vertretbarem Aufwand auf einen brauchbaren Standard gehoben werden können.

Dabei werden (bestehende) Pläne und Planfragmente höchst effizient gesammelt - bewertet - entrümpelt - ergänzt – und neu strukturiert und zu einer aktuellen und aussagekräftigen Bestandsdokumentation zusammengeführt.

Aber ebenso wichtig ist es, genau die Sollbruchstelle zu erkennen, ab der es besser ist, die alten Pläne nicht mehr zu verwenden, sondern neu zu vermessen.

Ziel aller dieser Bemühungen ist ein:

Universal-CAD-Plan mit gewerkeübergreifenden Inhalten, aus dem jeder Nutzer die auf seine individuellen Bedürfnisse zugeschnittenen Informationen und Spezialpläne leicht abrufen kann. Lebenszyklusbegleitende Aktualität inbegriffen!

Vermessung Schubert zeichnet verantwortlich für die Einführung der CAD Richtlinien, das Aktualisierungskonzept sowie für die Neuvermessung bzw. Adaption der bestehenden Plangrundlagen.

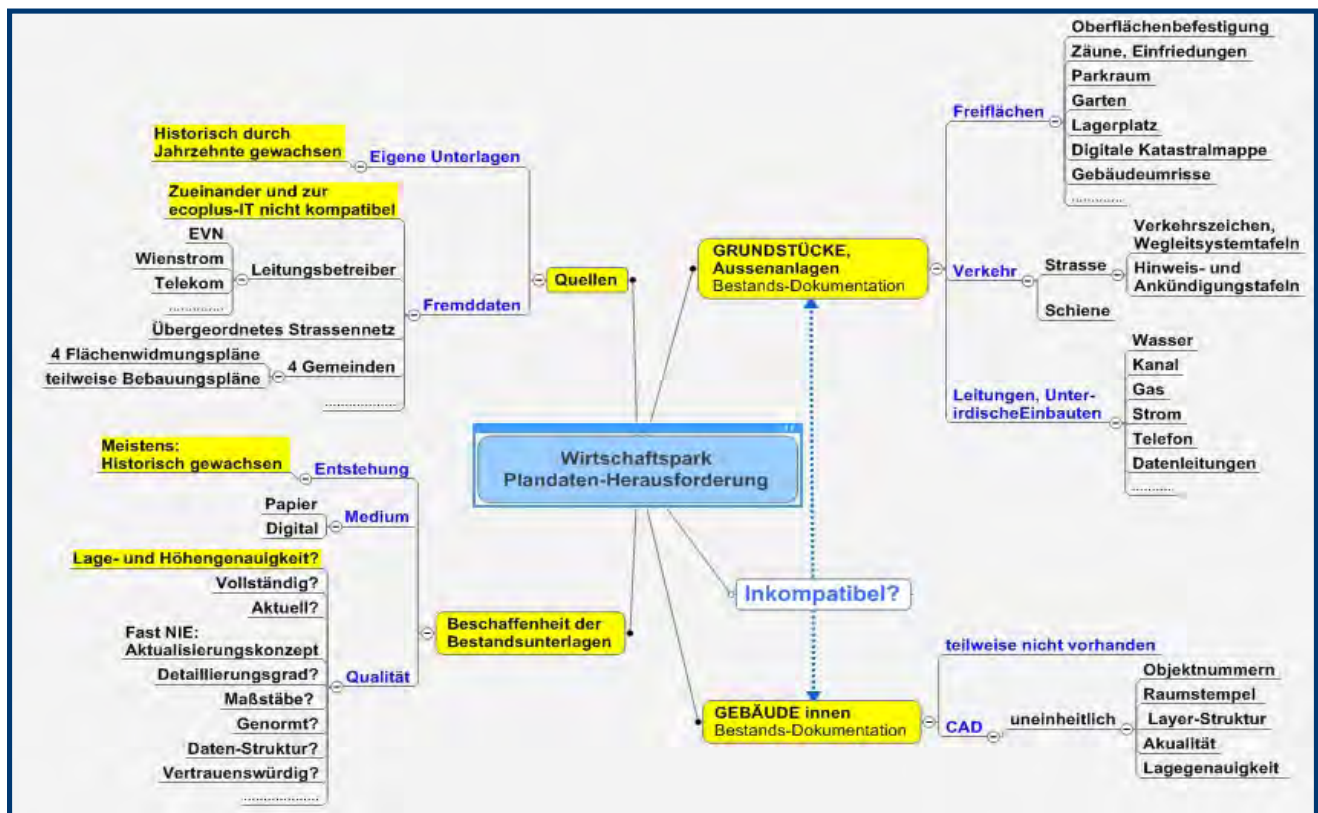


Abb. 2: Plandaten des Wirtschaftsparks - diese Daten-„Hydra“ gilt es zu zähmen!

3 Die Softwarelösung

3.1 Projektziele Wirtschaftspark-Management IZ NÖ-Süd

- Bestandsdaten Gebäude und Außenanlagen
 - Strukturierung
 - Aktualisierung und Neuvermessung
 - Außenanlagen inkl. externen Leitungsträgern, Gemeinden
- Bestehende autarke Lösungen und Workflow's einbinden
 - CAD als führendes Planwerkzeug
 - ECOIFM als führendes Bewirtschaftungsinstrument
- Übergreifende Nutzung von Daten
 - Inhalte von CAD-Plänen auch ohne CAD nutzbar machen
- Optimierung und Beschleunigung von Auswertungen
 - Informationsqualität als Grundlage für Verwaltung und Verwertung

3.2 Software-Leitlinien

Die Softwarelösung wurde von SYNERGIS nach folgenden Gesichtspunkten konzipiert

- Schlanke Standardlösung für GIS und CAFM mit Augenmerk auf einfache Bedienung, zentrale Datenhaltung und Einsatz im Desktop- und Webumfeld
- CAD-Pläne und GIS-Daten als Datengrundlage
- GIS-Lösung für Aufbereitung, Analyse, Auswertung und Ausgabe der Daten von Aussenanlagen
- CAFM-Lösung für Kernbereich der Gebäudeverwaltung / Flächenmanagement auf Raumbene (Grundlage sind Gebäudepläne), Teilbereiche des Mietmanagements, Instandhaltungsmanagement und Grundstücksverwaltung
- Vorhandene funktionierende Lösungen wie ECOIFM und AutoCAD bleiben erhalten und werden über Schnittstellen mit der CAFM-Lösung verbunden
- Die konzipierte CAFM-Lösung soll als Basis für künftige Fachlösungen wie Schliessmanagement, Energiemanagement etc. fungieren

Das Flächenmanagement des CAFM Systems GEBMan verbindet die Bestandsdaten der Gebäude und der Außenanlagen mit den Bewirtschaftungsdaten. Kombiniert mit umfangreichen Infrastrukturdaten erfolgt die Nutzung der topaktuellen Datengrundlage schließlich im Geographischen Informationssystem WebOffice.

