

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



Band 21

2012



Vorträge

**32. Wissenschaftlich-Technische
Jahrestagung der DGPF**

14. – 17. März 2012
in Potsdam

Erblicke – Perspektiven für die Geowissenschaften

ISSN 0942-2870

Publikationen der
Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung
und Geoinformation (DGPF) e.V.
Band 21 487 S., Potsdam 2012
Hrsg.: Eckhardt Seyfert

© Deutsche Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung
und Geoinformation (DGPF) e.V.
Oldenburg 2008

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

Bearbeitung:

Landesvermessung und Geobasisinformation Brandenburg
Heinrich-Mann-Allee 103, 14473 Potsdam
Tel.: (0331) 8844 -229, Fax: (0331) 8844-126

VOWORT

Die Deutsche Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation hat für die 32. Wissenschaftlich-Technischen Jahrestagung vom 14. bis 17. März 2012 in Potsdam das Motto

„Erdblicke – Perspektiven für die Geowissenschaften“

Gewählt. Mit diesem Thema wollen wir bewusst dem renommierten Wissenschaftsstandort Potsdam Rechnung tragen. Geprägt durch die Vielfalt der geowissenschaftlichen Forschungseinrichtungen mit langen Traditionen und neuesten Forschungsprofilen vom Deutschen GeoForschungsZentrums (GFZ), über das Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK), dem Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung (AWI) und dem Institute for Advanced Sustainability Studies (IASS) bis zur Universität und unserer gastgebenden Einrichtung, dem Hasso-Plattner-Institut ist Potsdam prädestiniert als Standort für die Jahrestagung.

Die Vielfalt neuester Entwicklungen in der Sensorik und der Auswertemethodik eröffnen spannende Anwendungen für vielfältige Themen innerhalb der Geowissenschaften und angrenzender Gebiete im globalen, regionalen und lokalen Kontext. Die interdisziplinäre Diskussion neuester wissenschaftlicher und technologischer Entwicklungen und Anwendungen aus in der DGPF vertretenen Arbeitskreisen ist der Gesellschaft ein wichtiges Anliegen.

In diesem Jahr wurden 72 Beiträge angemeldet von denen 49 auf der Tagungs-CD enthalten sind. Insgesamt haben 118 Autoren an den Beiträgen mitgearbeitet. Siebenzehn von ihnen haben zu dieser Jahrestagung mehrfach publiziert.

Im Namen des Vorstandes der DGPF möchte ich mich bei allen Autoren für die eingereichten Beiträge, die es uns erst ermöglichen den Tagungsband herauszugeben, bedanken. Ganz herzlichen danken möchte ich unserem Schriftleiter, Eckhardt Seyfert, für die wie immer perfekte und termin- gerechte Umsetzung.

In diesem Jahr tritt zugleich eine Änderung für den Konferenzband ein. Nachdem in den vergangenen Jahren die Bestellungen für den gedruckten Tagungsband sehr gering waren, ist eine wirtschaftliche Herausgabe eines gedruckten Bandes leider nicht mehr vertretbar. Nach langer und intensiver Diskussion hat der Vorstand beschlossen ab dem Jahr 2012 ausschließlich eine Tagungs-CD herauszugeben. Diese erhalten Sie erstmals im neuen Design, das dem Layout der gedruckten Tagungsbände entspricht.

In diesem Zusammenhang möchten wir auch darauf verweisen, dass alle Beiträge der gedruckten Tagungsbände auch auf der Homepage der DGPF zu finden sind. Wir möchten damit noch stärker zur Verbreitung und Nutzung der Beiträge unserer Tagungen beitragen.

Lokaler Gastgeber ist das Hasso-Plattner-Institut in Potsdam. Wir danken der Institutsleitung für die unkomplizierte und freundliche Bereitstellung der Räume und besonders Herrn Kollegen Jürgen Döllner und seinem Team für die gründliche und engagierte Vorbereitung der Tagung und das interessante und vielfältige Begleitprogramm.

Prof. Dr. habil. Cornelia Gläßer
Präsidentin der DGPF

INHALTSVERZEICHNIS

AUSWERTUNG VON FERNERKUNDUNGSDATEN

SPECIAL SESSION DeCOVER

(Leitung: Horst Weichelt, Birgit Kleinschmit)

BUCK, O.: DeCOVER 2. Aufbau von Fernerkundungsdiensten zur Aktualisierung der Landbedeckung.	9
CHRIST, I. & LESSING, R.: Semantische und geometrische Aspekte der Interoperabilität.	18
FRANKE, J., KEUCK, V. & SIEGERT, F.: Methoden der Fernerkundung zur Unterstützung des FFH-Monitorings – DeCOVER2 Thematische Dienste. ..	26
KARDOŠ, M. & ŽIHLAVNÍK, Š.: Modern Methods of Data Collection in Slovak Forest Management.	36
KLONUS, S., EHLERS, M., SCHOOF, M., WOHLFAHRT, R. & JARMER, T.: Vergleich der radiometrischen und geometrischen Auflösung von RapidEye und SPOT 5.	44
SCHLUND, M., ZILLMANN, E., GRIESBACH, R. & WEICHELDT, H.: Identifikation von Synergieeffekten durch die Verwendung von RapidEye und TerraSAR-X Daten für die Veränderungsdetektion von Landnutzungsgeometrien - Erfahrungen aus DeCOVER 2.	54
SEILER, R.: Analyse linearer Trends in der Phänologie multimodaler Vegetation, Auswertung von NDVI Zeitreihen für das Niger Binnendelta (Rep. Mali / Westafrika).	65
STRAUB, C. & SEITZ, R.: Schätzung von forstlichen Kenngrößen auf der Grundlage von Punktwolken aus digitaler Photogrammetrie und flugzeuggetragener Laserscannermessung.	75
HEIMBERG, U. & ZANTOPP, R.: Luftbildarchäologie römischer Siedlung im Rheinland.	83

AUTOMATISCHE 3D-OBJEKTREKONSTRUKTION

(Leitung: Uwe Weidner, Thomas Kersten)

KERSTEN, T.P., LINDSTAEDT, M., MECHELKE, K. & ZOBEL, K.: Automatische 3D-Objektrekonstruktion aus unstrukturierten digitalen Bilddaten für Anwendungen in Architektur, Denkmalpflege und Archäologie.	137
WIEDEMANN, A. & BECKMANN, A.: Dense Image Matching in der Praxis.	149

3D-STADTMODELLE

(Leitung: Bettina Petzold, Jürgen Döllner)

AVERDUNG, C.: Einsatz von GML-Datenbanken in der 3D-Simulation.	156
ENGEL, J. & DÖLLNER: Immersive Visualisierung von virtuellen 3D-Stadtmodellen und ihr Einsatz in der Stadtplanung.	165
KADEN, R., KRÜGER, A. & KOLBE, T.H.: Integratives Entscheidungswerkzeug für die ganzheitliche Planung in Städten auf der Basis von semantischen 3D-Stadtmodellen am Beispiel des Energieatlases Berlin.	173
MÜLLER-SIEGERT, R. & PRZYBILLA, H.-J.: 3D-Informationssysteme für die Bauphysik: Ein alternativer Ansatz der Gebäudemodellierung.	187

BILDANALYSE UND BILDVERSTEHEN

(Leitung: Uwe Weidner)

IWASZCZUK, D., HOEGNER, L., SCHMITT, M. & STILLA, U.: Linienbasiertes Matching von 3D-Gebäudemodellen mit IR Luftbildsequenzen zur automatischen Texturgewinnung.	195
LOZANO-VEGA, G., BENEZETH, Y., UHLER, M., BOOCHS, F. & MARZANI, F.: Sketch of an automatic image based pollen detection system.	202

FERNERKUNDUNG IN DER GEOLOGIE

(Leitung: Hans-Ulrich Wetzel, Friedrich Kühn)

AKBARIMEHR, M., MOTAGH, M., AKBARI, B., PASHAZADEH, F. & WETZEL, H.-U.: InSAR and GPS analysis of landslides: Application to assess slope stability of Sarcheshmeh and Gougard landslides, Iran.	210
FRANZKE, J.H., WETZEL, H.-U. & KNIEPER, M.: Einsatzmöglichkeiten der Fernerkundung für struktur- und ingenieurgeologische Fragestellungen in gering aufgeschlossenen Kristallgebieten (Süd-Schwarzwald).	217
HAGHSHENAS, M., MOTAGH, M. & SHARIFI, M.-A.: Time-series analysis of interseismic deformation across the Ganos segment of the North Anatolian Fault (NAF) zone, Turkey, from ERS and Envisat PS-InSAR.	225
LUBITZ, C., MOTAGH, M., WETZEL, H.-U., ANDERSSOHN, J., SASS, I. & KAUFMANN, H.: TerraSAR-X time series analysis of surface uplift in Staufen, South-West Germany.	231
MOTAGH, M., WETZEL, H.-U., ROESSNER, S. & KAUFMANN, H.: Potential contribution of TerraSAR-X radar remote sensing for landslide hazard assessment in Kyrgyzstan.	237
NEELMEIJER, J., MOTAGH, M., WETZEL, H.-U. & BUCHROITHNER, M.: Observation of the Surface Velocity Field of Inylchek Glacier (Kyrgyzstan) by means of TerraSAR-X Imagery.	242
TESHEBAEVA, K., SUDHAUS, H., ECHTLER, H.: MOTAGH, M., ROESSNER, S., SCHURR, B., WETZEL, H.-U. & ZUBOVICH, A.: InSAR analysis of the coseismic deformation related to the 2008 Nura earthquake, Pamir-Alai mountains.	249

GEOINFORMATIK

(Leitung: Jürgen Döllner)

BUCHROITHNER, M., EHLERT, G., HETZE, B., KOHLSCHMIDT, H. & PRECHTEL, N.: Ein Systemprototyp zur Unterstützung der Bergrettung auf Basis einer Interaktion zwischen GPS-Tracking und einem digitalen 3D-Felswandmodell.	256
KLIMKE, J. & DÖLLNER, J.: Datenintegration in dienstbasierte 3D-Geovisualisierungssysteme für mobile Geräte.	266
LOESCH, B., CHRISTEN, M. & NEBIKER, S.: OpenWebGlobe – Ein quelloffenes Software Development Kit zur Entwicklung virtueller Globen auf Basis von HTML5 und WebGL.	275
RICHTER, S., PECH, K., KARRASCH, P. & BERNARD, L.: Potenziale und Grenzen einer gemeinsamen Nutzung von In-Situ- und Fernerkundungsdaten für umweltbezogene Gesundheitsanwendungen.	284

HYPERSPEKTRALE FERNERKUNDUNG

(Leitung: András Jung, Jonas Franke)

BEYER, F., GÖTZE, C., GLÄßER, C. & KOPAČKOVÁ, V.: Ableitung geochemischer Parameter aus dem Bedeckungsgrad der Pioniervegetation im Braunkohlerevier Sokolov unter Verwendung von Linear Spectral Unmixing.	294
GROß, W. & MIDDELMANN, W.: Sparseness Inducing Initialization for Nonnegative Matrix Factorization in Hyperspectral Data.	306
JARMER, T., LILIENTHAL, H., EHLERS, M., KLONUS, S. & ROSSO, P.: Hyperspektraldaten zur Erfassung des organischen Kohlenstoffs landwirtschaftlicher Böden.	314
LILIENTHAL, H., RICHTER, N., SIEGMANN, B., JARMER, T., SELIGE, T. & HÖFLE, B.: Erzeugung von Bilddaten aus bodengestützten hyperspektralen Feldmessungen.	323
RICHTER, N., LILIENTHAL, H., KOTTMANN, L., SCHITTENHELM, S., SCHMIEDCHEN, B. & WILDE, P.: Einsatz von hyperspektraler Messtechnik in der Pflanzenzüchtung.	331
SIEGMANN, B., JARMER, T., LILIENTHAL, H., RICHTER, N., SELIGE, T. & HÖFLE, B.: Die Ableitung des Blattflächenindex von Weizenbeständen aus abbildenden Hyperspektraldaten.	339

OPTISCHE 3D-MESSTECHNIK

(Leitung: Thomas Kersten, Danilo Schneider)

HETTI ARACHCHIGE, N. & MAAS, H.-G.: Automatic Building Facade Detection in Mobile Laser Scanner point Clouds.	347
MORÉ, J. & WIEDEMANN, A.: Monoskopische 3D-Geometrieerfassung unter Annahme von Bedingungen aus orientierten Schrägbildern.	355
RICHTER, K., SEIDL, K., SCHNEIDER, D., MADER, D. & MAAS, H.-G.: Entwicklung eines geometrischen Modells für ein voll-reflektives Kamerasystem für Nahbereichsanwendungen.	363
SCHARES, J.-M., HOEGNER, L. & STILLA, U.: Geometrische Untersuchung zur Tiefengenauigkeit des Kinect-Sensorsystems.	372
STALLMANN, D. & KERSTEN, T.P.: Automatisches Texture Mapping von 3D-Modellen in Architektur und Archäologie.	381

RADARFERNERKUNDUNG UND FLUGZEUGLASERSCANNING

(Leitung: Uwe Sörgel)

HILBERT, C., KNUTH, R. & SCHMULLIUS, C.: Ableitung von Waldstrukturparametern mittels TerraSAR-X- und ICESat/GLAS-Daten im Thüringer Wald.	392
PERERA, S.N. & MAAS, H.-G.: A Topology Based Approach for the Generation and Regularization of Roof Outlines in Airborne Laser Scanner Data.	400
SCHACK, L. & SÖRGEL, U.: Nutzung von Nachbarschaftsinformationen zur Validierung der SAR-Tomographie.	410
SCHÄFER, M.: Der Einfluss der Atmosphäre bei der Erfassung von Höhenänderungen mit differentieller Radarinterferometrie.	418

SENSOREN UND PLATTFORMEN

(Leitung: Norbert Haala, Karsten Jacobsen)

CRAMER, M. & HAALA, N.: Genauigkeitspotential der photogrammetrischen Bildauswertung für Daten unbemannter Luftfahrzeuge.	428
JACOBSEN, K.: Potential neuer großformatiger digitaler Kameras.	441
MOTZ, M. & LAUENROTH, G.: Das komplette Sensor-Portfolio aus einer Hand – Hexagon GeoSpatial Solutions.	449
TANG, R., FRITSCH, D. & CRAMER, M.: New Mathematical Self-calibration Models in Aerial Photogrammetry.	457

STANDARDISIERUNG UND QUALITÄTSSICHERUNG

(Leitung: Sven Baltrusch, Wolfgang Kresse)

BALTRUSCH, S.: Aktuelle Normungsverfahren im DIN-Normungsausschuss "Photogrammetrie und Fernerkundung".	470
HOVENBITZER, M.: Auf dem Weg zu der INSPIRE-Datenspezifikation für Höhendaten.	475

AUTORENVERZEICHNIS	480
---------------------------------	-----

POSTER

DeCOVER 2. Aufbau von Fernerkundungsdiensten zur Aktualisierung der Landbedeckung

OLIVER BUCK¹

Zusammenfassung: In DeCOVER 2 werden Methoden der Fernerkundung entwickelt zur Klassifikation und Aktualisierung von Landbedeckungsdaten. Das Forschungs- und Entwicklungsprojekt ergänzt als nationales Schnittstellenprojekt die europäischen Entwicklungen innerhalb des GMES Programms (Global Monitoring for Environment and Security). Durch die Anpassung der Methodenentwicklung an nationale, regionale und fachspezifische Bedürfnisse sollen Behörden in ihren Verwaltungsaufgaben unterstützt werden. Die Arbeiten konzentrieren sich dabei auf drei Entwicklungsbereiche: a) die Unterstützung der bestehenden nationalen Geobasisdatenlandschaft, b) Fachprozesse im Umweltmonitoring zur Umsetzung der Flora-Fauna-Habitat-Richtlinie sowie c) Aufgaben im Agrarmonitoring zur Fortführung von Fachdaten. Dabei werden die Satellitensensoren RapidEye und TerraSAR-X als primäre Datenquelle eingesetzt. Die Umsetzung der Methoden erfolgt über den Aufbau sogenannter DeCOVER Dienste, die in diesem Artikel in einer Übersichtsdarstellung vorgestellt werden:

(1) DeCOVER Aktualisierungsdienste: Aufbauend auf bestehenden Datenmodellen (z.B. Corine Land Cover, ATKIS Basis-DLM) und aktuellen Satellitenbildern werden Änderungsinformationen zur Landbedeckung für diese Modelle bereitgestellt.