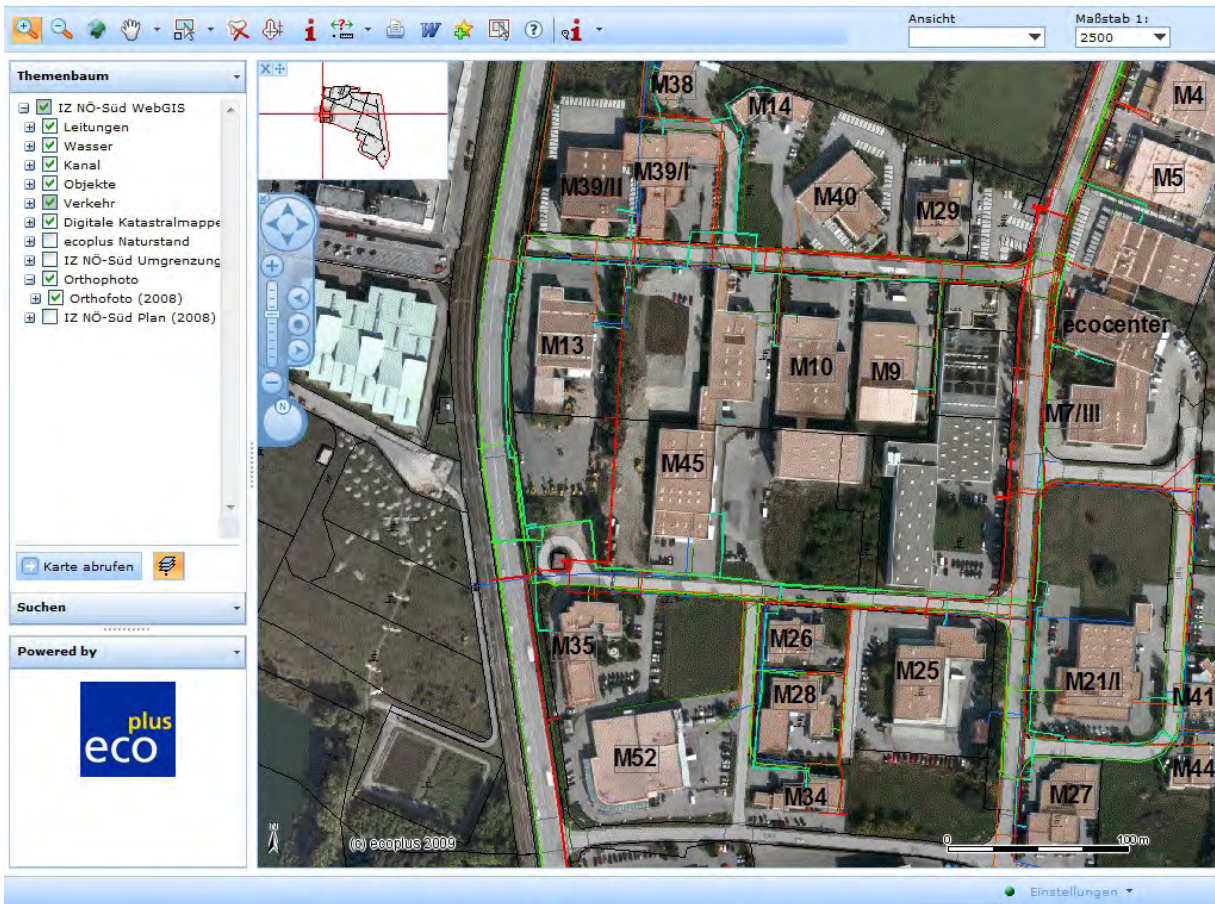


Abb. 5: GIS-Aussenanlagenplan mit Orthofoto

Finanzjahr 2010 Mandant ecoplus iznoesued Gebäudewirtschaft	
Stammdaten	Projekte Anpassung Index Fristen Optionen Fälligkeit
Gebäudestruktur, Mietverträge	Verhältnis <input type="checkbox"/> X Standort <input type="checkbox"/> X
Liegenschaften, Gebäude, Räume, Flächen	Mieter-Nr. <input type="checkbox"/> X Land <input type="checkbox"/> AT <input type="checkbox"/> X
► Projekte	Vertragspartner <input type="checkbox"/> X Bundesland <input type="checkbox"/> X
Zählpunkte	Projekte <input type="checkbox"/> X Adresse <input type="checkbox"/> X
Geräte und Anlagen	Lieg.-Nr. <input type="checkbox"/> X PLZ / Ort <input type="checkbox"/> X
Grundstücke	Liegenschaft <input type="checkbox"/> X Flexible Suche <input type="checkbox"/> X
Flächenmanagement	Gebäude-Nr. <input type="checkbox"/> X Objektsuche <input type="checkbox"/> X
Adressverwaltung	Gebäude <input type="checkbox"/> X Suchen <input type="text" value="GO"/>
Übersichten	
Auswertungen	Projekt Bezeichnung Mieter Liegenschaft
Übergabe Buchhaltung	3 Grundstück-Objekt in IP Wr.Neustadt/14 CONTROL RIZ 14 CONTROL ecoplus, Niederösterreichs Wirtsch. ecocenter
	4 M21/II/1plus12 natural automotive components GmbH 1plus12 natural automotive
	7 Grundstück-Objekt in IP Wr.Neustadt/A & V Auktionen A & V
	9 M07/II/A. M. Personalbereitstellungs GmbH A. M. Personalbereitstellungs GmbH
	10 Grundstück-Objekt in IP Wr.Neustadt/A1 Naturwohnt A1 Naturwohnraumvertriebsunter
	12 61/AAF Luftreinigungssysteme Gesellschaft m.b.H. AAF Luftreinigungssysteme Gesells
	13 M27/ABS PUMPEN Ges.m.b.H. ABS PUMPEN Ges.m.b.H.
	14 M37/ABW Lacksysteme Handelsges.m.b.H. ABW Lacksysteme Handelsges.m.b
	15 M34/AC Fahrzeugbau Motorentechnik Ges.m.b.H. Anton AC Fahrzeugbau Motorentechnik G
	16 Grundstück-Objekt in IP Wr.Neustadt/AC* research AC* research GmbH
	18 Grundstück-Objekt in IP Wr.Neustadt/Accent Gründer Accent Gründerservice GmbH
	20 Grundstück-Objekt in IP Wr.Neustadt/ACP Computer H ACP Computer Handels Ges.m.b.H.
	23 Grundstück-Objekt in IP Poysdorf/Adeg Markt GmbH Adeg Markt GmbH
	30 58/A/AGT Allgemeine Gütertransporte Rudi Hodosi AGT Allgemeine Gütertransporte Ru
	37 Grundstück-Objekt in IP Wolkersdorf/Akuktron Hande Akuktron Handels GmbH
	38 29/AKRAS Flavours AG AKRAS Flavours AG
	40 42/AKUSTIK-BLASCH Schall- u. Wärmedämmung GmbH & C AKUSTIK-BLASCH
	44 M07/II/ALFA LAVAL Mid Europe GmbH ALFA LAVAL Mid Europe GmbH
	46 49/AL-KO Geräte GmbH AL-KO Geräte GmbH
	47 49/AL-KO Systemtechnik GmbH AL-KO Systemtechnik GmbH
	48 41/ALLES KÜCHE Evo Einrichtungsvertrieb GmbH ALLES KÜCHE
	49 N08/ALLROUND/MARIN Alltechnik HandelsgmbH ALLROUND/MARIN Alltechnik Hande
	50 50/ALNO Austria Möbelvertriebs Ges.m.b.H. ALNO Austria Möbelvertriebs Ges.m
	51 M29/ALOKA GmbH ALOKA GmbH
	53 12/ALSECCO Bauchemische Produkte GmbH P.F. Bauchemische Produkte GmbH
	56 04/ALUFIX-FolienverarbeitungsgmbH ALUFIX-FolienverarbeitungsgmbH
	58 36/ALUKÖNIGSTAHL GmbH ALUKÖNIGSTAHL GmbH

Abb. 6: CAFM – Verbindung von Projekt- und Bestandsdaten

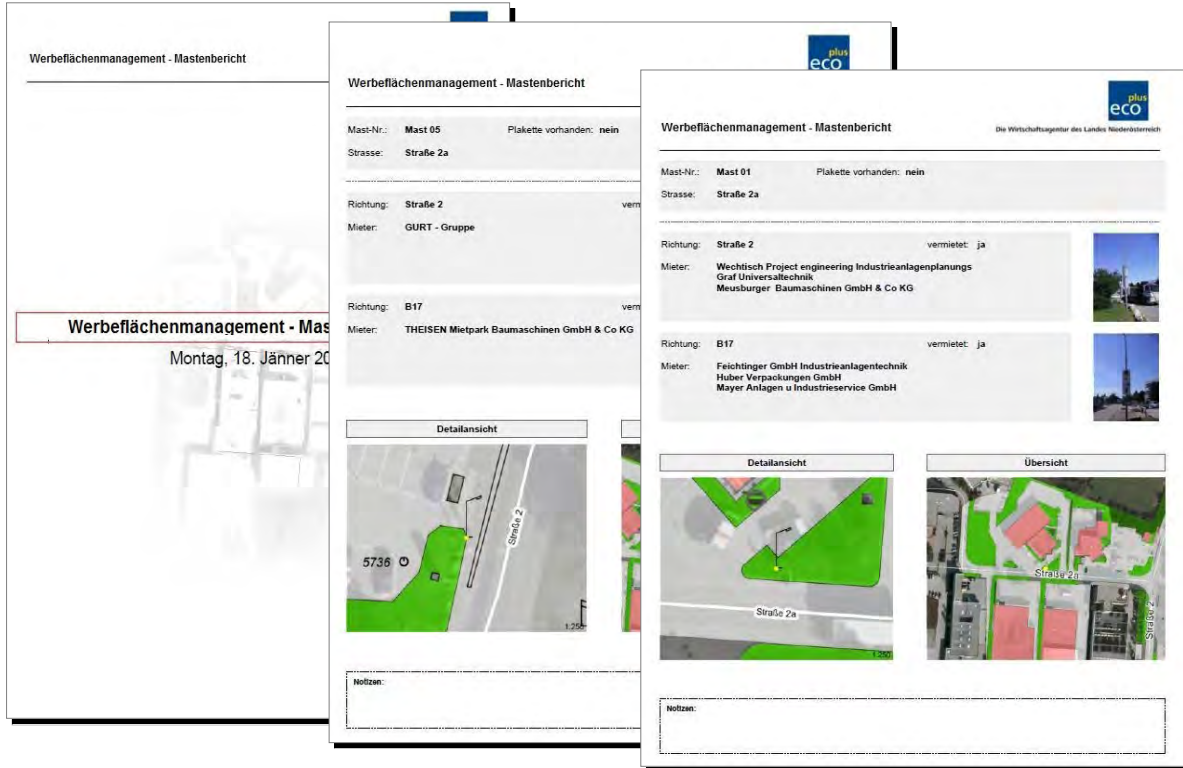


Abb. 7: Report – Mieter, Werbefläche, Mast, Lageplan, Foto

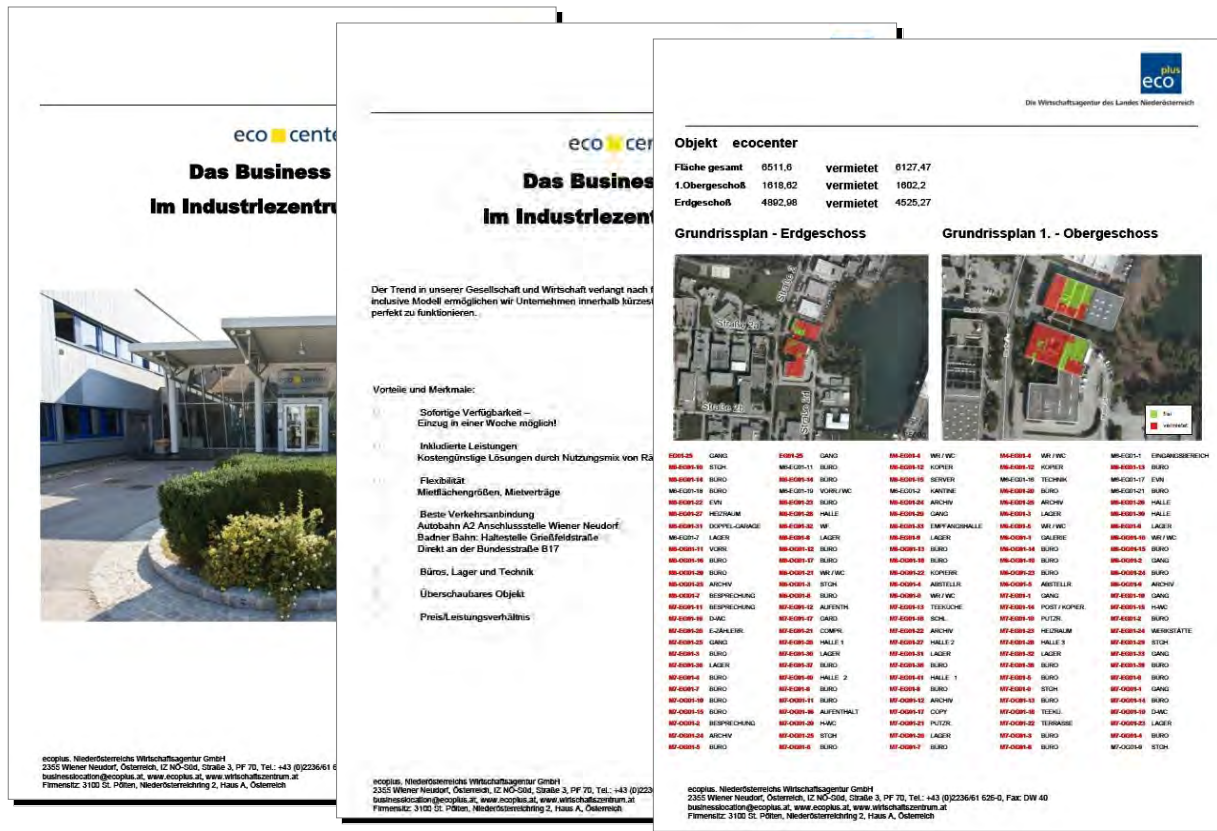


Abb. 8: Report – Expose, Vermietungsstatus live

Räumliches Informationssystem auf Grundlage einer ontologiebasierten Datenstruktur für multidisziplinäre Forschung

GERALD HIEBEL¹, KLAUS HANKE² & INGRID HAYEK³

Für einen multidisziplinären FWF-Spezialforschungsbereichs zur Geschichte des Bergbaus soll ein räumliches Informationssystem aufgebaut werden. Als Datenmodell wird die Ontologie des CIDOC CRM herangezogen, die ein ISO Standard für Kulturgutdokumentation ist. Die Umsetzung erfolgt mit einer Systemarchitektur, die aus einer Datenbank, einem Content Management System und einem Geoinformationssystem (GIS) besteht. Kernstück ist die Datenbank, in der sowohl die ontologisch strukturierten Daten als auch räumliche Objekte und deren Beziehungen miteinander gespeichert sind. Baumstrukturen mit räumlichen Einheiten als Einstiegspunkten helfen hier die von Ontologien erzeugten Netzwerke von Informationen in einem GIS abzubilden und die Daten in ihrem räumlichen Kontext zu visualisieren und zu analysieren.

1 Einleitung

Der multidisziplinäre FWF-Spezialforschungsbereich HiMAT (History of Mining Activities in the Tyrol and Adjacent Areas) an der Universität Innsbruck beschäftigt sich mit der Erforschung paläoökologischer und sozioökonomischer Fragestellungen zum historischen und prähistorischen Bergbau in Tirol, Salzburg, Vorarlberg und Südtirol. Zehn verschiedene Disziplinen aus Geistes- und Naturwissenschaften/technischen Wissenschaften sind daran beteiligt. Eine der Aufgaben unseres Projektteils Vermessung und Geoinformation (HANKE et al. 2009) ist der Aufbau eines räumlichen Informationssystems, das die Integration und Visualisierung der anfallenden Daten aus den verschiedenen Disziplinen in ihrem räumlichen Kontext erlaubt. Für die Verwaltung räumlicher Daten, das heißt für ihre Datenmodellierung und Speicherung, können objektrelationale Geodatenbanksysteme eingesetzt werden (BRINKHOFF 2008). Diese Daten stehen dann für Geoinformationssysteme zur Weiterverarbeitung zur Verfügung. Objektorientierte Datenmodelle ermöglichen im Gegensatz zu relationalen die Abbildung komplexerer Strukturen (EGENHOFER et al. 1992) und FRANK hat die Bedeutung von Ontologie zur Integration von Informationen aus unterschiedlichen Datenquellen in multidisziplinären Projekten hervorgehoben (FRANK 2009). Die Visualisierung der Daten kann auf die verschiedensten Arten erfolgen. Aufgabenstellung innerhalb dieses Projektes war die Präsentation der Daten in Form von über das Internet abrufbaren Karten, die auch als WebGIS bezeichnet werden und einen gewissen Grad an Interaktivität erlauben (KORDUAN et al 2008).