(2) DeCOVER Erweiterungsdienste: Stellen für bestehende Datenmodelle neue Objekte/Attribute bereit, die bisher nicht im Modell erfasst werden (z.B. Versiegelungsinformationen für urbane Klassen im ATKIS Basis-DLM).

(3) DeCOVER Thematische Dienste: Liefern Geoinformationen zur Unterstützung von Agrar- und Umwelt-Monitoring auf Basis von Luft- und Satellitenbildern. Beispiele sind die Ermittlung von FFH/LRT-Potentialflächen, Grünlandnutzungsintensitäten, Heide-Veränderungsindikatoren, LPIS Aktualisierungskulissen, sowie Cross Compliance Landschaftselemente.

Das Projekt DeCOVER 2 ist gefördert durch die Bundesrepublik Deutschland - Zuwendungsgeber: Raumfahrt-Agentur des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V. mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages unter den Förderkennzeichen FKZ 50EE0908, 50EE0909, 50EE0910, 50EE0911, 50EE0912, 50EE0913, 50EE0914, 50EE0915.

1 Einleitung und internationaler Kontext

Aktuelle Informationen zur Landbedeckung und zur Entwicklung der Erdoberfläche spielen eine zentrale Rolle in Entscheidungsprozessen der Politik, der Öffentlichkeit und der Wirtschaft. So bilden z.B. langfristige Beobachtungen der Landoberfläche wichtige Zeitreihen zur Modellierung und Vorhersage von Umweltveränderungen und deren Auswirkungen.

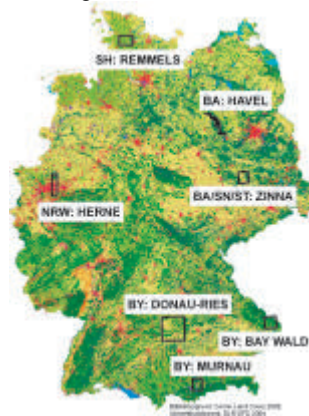
¹ Oliver Buck, EFTAS Fernerkundung und Technologietransfer GmbH, Oststrasse 2-18, 48145 Münster; E-Mail: oliver.buck@eftas.com

Corine Land Cover (CLC) stellt derzeit den einzigen über die nationalen Landesgrenzen hinweg harmonisierten Landbedeckungs- und Landnutzungsdatensatz Europas dar. Mit einem Arbeitsmaßstab von 1:100.000, einem Aktualisierungszyklus von 6-10 Jahren und 44 Objektklassen ist dieser Datensatz vor allem für supranationale und nationale Anwendungen konzipiert. CLC Daten sind verfügbar für die Zeiträume 1990, 2000 und 2006. Innerhalb des Global Monitoring for Environment and Security Programms (GMES), einer Gemeinschaftsinitiative der Europäischen Kommission und der Europäischen Weltraumbehörde, soll CLC für den Referenzzeitraum 2012 fortgesetzt werden und durch fünf zusätzliche hoch aufgelöste europäische Landbedeckungsdatensätze (GMES Land Dienste) ergänzt werden. Diese thematischen Datensätze sollen mit einer Bodenpixelauflösung von 20x20 m Informationen zu Bodenversiegelung, Waldbedeckung, Grünlandverbreitung, Feuchtgebiete und Gewässeroberflächen bieten. Diese Landbedeckungsdaten der GMES Landdienste sollen zudem den Austausch und Synergien zwischen nationalen Landbedeckungsmodellen und Systemen sowie den europäischen Modellen unterstützen. National existieren derzeit verschiedene Ansätze in Europa zur Erstellung, Ableitung und Aktualisierung der CLC Daten. In Großbritannien wird zum Beispiel CLC durch die Generalisierung von detaillierten nationalen Datensätzen erzeugt (FULLER et al. 2005, SMITH et al. 2007). In Finnland wurde die CLC Karte für 2006 auf Basis einer automatisierten Interpretation von Satellitendaten erzeugt, ebenfalls unter Nutzung bestehender digitaler Karten. Darüber hinaus wurden weitere thematische Landbedeckungsklassen für nationale Anforderung per Hand digitalisiert und klassifiziert (TÖRMA et al. 2008). In Deutschland wurde CLC zuletzt in 2006 auf Basis einer visuellen Interpretation von Satellitenbildern (IMAGE 2006 bestehend aus SPOT 4, SPOT 5 und IRS-P6 Satellitenbildern) und unter Nutzung weiterer Zusatzdaten aus Forschungs- und Entwicklungsprojekten (geoland2, GSE Forest Monitoring, DeCOVER Phase 1) durchgeführt (KEIL et al. 2010). Für zukünftige CLC Aktualisierungen wurde durch das Bundesamt für Kartographie in Abstimmung mit dem Umweltbundesamt ein Digitales Landbedeckungsmodell (DLM-DE) erarbeitet. Dabei wird das ATKIS Basis-DLM der Bundesländer um zusätzliche, von CLC geforderte, Objektklassen ergänzt und auf Basis aktueller Fernerkundungsdaten kartiert (ARNOLD 2009). Mit Hilfe dieser aktuellen und geometrisch höher aufgelösten Daten (Maßstab 1:10000) soll dann der nationale CLC Beitrag (1:100000) durch automatisierte Generalisierungs-Routinen abgeleitet werden (THIEMANN et al. 2011). Eine erste nationale Umsetzung des DLM-DE Modells erfolgte zum Referenzzeitpunkt 2009. Für den Zeitraum 2012 ist eine Aktualisierung in Planung (BKG 2011). In diesem Kontext wurde DeCOVER als nationales GMES Schnittstellenprojekt initiiert, mit dem Ziel, diese Entwicklungen zu ergänzen. Dabei sollen Methoden entwickelt werden, die deutsche Fachbehörden in ihren Verwaltungsaufgaben unterstützen können. Die Bereitstellung aktueller Informationen zur Landbedeckung sowie deren Veränderungen soll dabei an nationale und regionale Bedürfnisse angepasst werden. Im Fokus der Entwicklungen steht dabei die Fortführung der bestehenden nationalen Geobasisdatenlandschaft (z.B. ATKIS Basis-DLM, DLM-DE) sowie die Unterstützung spezifischer Fachprozesse zur Umsetzung der Flora-Fauna-Habitat-Richtlinie sowie zur Erfüllung von Monitoringaufgaben und der Fortführung von Fachdaten im Bereich der Landwirtschaft. Dabei werden als primäre Fernerkundungsdaten-Quellen die neuen Satellitensensoren RapidEye und TerraSAR-X genutzt.

2 Konzeption der DeCOVER Dienste und Testumsetzungen

Ähnlich dem Aufbau der europäischen GMES Landdienste, erfolgt auch in DeCOVER die Bereitstellung der Informationen, die zur Fortführung von Fachdaten, oder Unterstützung von Fachaufgaben notwendig sind, über sogenannte Dienste (Services im GMES Kontext). Übergeordnetes Entwicklungsziel der DeCOVER Dienste ist eine möglichst hohe Automatisierung der komplexen Prozesskettenabläufe eines Dienstes (Datenintegration /Überführung, Bildanalyse, Ergebnis-Bereitstellung). In DeCOVER werden drei Gruppen von Diensten unterschieden, abhängig von ihrer thematischen Ausrichtung:

- DeCOVER Aktualisierungsdienste: Aufbauend auf bestehenden Datenmodellen und aktuellen Satellitenbildern werden Änderungsinformationen zur Landbedeckung für diese Modelle bereitgestellt.
- DeCOVER Erweiterungsdienste: Stellen für bestehende Landbedeckungs-Datenmodelle neue Objekte/Attribute bereit, die bisher nicht im Modell erfasst werden (z.B. Versiegelungsinformationen für urbane Klassen im Basis-DLM).
- DeCOVER Thematische Dienste: Liefern Geoinformationen zur Unterstützung von Agrar- und Umwelt-Monitoring auf Basis von Luft- und Satellitenbildern.