1) Gerald Hiebel, Leopold-Franzens Universität Innsbruck, Arbeitsbereich Vermessung und Geoinformation, Technikerstr.13 6020 Innsbruck, E-Mail: gerald.hiebel@uibk.ac.at

2) Klaus Hanke, Leopold-Franzens Universität Innsbruck, Arbeitsbereich Vermessung und Geoinformation, Technikerstr.13 6020 Innsbruck, E-Mail: klaus.hanke@uibk.ac.at

3) Ingrid Hayek, Leopold-Franzens Universität Innsbruck, Zentraler Informatikdienst, Technikerstr.21 6020 Innsbruck, E-Mail: ingrid.hayek@uibk.ac.at

2 Datenmodellierung - Ontologien

Durch die Organisation der vorhandenen Datenbestände in einem einheitlichen Datenmodell können Synergien für die multidisziplinäre Forschung erzeugt werden. Die unterschiedlichen wissenschaftlichen Konzepten und Forschungsmethoden der teilnehmenden Disziplinen erzeugen eine sehr heterogene Datenbasis. Eine Möglichkeit der Datenmodellierung für komplexe Strukturen sind Ontologien. Sie werden in der Informatik zur Wissensrepräsentation eingesetzt um mit Hilfe einer Konzeptualisierung für einen ausgewählten Teil der Wirklichkeit ein abstraktes, vereinfachtes Modell aufzubauen. Um das Modell aufzubauen wird die Realität in Kategorien strukturiert, die in formalen Ontologien als Klassen bezeichnet werden. Klassen und deren Beziehungen zueinander werden explizit und formal spezifiziert (GRUBER 1993). Es werden die Bedeutungen von Klassen definiert und diese semantische Definition der Klassen sind in der Spezifikation angegeben.

2.1 Die formale Ontologie des CIDOC CRM

Formale Ontologien können für einen speziellen Themenbereich entwickelt werden (GUARINO 1998). Auf der Suche nach einer existierenden geeigneten formalen Ontologie, die unsere Informationen in ihrer Differenziertheit und mit ihren Zusammenhängen abbildet stießen wir auf das vom „Internationalen Ausschuss für Dokumentation“ (CIDOC) des „Internationalen Museumsrates“ (ICOM, International Council of Museums) entwickelte CIDOC Conceptual Reference Model (CIDOC CRM) (CROFTS et al. 2009).

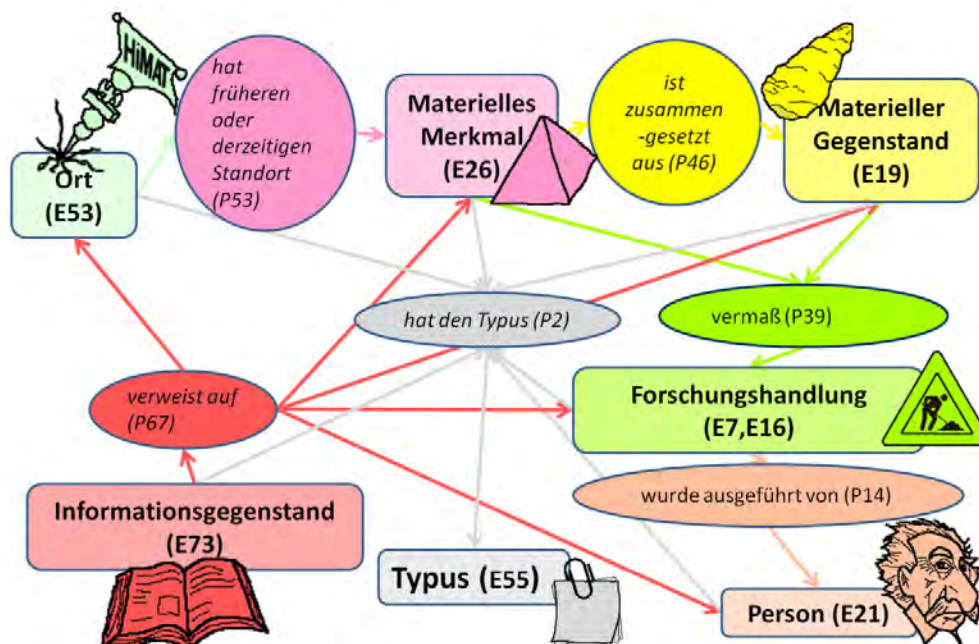


Abb. 1: Wichtigste CIDOC CRM Klassen des SFB HIMAT mit ihren grundlegenden Beziehungen

Diese formale Ontologie wurde 2006 zu einem ISO Standard im Bereich des kulturellen Erbes (ISO 2006). In dieser Ontologie wurden alle Kategorien gefunden, die die Dokumentation der durchgeführten Forschungen, der dabei erhobenen und analysierten Daten, sowie der

angewandten Methoden und der daraus resultierenden Ergebnisse ermöglichen. Es wird ein einheitliches übergeordnetes System geschaffen, das die heterogenen Datenbestände, die aufgrund verschiedenster wissenschaftlicher Ansätze und Forschungsmethoden entstanden sind, gemeinsam nutzbar macht. Aus den 86 Klassen (mit E Nummern identifiziert) des CIDOC CRM wurden elf für unser Projekt ausgewählt, von denen sieben in der Abb. 1 mit ihren wichtigsten Relationen (mit P Nummern identifiziert) dargestellt sind.

2.2 Beispiel der Repräsentation eines archäologischen Ausgrabungsplatzes

Am Beispiel eines prähistorischen Aufbereitungsplatzes für Erze, der sich am Ausgrabungsplatz „Mauk F Schwarzenberg Moos“ befand und an dessen Erforschung mehrere Disziplinen mitgearbeitet haben, sollen Bedeutungen und Relationen von Klassen und ihren Instanzen, sowie die Funktion der Klasse Typus veranschaulicht werden (Abb. 2). Im oberen Teil der Abbildung sind die Klassen angegeben, während mit gleichen Farben im unteren Teil der Abbildung die zugehörigen Instanzen dargestellt sind. Diese Instanzen besitzen einen Eigennamen, der in der ersten Zeile angeführt ist und können einem abstrakten Typus zugeordnet sein, der (falls vorhanden) in einem grau unterlegten Kästchen innerhalb der Instanz angegeben ist.

An dem Ort „Schwarzenberg Moos“ im Sinne geographischer Koordinaten befindet sich das Materielle Merkmal „Mauk F Schwarzenberg Moos“ vom Typus ‚Ausgrabungsplatz‘, wo ein Materielle Gegenstand, ein „Holztrog“ gefunden wurde. Sowohl auf „Mauk F Schwarzenberg Moos“ als auch auf den „Holztrog“ wurden mehrere Forschungshandlungen angewendet. Sie sind mit dem Eigennamen (Instanzenamen) der Forschungen („Pollen MaukF“, „MaukF Vermessung“, „Ausgrabung Mauk F“,...) und den zugeordneten Typus-Bezeichnungen angegeben („Pollenanalyse“, ‚Vermessung‘, ‚Ausgrabung‘,...). Die Forschungshandlungen führten zu bestimmten *Informationsgegenständen*, die wieder mit Eigennamen und ihren Typenbezeichnungen angegeben sind. An den Forschungshandlungen waren konkrete *Personen* beteiligt, die mit ihren Eigennamen angegeben sind.

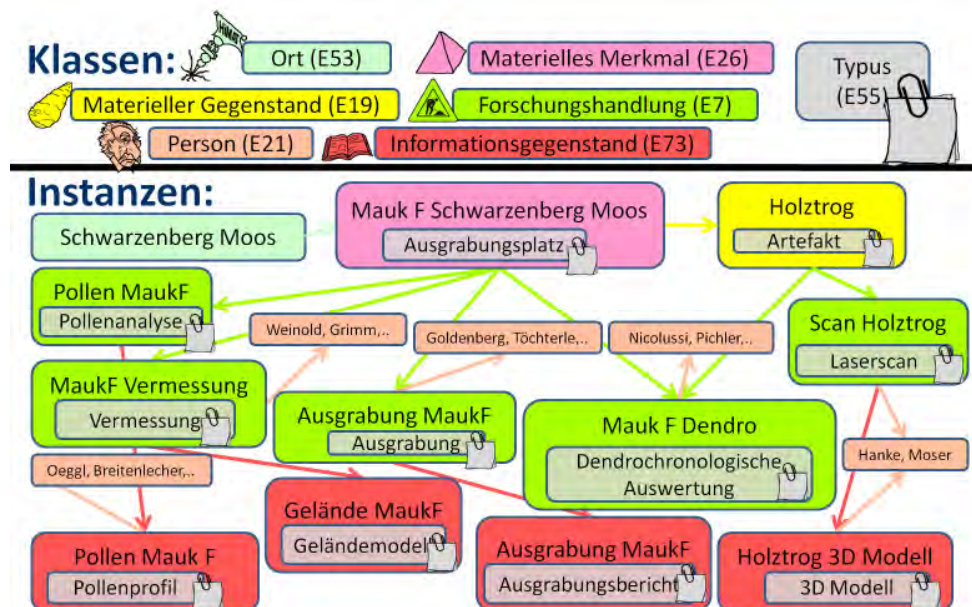


Abb. 2: Beispiel der Repräsentation der Forschungen zum Ausgrabungsplatzes „Mauk F Schwarzenberg Moos“ mit Hilfe von CIDOC CRM Klassen und den entsprechenden Instanzen

3 Systemarchitektur

Für das ontologische Datenmodell, die vorhandenen digitalen Ressourcen und die räumlichen Daten muss eine Systemarchitektur gefunden werden, die es ermöglicht Datenbestände aus den Einzeldisziplinen einzugeben, sie miteinander zu verknüpfen und sie im Gesamtkontext darzustellen. Dafür wurde eine Architektur gewählt, die aus den drei Hauptkomponenten Datenbank, Content-Management-System und GIS/WebGIS besteht (Abb.3). Ergebnis ist eine im Web verfügbare Infrastruktur, in der die von anderen Projektteilen eingegebenen Informationen direkt mit eigenen Informationen verknüpft werden können, unter Nutzung von WebGIS Technologien für räumliche Objekte und mit der Möglichkeit zur Speicherung digitaler Ressourcen in einem Content Management System.

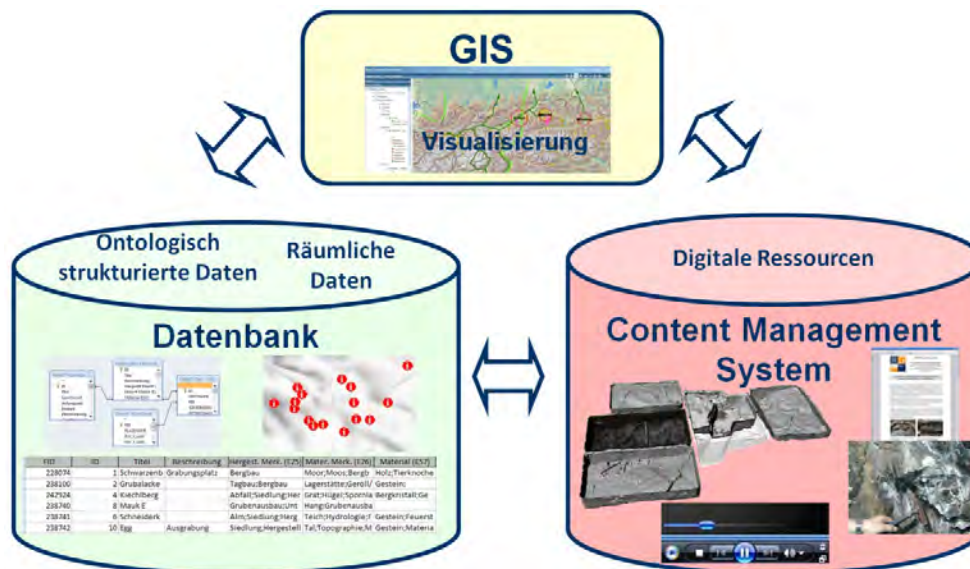


Abb. 3: Systemarchitektur

3.1 Content-Management-System (CMS)

Für die Speicherung von digitalen Daten wie PDFs, Word Dokumenten, Bildern oder auch Audio Dateien wird ein Content Management System (CMS) eingesetzt, das die Verwaltung und Speicherung der Dokumente in einem unabhängigen System erlaubt. Für jede digitale Ressource gibt es eine Web Adresse (URL), über die von berechtigten Benutzern zugegriffen werden kann. Zugriffsrechte werden über die Verwaltung des Content Management Systems festgelegt. Innerhalb der Datenbank werden die URLs (Hyperlinks) auf den Speicherort der Dokumente abgelegt, so dass über die ontologisch strukturierten Daten der Datenbank auf die digitalen Ressourcen des CMS zugegriffen werden kann. In einer ersten Phase der Implementierung wurde das CMS benutzt um die im Kapitel Datenmodellierung entwickelte Datenstruktur mit realen Daten zu testen und es wurde ein Prototyp geschaffen. Dieser verfügte über ein

Eingabeinterface innerhalb des CMS, dass es ermöglichte, die digitalen Ressourcen mit Metadaten zu versehen, die auf Basis des CIDOC CRM organisiert waren. Dadurch wurde es möglich für den Aufbau der Datenbank eine Datenbasis zu schaffen, mit der die Strukturen und Funktionalitäten der Datenbank in der Entwicklungsphase getestet werden konnten.

3.2 Datenbank

Die Datenbank ist der zentrale Bestandteil der Systemarchitektur und soll zur Speicherung von räumlichen Objekten, ontologisch strukturierten Daten, URLs zu den Dokumenten des CMS und den Beziehungen zwischen diesen drei Datenbeständen dienen. Ein nach außen definiertes und offenes System mit der Möglichkeit zur Speicherung räumlicher Basisobjekte und hierarchischer Strukturen ist notwendig und ermöglicht die Verarbeitung der Daten durch unterschiedliche Softwareprodukte. Die ontologische Datenstruktur wird in einem relationalen Datenbank-Schema umgesetzt, um auf bestehende Schnittstellen zu GIS oder anderen Dateneingabe- und Datenausgabesystemen aufsetzen zu können. Die in den Prototypen des CMS eingegebenen Daten wurden in die Datenbank transferiert.

In Abb. 4 werden die fünf Gruppen von Tabellen dargestellt, die notwendig sind um die gewählte Datenstruktur abzubilden. Die Gruppe „Ontologie“ besteht aus drei Tabellen (Klassen, Klassenhierarchien und Eigenschaften), die die Ontologie enthalten, in unserem Fall das CIDOC CRM, aber es könnte auch eine andere Ontologie sein, beispielsweise das vom Centre for Archaeology von English Heritage definierte EH CRM (MAY et.al.2009).

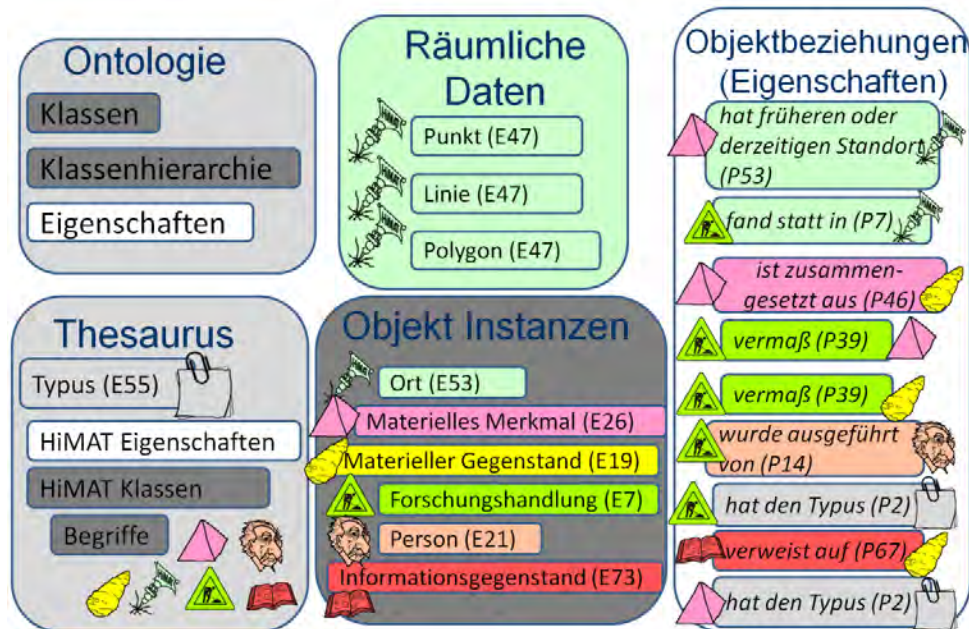


Abb. 4: Tabellengruppen in der Datenbank

Die Gruppe der „Thesaurus“ Tabellen enthält im Moment nur eine Tabelle, die eine hierarchische Ordnung aufweist. In ihr sind die für HiMAT ausgewählten Klassen und Eigenschaften des CIDOC CRM gespeichert. Die notwendigen Begriffe (Typen) zur Spezialisierung des CIDOC CRM für HiMAT sind als Unter-elemente der ausgewählten Klassen eingetragen. Klassen, Eigenschaften und Begriffe können ergänzt werden und so die

ontologische Repräsentation der Implementierung erweitern. Wenn der Thesaurus polyhierarchisch sein sollte, das heißt, dass ein Kindelement mehrere Elternelemente aufweisen kann, so müsste eine zweite Tabelle angelegt werden, analog zur Klassenhierarchien Tabelle in der Gruppe „Ontologie“.