Der Aufbau der DeCOVER Dienste erfolgt anhand von exemplarischen Datenmodellen und innerhalb verschiedener Testregionen (Tab. 1, Abb.1)

Abb. 1. Übersicht der DeCOVER 2 Testgebiete

Tab. 1: Übersicht der DeCOVER 2 Testumsetzungen

Testgebiet	Dienst	Eingesetzter Sensor (Aufnahmejahr)	Ausgangs-Nutzerdaten/Modell (Aktualisierungsstand)
1. Testumsetzung Aktualisierungs- (AK)- und Erweiterungsdienste (EW)			
Herne	AK Veränderung	RE, TXS (2009)	ATKIS Basis-DLM (2006)
	AK Aktualisierung	RE, TSX (2009)	ATKIS Basis-DLM (2006)
	EW Urban	RE, TXS (2009)	ATKIS Basis-DLM (2006)
Zinna	EW Umwelt	RE (2010)	AAA ATKIS Daten (2010)
	AK Veränderung	RE (2009)	CLC (2000)
	AK Aktualisierung	RE (2009)	CLC (2000)
2. Testumsetzung Aktualisierungsdienste (AK)			
Herne	AK Veränderung	RE, TSX (2010)	AAA ATKIS Daten (2008) ¹⁾
	AK Aktualisierung	RE, TSX (2010)	AAA ATKIS Daten (2008) ¹⁾
Zinna	AK Veränderung	RE, TSX (2011)	DLM-DE (2009)
	AK Aktualisierung	RE, TSX (2011)	DLM-DE (2009)
Testumsetzung Thematische Dienste Agrar			
Herne	LPIS	DOP, RE (2009)	LPIS Referenz (2005) nur Teil des Gebiets
	Acker	RE (2010)	ATKIS Basis-DLM (2006)
	Cross Compliance-LE	WV-2, RE (2010,2011)	Landschaftselemente Kulisse (2010)
Rommels	Acker	RE (2010)	ATKIS Basis-DLM (2006)
Zinna	LPIS	DOP, RE (2009, 2010)	LPIS Referenz (2006) nur Teil des Gebiets

Testumsetzung Thematische Dienste Umwelt			
Herne	FFH_Wald	RE (2010)	
	FFH_Heide_Indikatoren	WV-2, DOP (2010,2011)	Vor-Ort-Kartierung (2011)
Murnau	FFH_Moorrenaturierung	RE, TXS (2009-2011)	
	FFH_Grünlandnutzung	RE (2009-2010)	
Donau-Ries	FFH_LRT-Potentialflächen	RE (2010-2011)	Biotopkartierung, ATKIS Basis DLM (2006)
Bay. Wald	FFH_Wald	RE (2009-2011)	
Zinna	FFH_Verbuschung	RE, TXS (2010)	
Havel	FFH_Überflutung	RE, TXS (2010-2011)	

¹⁾Die ATKIS AAA Daten wurden thematisch rückdatiert mit DLM Daten aus 2008

3 DeCOVER Aktualisierungs- und Erweiterungsdienste

Die Prozesskette der DeCOVER Aktualisierungsdienste besteht im Wesentlichen aus fünf Hauptschritten (Abb. 2). Im ersten Schritt werden die Eingangsdaten zur Prozessierung bereit gestellt. Dabei handelt es sich um einen Vektordatensatz, dessen Inhalte aktualisiert werden sollen, sowie aktuelle Satellitenbilddaten als Informationsquelle zur Fortführung. Als exemplarische Vektoreingangsdaten wurden Daten der Modelle CLC, DLM-DE und ATKIS Basis-DLM (AAA Modell) im Zuge der verschiedenen Testumsetzungen genutzt (Tab. 1). Um den Anpassungsbedarf der gesamten Prozesskette für die Anwendung auf die verschiedenen Eingangsdatenmodelle zu minimieren, sind in DeCOVER semantische Überföhrungsroutinen entwickelt worden. Mit Hilfe dieser Routinen werden die Objekte der Eingangsdaten in das DeCOVER Datenmodell (DeCOVER 2011) semantisch und geometrisch überföhrt.



Abb. 2: Schematischer Ablauf der Prozesskette DeCOVER Aktualisierungsdienst

Im nächsten Prozessschritt erfolgt die automatisierte Bildanalyse in zwei Stufen. Zuerst erfolgt eine Vorauswahl veränderter Flächen zur Fokussierung der weiteren Bildanalyse. Hierbei werden die Vektor-Eingangsdaten mit einem Raster-Fernerkundungsdatensatz verglichen. Der Vergleich erfolgt dabei über eine Modellbildung, in dem die Objekte der Eingangsdaten in idealtypische Referenzsignaturen für jede Klasse übersetzt werden. Im Zuge der Testumsetzungen wurden diese Bildverarbeitungsmethoden auf die Sensoren TerraSAR-X (SCHLUND & PONCET 2011) und RapidEye (REEDER et al 2011) optimiert. Über den Vergleich aller Objekte mit den jeweiligen Referenzsignaturen werden Bereiche mit einer hohen Veränderungswahrscheinlichkeit für die zweite Klassifikationsstufe ausgewiesen. In dieser erfolgt die Klassifikation der Veränderungsrichtung auf Basis multitemporaler RapidEye

Aufnahmen. Dazu werden die Objekte entsprechend ihrer thematischen Zugehörigkeit getrennt, und mit angepassten Klassifikationsmodellen für die Bereiche Urban, Agrar, Gewässer, Wald, Naturnah weiter verarbeitet. Die zuvor ausgewiesenen Veränderungsbereiche werden nun mit einer neuen Zielklassen (im DeCOVER Datenmodell) attribuiert. Die Ergebnisse werden nach einer internen Qualitätssicherung als Ergebnisdaten aufbereitet. Sie werden semantisch und bei Bedarf auch geometrisch in das Datenmodell der Eingangsdaten rückgeführt und können somit für eine Aktualisierung dieser Daten genutzt werden. Für die Testgebiete wurde die Ergebnisse im DeCOVER Geodatenportal eingestellt, und können nach einer Registrierung als Web Service genutzt werden (Abb. 3).



Abb. 3: Darstellung der Ergebnisse des Aktualisierungsdienstes (oben) und des Erweiterungsdienstes Urban (unten) im DeCOVER Geodatenportal am Beispiel ATKIS Basis-DLM im Testgebiet NRW (Herne).

Im Zuge der DeCOVER Erweiterungsdienste werden bestehende Daten(modelle) über zusätzliche Attribute oder Klassen angereichert. Innerhalb von DeCOVER wurden hierzu Methoden in zwei thematischen Bereichen (Urban und Naturnah) entwickelt und demonstriert. Im urbanen Bereich wurden das Datenmodells ATKIS Basis-DLM um eine Einstufung bebauter Bereiche in verschiedene Versiegelungsgrade erweitert. Die Erweiterung erfolgt über die Detektion versiegelter Flächen auf Grundlage von Fernerkundungsdaten eines Referenzjahres. Als Ergebnis werden die ATKIS Basis-DLM Polygone mit einem neuen Attribut zum Versiegelungsgrad geliefert (Abb. 3). Im naturnahen Bereich wurde demonstriert, dass mit Hilfe multitemporaler Satellitenbilder eine Erweiterung der ATKIS Basis-DLM Klassen Grünland, Heide und Moore um zusätzliche Klassenausprägungen möglich ist.

4 DeCOVER Thematische Dienste Agrar-Monitoring

Die Entwicklung sogenannter „Thematischer Dienste“ ist die dritte und umfangreichste Säule der DeCOVER Dienste-Entwicklungen. Hier wurden für spezifische Fachanforderungen neue Methoden der Bildanalyse untersucht. Im Bereich Agrarmonitoring stützten sich die Entwicklungen auf die Anforderungen aus drei Bereichen. Dem Cross Compliance Monitoring zur Erhaltung von Landschaftselementen nach Verordnung (EG) Nr. 73/2009, der Aktualisierung der Referenzparzellen innerhalb des Landparzellen-Informationssystem (LPIS) gemäß der Verordnung (EG) Nr. 1122/2009, sowie dem Monitoring von landwirtschaftlichen Anbauflächen für Zwecke der Klimamodellierung, des Gewässerschutzes und der Raumplanung.