Für die Gruppe „Objekt Instanzen“ wurden sechs Tabellen angelegt, die bestimmten ausgewählten Klassen des CRM entsprechen. Räumliche Daten sind in drei Tabellen gespeichert für Punkte, Linien und Polygone um den Zugriff von GIS zu ermöglichen. Eine weitere Tabelle enthält die „Objektbeziehungen“, die Relationen zwischen Objekt Instanzen, Thesaurus Begriffen und räumlichen Daten. Diese Struktur erlaubt die Wissensrepräsentation in einem erweiterbaren ontologischen Modell und bietet die Möglichkeit räumliche Analysen durchzuführen oder ein GIS mit der räumlichen Komponente der Daten zu nutzen. Die ontologische Struktur der Daten kann komplexe Zusammenhänge abbilden, aber schafft auch Probleme in der Darstellung und Auswertung der Daten. Eine Ontologie schafft ein Netzwerk von Objekten (Abb. 5).

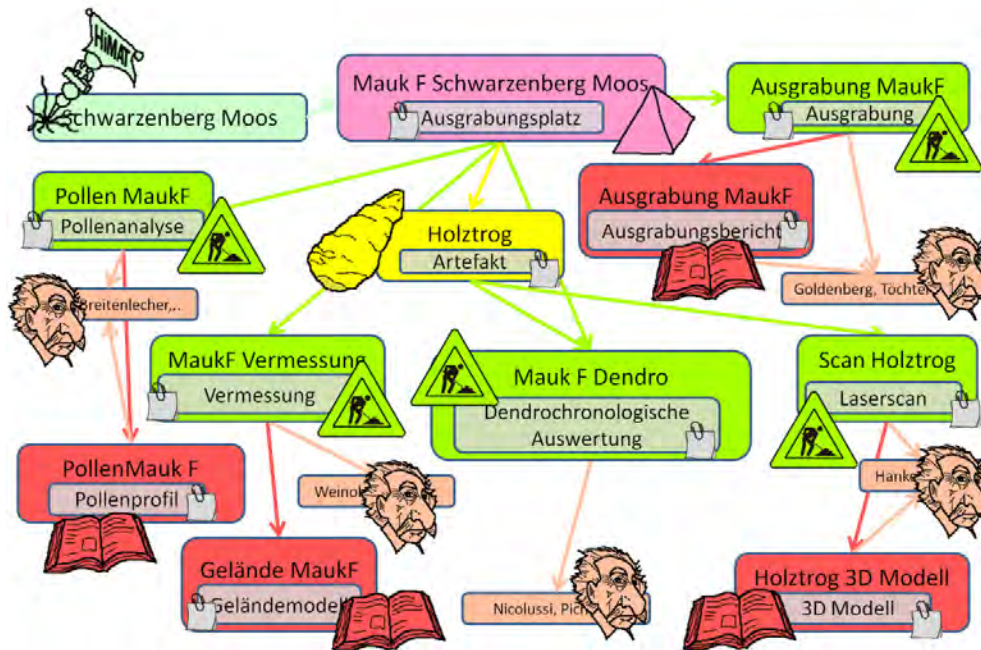


Abb. 5: Ontologische Struktur der Daten schafft Netzwerk von Objekten

Um dieses Netzwerk sowohl dem Benutzer anschaulich, als auch einem GIS zugänglich zu machen, haben wir den Lösungsansatz gewählt es in einer Baumansicht darzustellen. Moderne Datenbanken bieten die Möglichkeiten Baumansichten in einem Benutzerinterface anzuzeigen, wohingegen sich die Darstellungsformen für größere Netzstrukturen noch in Entwicklung befinden. In Abb. 6 ist so eine Baumansicht in der Benutzerschnittstelle der Datenbank gezeigt. Für eine Baumansicht muss immer eine Wurzel definiert werden, ein Einstiegspunkt in das Netzwerk. In unserem Fall wurde der Ort definiert, da dieselbe Ansicht auch für das GIS verwendet werden soll. Damit wird es möglich auch jene Objekte einem Ort zuzuordnen, die nur indirekt mit einem Ort verbunden sind. Beispielsweise ein Informationsobjekt wie ein 3D PDF,

das eigentlich nur einem Gegenstand (dem Holztrog) zugeordnet wurde, der aber wiederum einem Merkmal (Mauk F Schwarzenberg-Moos) zugeordnet ist, das einen Ort hat.

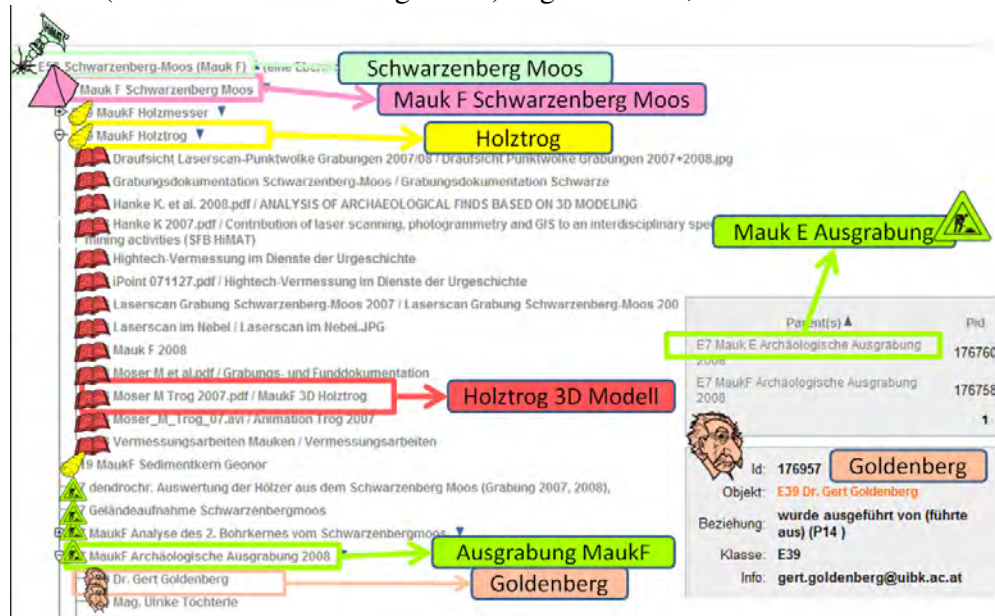


Abb. 6: Baumstruktur der Daten innerhalb der Benutzeroberfläche

3.3 Geoinformationssystem (GIS)

Geoinformationssysteme gliedern sich einerseits in die Software, die GIS Funktionalitäten wie Visualisierung oder Analysen räumlicher Daten zur Verfügung stellen und andererseits in die räumlichen Daten selbst. Das für HiMAT erstellte GIS besteht auf der Datenseite aus Geobasisdaten und den Daten des Projektes. Softwaretechnisch lässt sich zwischen einem Desktop GIS, das auf einem Arbeitsplatz installiert wird und über sämtliche GIS Funktionalitäten verfügt und einem über das Internet zugänglichen WebGIS unterscheiden.