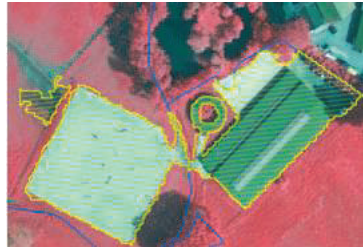


Abb. 4: Ausweisung von Veränderungen (gelb) innerhalb bestehender LPIS Referenzflächen (blau)

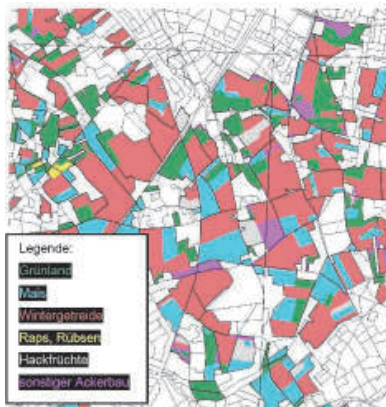


Abb. 5: Ergebnisse der Ackerklassifikation integriert in die ATKIS Basis DLM Geometrie

Für die Aktualisierung des LPIS wurde ein zweiskaliger Ansatz unter Verwendung hochauflösender Orthophotos und multitemporaler RapidEye Satellitendaten entwickelt, der die Aktualisierung effizient unterstützt (BUCK et al 2011a) (Abb. 4). Für die Ausweisung landwirtschaftlicher Kulturarten-gruppen wurde eine multitemporale Klassifikation entwickelt unter Verwendung sogenannter Conditional-Random-Fields (HOBERG & MÜLLER 2011). Die Ergebnisse wurden exemplarisch als Zusatzinformationen in bestehende ATKIS Basis-DLM Daten integriert (Abb. 5).

Aufbauend auf früheren Arbeiten zur Erfassung von Landschaftselementen (VÖLKER & MÜTERTHIES 2008) wurden auf Basis von RapidEye Aufnahmen detaillierte Gehölzklassifikationen erstellt. Diese werden mit Hilfe von GIS Operationen zur

Verifikation/Falsifikation von bestehenden Landschaftselementen genutzt.

5 DeCOVER Thematische Dienste Umweltmonitoring

Zur Entwicklung dieser thematischen Dienste wurden gezielt Fachanforderungen im Zusammenhang mit den Berichtspflichten der FFH-Richtlinie (92/43/EWG) zur Überwachung des europäischen Schutzgebietsnetzwerks Natura2000 berücksichtigt (Abb. 6). Das gemeinsame Ziel der Entwicklungen ist die Unterstützung der Geländearbeiten zum FFH Monitoring im

Sinne einer a) Erkennung und Ausweisung von Gebieten mit hoher Veränderungsdynamik (zur Fokussierung notwendiger Geländeressourcen) und b) Bereitstellung von thematischen Informationen und Abgrenzungen zur Bewertung ausgewählter FFH Lebensraumtypen. Dabei werden verschiedene Bilddaten eingesetzt. So wurde z.B. im Untersuchungsgebiet Murnau/Bayern allein auf Basis von RapidEye Daten eine kontextbasierte multitemporale Klassifikation unter Berücksichtigung der Klassen Grünlandumbruch, extensiv bewirtschaftetes Grünland, intensiv bewirtschaftetes Grünland und naturnahes Grünland umgesetzt. Im Testgebiet Herne/NRW wurde hingegen ein zwei-skaliger Ansatz gewählt unter Verwendung sehr hoch aufgelöster Geoeye-Satellitenbilder in Kombination mit RapidEye Daten zur Klassifikation von Heide-Lebensräumen (BUCK et al 2011b). Die Entwicklung der Thematischen Dienste ist noch nicht abgeschlossen und weitere Veröffentlichungen der Ergebnisse geplant.

<p>LRT-Beeinträchtigung durch Verbuschung</p> <p>Ziel: Erkennung von Beeinträchtigungen bei Offenland LRT durch Verbuschung</p> <p>Anwendung: FFH-Monitoring</p>	<p>Nutzungsintensitäten von Grünland</p> <p>Ziel: Ableitung unterschiedlicher Nutzungsintensitäten von Grünland</p> <p>Anwendung: Monitoring Streuwiesennutzung, Überwachung Energiepflanzenanbau, Auennutzung</p>	<p>Klassifikation von LRT-Potentialflächen</p> <p>Ziel: Identifikation von LRT 6510 Potentialflächen (Magere Flachland-Mähwiesen)</p> <p>Anwendung: Unterstützung der Vor-Ort-Kartierungen durch Flächenvorauswahl und Flächengrenzen</p>	<p>Moorrenaturierung</p> <p>Ziel: FE-Möglichkeiten zur Unterstützung der Planung und Evaluierung von Moorrenaturierungsprojekten</p> <p>Anwendung: Moorentwicklungskonzept, Emissionshandel, Klimaschutz</p>
<p>Monitoring von Überflutungsflächen</p> <p>Ziel: Monitoring von Überflutungsflächen</p> <p>Anwendung: Reporting im Rahmen der EU-Wasser-rahmenrichtlinie</p>	<p>Monitoring Waldveränderung</p> <p>Ziel: Identifikation von Waldstrukturveränderungen</p> <p>Anwendung: FFH-Monitoring, Fokussierung der Vor-Ort-Kartierungen durch Veränderungsindikation</p>	<p>Monitoring Heide-LRT</p> <p>Ziel: Indikator-klassifikation von Heidegebieten</p> <p>Anwendung: FFH-Monitoring, Fokussierung der Vor-Ort-Kartierungen durch Veränderungsindikation</p>	<p>*LRT = FFH Lebensraumtyp</p>

Abb. 6: Thematische Dienste Umweltmonitoring - Übersicht der Themenfelder

6 Fazit

DeCOVER wurde als nationales GMES Schnittstellenprojekt initiiert, um aktuelle Entwicklungen in diesem europäischen Kontext auf nationale und fachspezifische Anforderungen anzupassen. Mit der Entwicklung sogenannter DeCOVER Dienste konnte dem Rechnung getragen werden. Durch neue Bildverarbeitungsprozesse in Kombination mit semantischen und geometrischen Überführungsmethoden können Veränderungen der Landbedeckung erkannt und für die Aktualisierung bestehender Daten genutzt werden. Mit Hilfe

dieser Methoden kann sowohl die nationale Geodatenbasis, als auch die geplante Ableitung und Aktualisierung von CLC aus dem nationalen Landbedeckungsmodell DLM-DE unterstützt werden. Noch offen ist, in wie weit die entwickelten Methoden auch die geplanten GMES Land Dienste unterstützen können, bzw. ob diese Daten auch Eingang in die DeCOVER Prozessketten als Zusatzinformationen finden können. Hier ist die erstmalige Erstellung der hoch auflösenden Datenlayer bis 2013 abzuwarten.

Fachaufgaben des Umwelt- und Agrar-Monitorings werden über die thematischen DeCOVER Dienste bedient. Hier wurde in verschiedenen Themenfeldern gezeigt, wie Methoden der Fernerkundung das Monitoring von Schutzgebieten, sowie die Fortführung von Fachdaten in diesen Bereichen unterstützen können. Erste Ergebnisse zeigten z.B. Effizienzsteigerungen zur Aktualisierung von LPIS Referenzdaten, Möglichkeiten zur Ableitung und Integration von landwirtschaftlichen Anbauinformationen (Kulturarten, Nutzungsintensitäten) in bestehende Geodaten.

7 Literaturverzeichnis

- ARNOLD, S., 2009: Integration von Fernerkundungsdaten in nationale und europäische Geodateninfrastrukturen – Ableitung von Corine Land Cover-Daten aus dem DLM-De. Photogrammetrie Fernerkundung Geoinformation, 2, S. 129-141.
- BKG, 2011: Digitales Landbedeckungsmodell für Deutschland (DLM-DE). Bundesamt für Kartographie und Geodäsie. http://www.bkg.bund.de/nn_147352/DE/Bundesamt/Produkte/Geodaten/Landbedeckungsmodell/DLM-DE_node.html_nnn=true. (letzter Zugriff 16.01.2012).
- BUCK, O., PETER, B. & BÜKER, C., 2011A: Zwei-skaliger Ansatz zur Aktualisierung landwirtschaftlicher Referenzkulissen (LPIS): Photogrammetrie-Fernerkundung-Geoinformation (PFG), 5, S. 333–342.
- BUCK, O., PETER, B., VÖLKER, A. & DONNING, A., 2011B: Object based image analysis to support environmental monitoring under the European Habitat Directive: a case study from DECOVER. ISPRS Hannover Workshop 2011: High-Resolution Earth Imaging for Geospatial Information, Hannover, Germany, June 14 to June 17, 2011.
- DECOVER, 2011: DeCOVER Objektartenkatalog (MSL 3304 Beschreibung des DeCOVER Aktualisierungsdienstes). http://www.decover.info/public/MSL_3304_DIMM_V1.3.pdf Zuletzt besucht 13.01.2012.
- FULLER, R., COX, R., CLARKE, R., ROTHERY, P., HILL, R. & SMITH, G., 2005: The UK land cover map 2000: Planning, construction and calibration of a remotely sensed, user-oriented map of broad habitats. International Journal of Applied Earth Observation, 7, S. 202–216.
- HOBERG, T. & MÜLLER, S., 2011: Multitemporal Crop Type Classification using Conditional Random Fields and RapidEye Data. ISPRS Hannover Workshop 2011: High-Resolution Earth Imaging for Geospatial Information, Hannover, Germany, June 14 to June 17, 2011.
- KEIL, M., BOCK, M., ESCH, T., METZ, A., NIELAND, S. & PFITZNER, A., 2010: CORINE Land Cover Aktualisierung 2006 für Deutschland. Abschlussbericht zu den F+E Vorhaben UBA FKZ 3707 12 200 und FKZ 3708 12 200, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Deutsches Fernerkundungsdatenzentrum Oberpfaffenhofen, Januar 2010.
- REDER, J., ZILLMANN, E., KUNZE, M., LOEWE, P. & WEICHELT, H., 2011: Automatische Erfassung potentieller Veränderungsflächen in thematischen Vektordaten unter Verwendung von

- aktuellen RapidEye Bilddaten. Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation (DGPF) e.V. Band 20: Geodaten – eine Ressource des 21. Jahrhunderts, 31. Jahrestagung in Mainz 2011, S. 261-270.
- SCHLUND, M. & PONCET, F. V., 2011: TerraSAR-X Daten zur Unterstützung der Aktualisierung von Geodatenbanken. Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation (DGPF) e.V. Band 20: Geodaten – eine Ressource des 21. Jahrhunderts, 31. Jahrestagung in Mainz 2011, S. 381-390.
- SMITH, G., BEARE, M., BOYD, M., DOWNS, T., GREGORY, M., MORTON, D., BROWN, N. & THOMSON, A., 2007: UK Land Cover Map Production Through the Generalisation of OS MasterMap©. *Cartographic Journal*, **44** (3), S. 276-283.
- THIEMANN, F., WARNEKE, H., SESTER, M. & LIPECK, U., 2011: A Scalable Approach for Generalization of Land Cover Data, In: *Advancing Geoinformation Science for a Changing World*, Heidelberg, S. 399 – 420.
- TÖRMÄ, M., HAAKANA, M., HATUNEN, S., HÄRMÄ, P., KALLIO, M., KATILA, M., KIISKI, T., MÄKISARA, K., PERÄSAARI, J., PIEPPONEN, H., REPO, R., TEINIRANTA, R. & TOMPPONEN, E., 2008: Finnish CORINE 2006 –project: determining changes in land cover in Finland between 2000 and 2006. *Proc. SPIE 7110*, 71100V (2008), DOI:10.1117/12.800148.
- VÖLKER, A. & MÜTERTHIES, A., 2008: Landschaftsökologische Modellierung und automatisierte Erfassung von Landschaftselementen für das Monitoring und die Bewertung einer nachhaltigen Kulturlandschaft. In: Seyfert, E. (Ed.) 2008: Tagungsband der 28. Wissenschaftlich-Technischen Jahrestagung der DGPF 2008 - Vom Erdapfel zum 3D-Modell. Vol. 17, Oldenburg, S. 161-170.

Semantische und geometrische Aspekte der Interoperabilität

INGRID CHRIST¹ & ROLF LESSING²

Zusammenfassung: Die Aktualisierung bestehender Landbedeckungs- und Landnutzungsdaten basiert im Projekt DeCOVER auf einem eigenen Objektartenkatalog, der den Anforderungen der Fernerkundung entspricht. Die beiden Datenmodelle sowie die darauf basierenden Datensätze müssen interoperabel sein, um eine Datenvergleichbarkeit zu erhalten und eine Datentransformation ausführen zu können. Zur Erreichung dieses Ziels kommen verschiedene Interoperabilitäts-Methoden zum Einsatz, die alle ‚semantisches Wissen‘ nutzen. Landbedeckungsdaten bieten semantisches Wissen über Objektarten-Beschreibungen, geometrische Bedingungen, topologische Beziehungen und zeitliche Veränderungsmöglichkeiten. Mit Hilfe dieser Eigenschaften und der darauf abgebildeten Regeln wird eine (semi-)automatische Überführung von der Ausgangs-Datenbasis in eine Datenbasis eines Zielkatalogs ermöglicht. Neben der Unterstützung der mittels Fernerkundungsmethoden detektierten Aktualisierungen kann dieses Wissen auch zur Qualitätsprüfung oder Qualitätsbewertung eingesetzt werden.

1 Einleitung

Mit dem Verbundvorhaben DeCOVER werden Methoden zur Aktualisierung und Erweiterung bestehender Landbedeckungsinformationen entwickelt. Die Change Detection-Methode zur Aktualisierung der Daten findet auf Satellitensensoren wie RapidEye und TerraSAR-X statt. Als Grundlage dient ein eigens in DeCOVER spezifizierter Objektartenkatalog mit 35 Objektklassen, die ihren Schwerpunkt in der Landbedeckung haben und nachgeordnet auch Landnutzungsinformationen liefern. Somit beziehen sich die gesamten Klassifikationsmethoden und Algorithmen auf ein DeCOVER Datenmodell. Auf der anderen Seite befindet sich der Nutzer, der an den Veränderungen der bestehenden Landbedeckungsdaten interessiert ist. Der Nutzer möchte sich nicht mit weiteren Katalogspezifikationen und spezifischen Klassen beschäftigen, sondern er möchte ganz konkret wissen, welche Objekte seiner Daten sich aktuell geändert haben und welche aktuelle Landbedeckung diese Objekte aufweisen.

Abb. 1 zeigt die Schnittstellen der Interoperabilitäts-Methoden zu dem DeCOVER-Klassifikationsprozess auf. In der Mitte befinden sich die Fernerkundungsmethoden, die eine Ausweisung von Veränderungsobjekten sowie die Neuklassifikation zum Ziel haben. Dieser Klassifikationsprozess findet auf Basis der DeCOVER Nomenklatur statt. Davor und danach erfolgt die Transformation zwischen Nutzerdaten und DeCOVER-Daten auf Basis von Interoperabilitätsmethoden. Im dargestellten Beispiel wurde ATKIS BasisDLM verwendet.

¹ Ingrid Christ, DELPHI IMM GmbH, Friedrich-Ebert-Straße 8, 14467 Potsdam; E-Mail: ingrid.christ@delphi-imm.de

² Rolf Lessing, DELPHI IMM GmbH, Friedrich-Ebert-Straße 8, 14467 Potsdam; E-Mail: rolf.lessing@delphi-imm.de

Die Schaffung der Interoperabilität von Geodaten verschiedener Herkunft ist essentiell, um eine durchgängige DeCOVER Prozesskette zu erlangen und damit den Anforderungen der Aktualisierung von Landbedeckungsinformationen gerecht zu werden. Dies bedeutet, dass die unterschiedlichen Landbedeckungsinformationen interpretierbar und vergleichbar sein müssen. Ontologiebasierte Methoden aus dem Bereich der Wissensrepräsentanz kommen für die Beschreibung der Objektartenkataloge zum Tragen. Daneben spielen aber auch geometrische sowie räumliche Eigenschaften und Beziehungen eine Rolle, da es sich nicht um ‚einfache‘ Daten, sondern um Geodaten handelt. Geometrische Angaben von Katalogspezifikationen, wie z.B. die Angabe der Mindestkartierfläche (MKF), müssen beachtet werden. Gleichzeitig bieten sich auch weitere Möglichkeiten durch die Nutzung dieser geodaten-spezifischen Eigenschaften, um Rückschlüsse auf die semantischen Beziehungen abzuleiten oder logische und topologische Inkonsistenzen aufzuzeigen. Im vorliegenden Beitrag wird erläutert, welche Interoperabilitäts-Methodenkette angewandt wird, um eine Überführung der Geodaten herzustellen und damit eine Aussage zu Veränderungen bestehender Landnutzungsdaten zu ermöglichen.