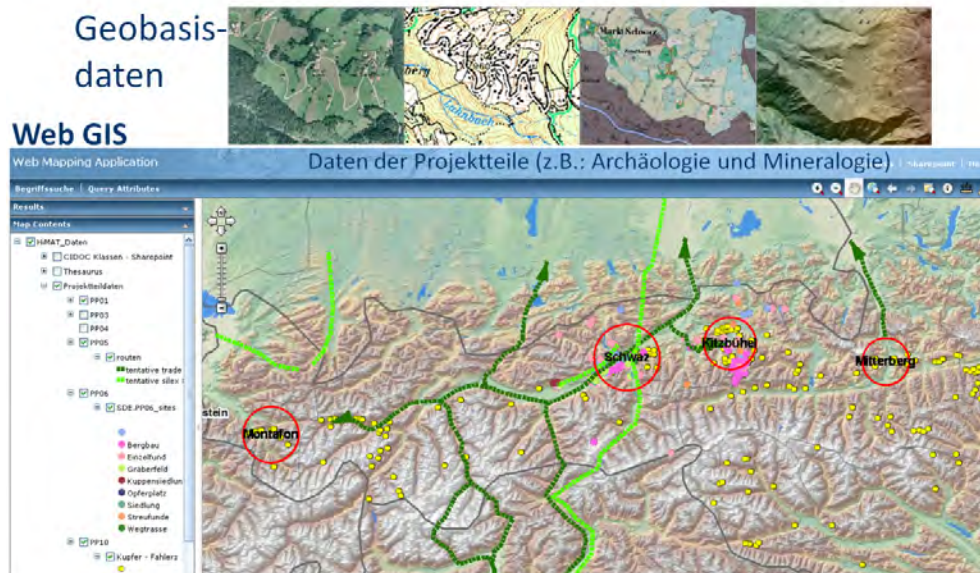


Abb. 7: Geobasisdaten (© Land Tirol, 2008;© BEV, 2007, 2008) und ein Web GIS das die Überlagerung mit Projektdaten darstellt (© SRTM: CIAT)

WebGIS beschränken sich meist auf die Visualisierung räumlicher Daten während Desktop GIS für räumliche Analysen oder die Kartenproduktion verwendet werden, oder auch zur Darstellung von 3D Daten. Im Rahmen unseres Projektteils wurden beide Systeme aufgebaut und eine serviceorientierte Dateninfrastruktur, die sowohl für WebGIS, als auch für Desktop GIS genutzt werden kann. In Abb. 7 sind in der oberen Hälfte Beispiele für Geobasisdaten (Orthophotos, topographische Karte, historische Karte, Digitales Geländemodell) angeführt. In der unteren Hälfte ist ein Web GIS gezeigt, in dem Daten der Projektteile, wie archäologische Fundstellen und mineralogische Lagerstätten visualisiert werden.

Abb. 8 zeigt eine Anwendung in einem Desktop GIS, wo auf die ontologisch strukturierten Daten der Datenbank zugegriffen wird. Das im Hintergrund befindliche digitale Geländemodell aus LIDAR-Daten mit einer Auflösung von einem Meter wurde vom Land Tirol zur Verfügung gestellt und hat besondere Bedeutung bei der archäologischen Prospektion. Die im Bereich Mauken (bei Brixlegg) befindlichen Ausgrabungsplätze sind mit Tortendiagrammen dargestellt. Sie veranschaulichen die an diesen *Orten* vorhandenen Klassen unseres Datenmodells, die durchgeführten *Forschungshandlungen*, die dort befindlichen *Materiellen Merkmale*, gefundene *Materielle Gegenstände* und die sich auf diesen Ort beziehenden *Informationsgegenstände*. Die Größe der Tortendarstellung richtet sich nach der Gesamtanzahl der für den jeweiligen Ort vorhandenen Objekte. Für den aus dem Beispiel in Abb. 2 bekannten Ausgrabungsplatz „Mauk F Schwarzenberg Moos“ wurde über das Identify-Tool auf die dahinter liegenden Daten zugegriffen. Sie werden in der gleichen Baumstruktur angezeigt, wie in Abb. 6.

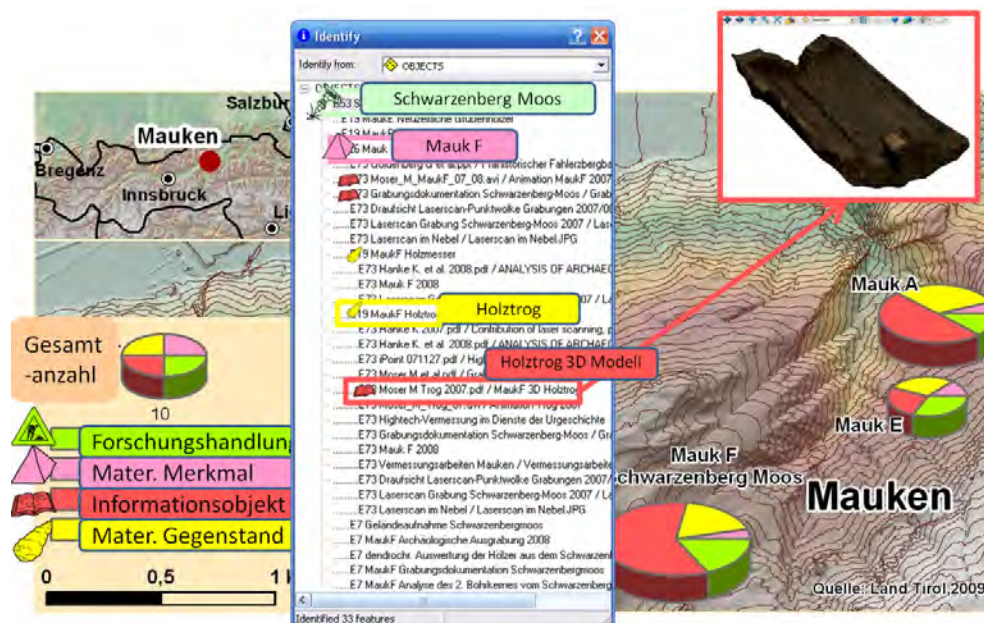


Abb. 8: Geobasisdaten und ein Web GIS das die Überlagerung mit Projektdaten darstellt. Hinter den Daten liegen auch die verbindenden Hyperlinks zu den korrespondierenden Einträgen im CMS. Wird beispielsweise das Informationsobjekt „3D Modell“ das zum Gegenstand

„Holztrog“ gehört ausgewählt, so kann auf das im CMS gespeicherte 3D Modell im PDF Format zugegriffen werden und im Acrobat Reader angezeigt werden. Dieses Beispiel illustriert das Zusammenspiel von Datenbank, GIS und Content Management System mit einer ontologisch strukturierten räumlichen Datenbasis

4 Dank

Wir bedanken uns beim Österreichischen Fond zur Förderung der Wissenschaftlichen Forschung für die großzügige finanzielle Unterstützung des Spezialforschungsbereichs „HiMAT“ (FWF Projekt F3114), bei den Landesregierungen von Tirol, Vorarlberg, Salzburg und der Autonomen Provinz Bozen-Südtirol sowie den Gemeinden in den Bergbaugebieten für die Förderungen und freundliche Unterstützung mit Daten.

5 Literaturverzeichnis

- BRINKHOFF, T., (2008), Geodatenbanksysteme in Theorie & Praxis, 2.Aufl., Wichmann, Heidelberg, ISBN 978-3-87907-472-3
- CROFTS, N., M. DOERR, T. GILL, ST. STEAD & STIFF M., (Hrsg.), (2009), Definition of the CIDOC Conceptual Reference Model Version 5.0.1 Official Release of the CIDOC CRM, http://cidoc.ics.forth.gr/official_release_cidoc.html (8.2.2010)
- EGENHOFER, M. & FRANK, A., (1992), Object-Oriented Modeling for GIS. In: URISA Journal 4(2), S.3-19
- FRANK, A., (2009), What is the use of ontologies concerning organizing data in multidisciplinary projects? In: Anreiter, P.; Goldenberg, G.; Hanke, K.; Krause, K.; Leitner, W.; Mathis, F.; Nicolussi, K.; Oegg, K.; Pernicka, E.; Prast, M.; Schibler, J.; Schneider, I.; Stadler, H.; Stöllner, T.; Tomedi, G.; Tropper, P. (Hrsg.): Mining in European History and its Impact on Environment and Human Societies -- Proceedings for the 1st Mining in European History-Conference of the SFB HiMAT, 12.-15. November 2009, Innsbruck (in press).
- GUARINO, N., (1996), Understanding, Building, And Using Ontologies, <http://ksi.cpsc.ucalgary.ca/KAW/KAW96/guarino/guarino.html> (9.2.2010)
- GRUBER, T. R., (1993), A translation approach to portable ontologies. In: Knowledge Acquisition, 5 (2), Seite 199–220
- HANKE K., HIEBEL G., KOVACS K., MOSER M., (2009): Surveying And Geoinformation - Contributions To An Interdisciplinary Special Research Program On The History Of Mining Activities. 22nd CIPA Symposium, October 11-15, 2009, Kyoto, Japan. The ISPRS International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences and the CIPA International Archives For Documentation Of Cultural Heritage Vol. XXII- 2009 (ISSN 2076-7730)
- HANKE K., HIEBEL G., (2009): Wissensorganisation und ihre raumbezogene Umsetzung in einem multidisziplinären Projekt. In: *Chesi/Weinold (Hrsg.) 15. Internationale Geodätische Woche Obergurgl 2009*. Wichmann-Verlag. ISBN 978-3-87907-485-3
- HIEBEL G., HANKE K., (2010): Concept for an Ontology Based Web GIS Information System for HiMAT. In: Jerem, Erzsébet; Redő, Ferenc; Szeverényi, Vajk (Hrsg.): On the Road to Reconstructing the Past; Proceedings CAA 2008 Budapest, Hungary. 36th Annual