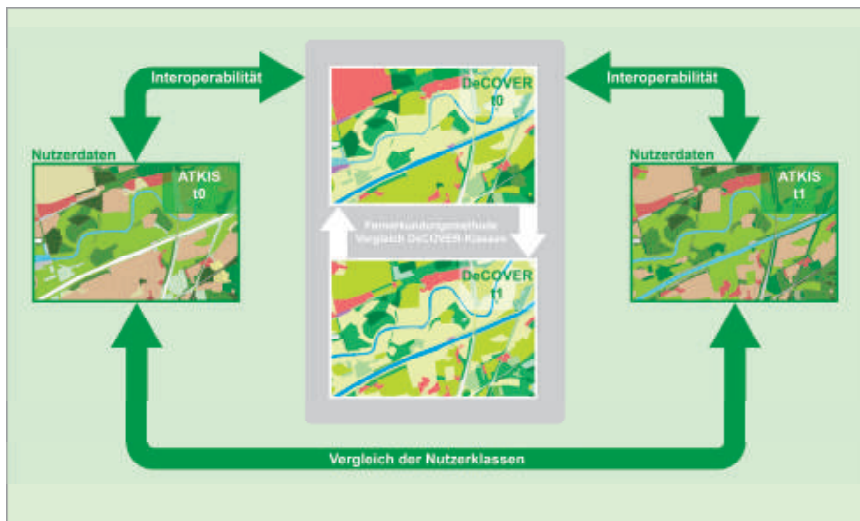


Abb. 1: Interoperabilität im Rahmen des DeCOVER Prozesses

2 Interoperabilitätsmethoden

Der semantische Vergleich von Landbedeckungsdaten unterschiedlicher Datenquellen und Objektartenkatalogen birgt bereits auf der Schemaebene eine Vielzahl an Konfliktmöglichkeiten [FRAUNHOFER ISST]. Die flache Datenstruktur von CORINE LandCover ist beispielsweise anders modelliert als das Datenmodell von DeCOVER, bei der die Angaben zur Landbedeckung und Landnutzung getrennt vorgehalten werden. Die Konfliktmöglichkeiten treten jedoch insbesondere auf der Datenebene auf. Für einfache Modelltransformationen oder Klassen-Mappings gibt es bereits Produkte auf dem Markt. Werkzeuge für semantische Datenharmonisierungen sind jedoch nicht bekannt.

Für die Datentransformation in DeCOVER hat sich herausgestellt, dass zwischen Ansätzen auf der Klassenbasis und Ansätzen auf der Instanzebene unterschieden werden kann. Daraus hat sich eine prozessorientierte Methodik in drei Schritten entwickelt (siehe Abb. 2).

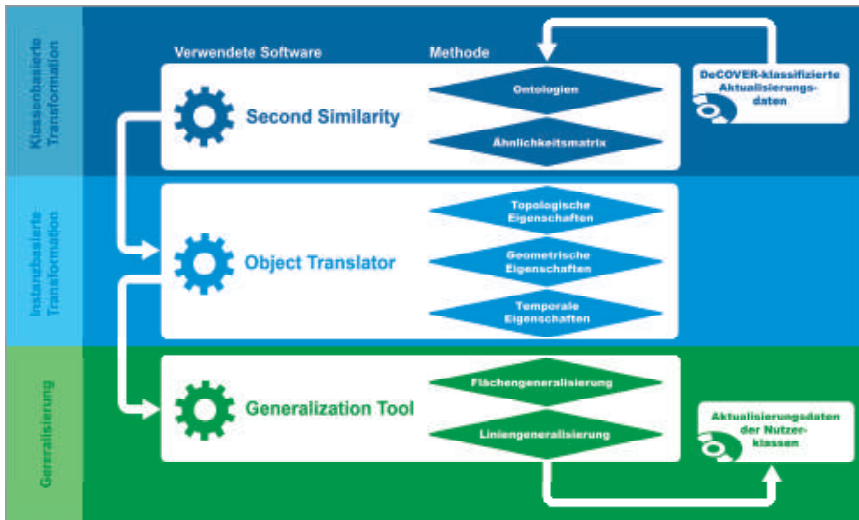


Abb. 2: Methodenkette zur Schaffung einer semantischen und geometrischen Interoperabilität

Klassenbasierte Transformation

Im ersten Schritt findet die semantische Transformation auf Katalogbasis statt. Für den Vergleich von Landbedeckungsklassen werden Eigenschaften extrahiert und in einem Wissensmodell in Beziehung gesetzt. Das semantische Wissen aus der Katalogbeschreibung wird in OWL (WebOntologyLanguage) formalisiert. Dieses abgestimmte Basisvokabular dient zur Beschreibung der Klassen und ermöglicht damit eine einheitliche Dateninterpretation. Mit Hilfe

eines Reasoners findet ein Matching von identischen Klassenpaaren oder Subklassen statt. Bei den vorliegenden Landbedeckungsklassen konnte jedoch festgestellt werden, dass die meisten Klassen keinen eindeutigen Partner besitzen, da es oft nur eine Schnittmenge an übereinstimmenden Eigenschaften gibt. Die gängigen semantischen Klassen-Relationen von ‚1:1‘, ‚n:1‘ und ‚1:n‘ kommen damit nicht zum Tragen. Die Entwicklung eines Algorithmus zur Berechnung von Ähnlichkeiten trug durch den Vergleich der Ähnlichkeitswerte erheblich zum Lösen dieses Problems bei. Der Ähnlichkeitswert von Grünland zu Ackerflächen ist beispielsweise höher als von Grünland zu bebauten Flächen. Baut man auf diese semantischen Werte Mapping-Regeln auf, dann lassen sich die Transformationen definieren.

Die Standard-Mapping-Regel sieht beispielsweise im Klartext so aus:

„Bei der Überführung einer Klasse eines Katalogs in einen anderen Katalog wird die Klasse mit der höchsten Ähnlichkeit zugeordnet, wobei nur Ähnlichkeiten ab einem Wert von 60% Berücksichtigung finden. Gibt es kein Klassen-Paar, das diesen Schwellenwert erreicht, dann kann für diese Klasse keine Transformation hergestellt werden.“

Schwellenwerte, Ausnahmen und auch Prioritäten können bei den Regeln berücksichtigt werden. Prioritäten sind ein wichtiges Kennzeichen für die Charakteristik eines Objektartenkataloges. So ist ATKIS eher im Bereich der Landnutzung einzuordnen, während dessen CORINE LandCover Katalog schon alleine durch die fernerkundliche Datengrundlage ein Landbedeckungskatalog darstellt.

2.1 Instanzbasierte Transformation

Bei der klassenbasierten Transformation in Schritt 1 ist von einem allgemeineren zu einem detaillierteren Katalog, wie dies bei DeCOVER zu ATKIS der Fall ist, die Anzahl der möglichen Zielpartner (1:n-Beziehungen) noch sehr hoch. Diese Relationen sind auf Katalogebene durchaus berechtigt. Die DeCOVER Klasse BVS-Straßen- und Eisenbahnen beinhaltet beispielsweise die ATKIS-Klassen Straßenverkehr, Bahnverkehr und Plätze und damit kann eine BVs-Neufläche auch potentiell alle drei ATKIS-Klassen betreffen. Die Herausforderung, hierfür weitere Spezifizierungen zu erhalten wird in dem zweiten Schritt, der instanzbasierten Transformation, angenommen.