- Conference on Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology; Budapest, 2-6 April 2008. Eigenverlag - CAA 2008.
- ISO (2006), Information and Documentation - A reference ontology for the interchange of cultural heritage information ISO 21127:2006 International Organization for Standardization.
http://www.iso.org/iso/iso_catalogue/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=3442
(12.2.2010)
- KORDUAN, P., ZEHNER M., (2008), Geoinformation im Internet. Wichmann, Heidelberg, ISBN 978-3-87907-456-3
- MAY, K., BINDING, C., TUDHOPE, D., (2009), Following a STAR? Shedding More Light on Semantic Technologies for Archaeological Resources . In: FRISCHER, B.; WEBB CRAWFORD, J.; KOLLER, D.,(Hrsg.), Proceedings of the 37th International Conference, Williamsburg, Virginia, United States of America, March 22-26, 2009, Archaeopress, Oxford, ISBN 978-1-4073-0556-1

Autorenverzeichnis

- A**
Alamouri, Ahmed 236
AlFraheed, Mohammad... 236
ALibrahim, Mohammad... 279
Avbelj, Janja 334
- B**
Bachmann, Martin 405
Barkmann, Henrike 203
Barmettler, Andreas 156
Baur, Nina 342
Belgiu, Mariana 667
Ben Hmida, Helmi 219
Benning, Wilhelm 257
Bleisch, Susanne 71
Bogner, Erich 405
Boochs, Frank 219
Breuer, Michael 643
Briese, Christian 356, 561
Brockmann, Herbert 542
Bucher, Tilman 570
Buchroithner, Manfred 146
- C**
Christen, Martin 325
Cramer, Michael 1, 11
- D**
Damoiseaux, Thomas 532
Denk, Michael 440
Dominik, Wilhelm 279
Dorninger, Peter 61, 504
Drauschke, Martin 228
Döllner, Jürgen ... 51, 79, 366
- E**
Ehlers, Manfred 108
Emmerling, Christoph 447
Engel, Juri 366
Eugster, Hannes 589
Eysn, Lothar 552
- F**
Flückiger, Kevin 589
Focke, Inga 257
Fredel, Annegret 208
Frioud, Max 523
Frischknecht, Christoph .. 414
Förster, Michael 119
Förstner, Wolfgang 228
- G**
Gebhardt, Timo 423
Gege, Peter 405
Ginzler, Christian 165
Glander, Tassilo 51
Gläßer, Cornelia 396, 433, 440
Gopal, Sowmya 532
Grenzdörffer, Görres 187
Grimm-Pitzinger, Albert... 496
Gruber, Michael 616
Gutjahr, Karlheinz 606
Gähler, Monika 127
Götze, Christian 396, 433, 440
- H**
Haala, Norbert 22, 597
Haase, Andreas 542
Habermeyer, Martin 405
Hahne, Kai 288
Hank, Tobias 423
Hanke, Klaus 496, 685
Haschberger, Peter 405
Hastedt, Heidi 22, 485
Hauth, Stefan 477
Hayek, Ingrid 685
Hiebel, Gerald 685
Hill, Joachim 447
Hirschmueller, Heiko 570
Hollaus, Markus 552
Holzwarth, Stefanie 405
Höfle, Bernhard 356
Hütter, Rudolf L. 388
- I**
Iwaszczuk, Dorota 334
- J**
Jacobsen, Karsten 11, 581
Jany, Sven 208
Jensen, Laura 228
Jeschke, Sabina 236
Jung, András ... 396, 433, 440
- K**
Kang, Bong-Gu 257
Karel, Wilfried 376
Kaufmann, Viktor 513
Kemper, Gerhard 156, 650
Kirchgäßner, Ursula 597
Kleinschmit, Birgit 119
- L**
Klonus, Sascha 108
Kneubühler, Mathias 414
Koch, Christoph 156
Kolbe, Thomas H. 99, 308, 342
Koudelka, Otto 606
Krafft, Christian 203
Kremer, Jens 623
Kresse, Wolfgang 658
Krüger, Andreas 308
Kölbl, Otto 631
König, Gerhard 99
Küchler, Meinrad 165
Kühn, Friedrich 298
- M**
Ladstädter, Richard ... 11, 616
Lange, Johannes 257
Leberl, Franz 247
Lenhard, Karim 405
Linkiewicz, Magdalena ... 643
Lorenz, Alexandra 99, 342
Luhmann, Thomas 469
- M**
Magnard, Christophe 523
Mandlbürger, Gottfried ... 356, 376, 542, 561
Marbs, Andreas 219
Mauser, Wolfram 423
Meier, Erich 523
Meixner, Philipp 247
Merbach, Ines 396
Meusburger, Theo 677
Michel, Ulrich 108
Mittlböck, Manfred 667
Morsdorf, Felix 414
Moser, Michael 496
Möller, Matthias 96
Mörth, Oswald 388
Mücke, Werner 552, 561
Müller, Andreas 405
- N**
Nebiker, Stephan 71, 156, 325, 589
Niemeyer, Joachim 298
Nothegger, Clemens 504
- O**
Oehmichen, Katja 195

Ofner, Martin 606
Ogleby, Cliff 86
Otepka, Johannes... 356, 376

P

Peipe, Jürgen 485, 489
Peter, Markus 156
Pfeifer, Norbert. 356, 376, 552
Pfennigbauer, Martin 454
Pregesbauer, Michael 265
Prinz, Reinhard..... 61
Przybilla, Heinz-Jürgen .. 485,
489
Putze, Uwe 597

R

Raggam, Hannes 606
Rain, Wilfried 137
Reinartz, Peter 108
Ressl, Camillo 11, 22
Ressl, Christine 137
Richter, Rico 79
Rieger, Peter 454
Rieke-Zapp, Dirk 485
Rottensteiner, Franz 298

S

Schardt, Mathias 606
Schlienkamp, Andreas 32
Schlüter, Martin 477
Schmutz, Martin 156
Schröder, Michael 542
Schubert, Hanns 677
Schuster, Christian 119
Schwarz, Christian 405
Schwarzmaier, Thomas .. 405
Schötz, Paul..... 405
Spreckels, Volker 11, 32
Stary, Bernd 99
Stilla, Uwe 334
Stracke, Felix 127
Strobl, Josef 667
Studnicka, Nikolaus 454
Stutz, Christian 156
Stümer, Wolfgang 175
Sörgel, Uwe 298

T

Thiele-Bruhn, Sören 447
Thierbach, Cornelia 342
Tomowski, Daniel 108
Truong, Hung 219

U

Ullrich, Andreas 454

V

Vajen, Hans-Hermann 203
Vetter, Michael 552
Vohland, Michael 447
Voigt, Andreas 469
von Schönermark, Maria . 597

W

Wack, Roland 606
Wagner, Wolfgang 376
Waser, Lars 165
Weide, Sebastian 405
Weise, Christian 265
Wennrich, Rainer 396
Wicki, Patrick 271
Wiedemann, Albert 271
Willhauck, Gregor 265
Winter, Stephan 86
Wolff, Kirsten 22
Wondra, Peter 677
Wöhrer, Bruno 376

Z

Zach, Gerald 454