Die Methode der instanzbasierten Transformation nutzt das semantische Wissen jeder individuellen Objektinstanz. Geometrische Eigenschaften der Objekte werden mit den Wertebereichen aller Objekte gleicher Ausgangsklasse verglichen, um zu prüfen, ob potenzielle Zielklassen ausgeschlossen werden können. Der Wertebereich der Flächengröße, Kompaktheit sowie das Längen- und Breitenverhältnis, um nur ein paar geometrische Eigenschaften zu nennen, werden automatisch für alle Klassen aus den Objekten ausgelesen und zur Klassentrennung verwendet. Das gleiche gilt für die topologischen Eigenschaften, die ebenfalls die 1:n-Beziehungen weiter spezifizieren und damit die Überführungsklassen qualitativ verbessern können. So handelt es sich bei einer schmalen Gehölzfläche zwischen Straßenflächen mit hoher Wahrscheinlichkeit um ‚Straßenbegleitgrün‘ und nicht nur um ‚Gehölz‘ im allgemeineren Sinne. Analog dazu sieht es auch bei schmalen Gehölzflächen entlang von Gewässern aus. Hierbei handelt es sich sehr wahrscheinlich um Ufergehölz.



Abb. 3: DeCOVER Strachvegetation



Abb. 4: hellgrün: ATKIS Gehölzflächen; dunkelgrün: ATKIS Verkehrsbegleitgrün

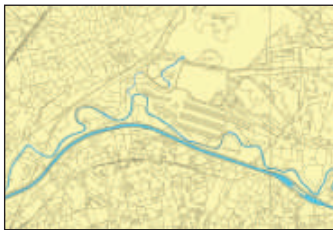


Abb. 5: DeCOVER Gewässerläufe

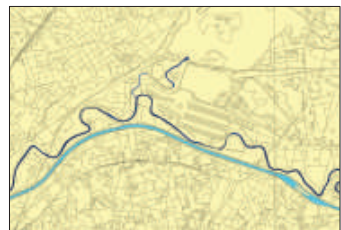


Abb. 6: hellblau: ATKIS Strom, Fluss, Bach; dunkelblau: ATKIS Kanäle

2.2 Geometrische Interoperabilität (Geometrische Anpassung – objektbasierte Manipulation)

Nach der Durchführung der ersten beiden Schritte sind die Daten nun semantisch vergleichbar, d.h. dass die in DeCOVER aktualisierten Daten nun nach der Transformation der semantischen Zielspezifikation entsprechen, wie beispielsweise der Spezifikation von CORINE Land Cover. Die geometrische Spezifikation wurde jedoch noch nicht ausreichend berücksichtigt. Bei der Aktualisierung in DeCOVER werden Objekte ab 0,5 ha berücksichtigt, während der europaweite Datensatz von CORINE Land Cover erst ab 25 ha Objekte ausweist. Beim Betrachten der aktualisierten CORINE Daten im Arbeitsmaßstab von 1:100.000 fällt der ‚Flickenteppich‘ recht deutlich auf, der beim letzten Schritt, der Generalisierung, modifiziert wird.

Generalisierung ist ein weites Feld und betrifft die erwähnten Flächenaggregationen. Weiterhin muss bei der Generalisierung auch eine maßstabsabhängige Linienanpassung berücksichtigt werden, um tatsächlich von geometrisch interoperablen Geoinformationen zu sprechen. Für das Projekt DeCOVER wurde die Flächenaggregation unter Angabe der Pflichtparameter der MKF sowie der Bodenauflösung der verwendeten Fernerkundungsdaten in Form eines Entscheidungsbaumes automatisiert in die Prozesskette eingebunden. Nacheinander werden Objekte anhand der Flächengröße und Nachbarpolygone bestätigt oder auf Basis der Ähnlichkeiten zugunsten der Nachbarobjekte aufgelöst, so dass auch hier wieder das semantische Wissen der Objektarten zum Tragen kommt.

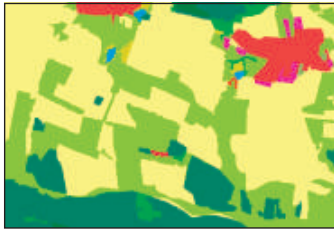


Abb. 7: Aktualisierte CLC-Daten



Abb. 8: Flächenaggregierte CLC-Daten

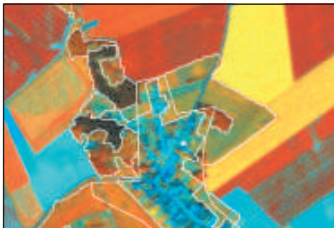


Abb. 9: Aktualisierte CLC-Daten

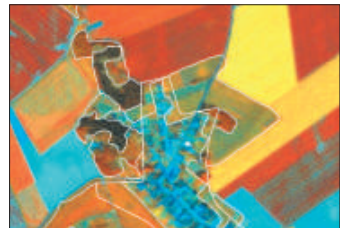


Abb. 10: Liniengeneralisierte, aktualisierte CLC-Daten
Smooth-PEAK Algorithmus mit 50m-Toleranz, Maßstab 1:5.000

Semantik und Geometrie bedingen sich häufig. Besonders gut ist dies bei den Mischklassen zu erkennen. So besteht ein Mischwald in CLC aus Laub- und Nadelgehölzen mit jeweils mindestens 25% Flächenanteil. Wird ein Objekt geometrisch aufgelöst, dann kann es bei der Gesamtbetrachtung zu einer anderen Flächenzusammensetzung kommen, die semantisch nicht mehr dem Mischwald entspricht.

3 Semantik zur Qualitätsverbesserung

In dem vorigen Kapitel wurde aufgezeigt, wie Semantik für die Verwendung der gesamten Überführungskette verwendet werden kann und letztlich zu einem interoperablen Datensatz führen kann. Der Einsatz des semantischen Wissens und den semantischen Regeln kann darüber hinaus noch wesentlich vielseitiger eingesetzt werden. Klassen-Inkonsistenzen auf Basis von logischen, topologischen, temporalen und geometrischen Eigenschaften können aufgezeigt werden und damit zur Qualitätsverbesserung des Datensatzes beitragen.

Dem Faktum ‚Raumbezug‘ ist es zu verdanken, dass diese Informationen konkret eingesetzt werden können, um kombinierte und teilweise auch komplizierte Abfragen zu machen. Es gibt zahlreiche Beispiele, von denen drei vorgestellt werden.

- Ein einfacher Fall stellt die Veränderung einer bebauten Fläche dar. Hierbei kann es möglicherweise zu einer veränderten bebauten Nutzung, wie lockere Wohnbebauung zur

Industriefläche oder ehemalige Industrieflächen zu Sport- und Freizeitflächen kommen. Als sehr unwahrscheinlich ist die Veränderung zu Agrarland einzustufen.

- Bei neu entstandenen Wasserflächen handelt es sich meist um Überflutungsflächen aufgrund von Hochwasser oder Flutungsflächen von ehemaligen Tagebauseen. Somit kann die Aussage getroffen werden, dass „neue Wasserflächen in der Nachbarschaft von Wasser oder Feuchtf Flächen oder auf ehemaligen Abbauf lächen“ vorliegen können. Bei allen anderen zeitlichen und topologischen Kriterien ist eine Entstehung als sehr unwahrscheinlich anzusehen.
- Aus ökologischer Betrachtung ist die Veränderung von langjährig genutztem, artenarmen Dauergrünland hin zu naturnahen, artenreicheren Wiesen innerhalb von wenigen Jahren kaum möglich. Selbst das Einbringen von samenhaltigem Material wird als wenig aussichtsreich eingestuft. Hierbei gilt: Je länger die Zeitreihen vorliegen, desto besser können Rückschlüsse auf die heutige Landbedeckungssituation vorgenommen werden.

Die Nutzung des semantischen Wissens kann zur Qualitätsprüfung oder gezielten Qualitätsverbesserung eingesetzt werden. Es sind jedoch auch Grenzen gesetzt, die berücksichtigt werden sollten. Bei fehlerhaften Ausgangsdaten bleibt die reale, unwahrscheinliche Veränderungsrichtung zwar bestehen; die aktuell klassifizierte Klasse könnte jedoch richtig sein und die Fehlerquelle in diesem Fall in der früheren Landnutzungskartierung liegen.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Semantik ist mehr als die Klassenhierarchie von Geodaten. Mit der der Wissensbeschreibung von Objektarten, der Beachtung der (maßstabsbezogenen) geometrischen Bedingungen und vor allen Dingen der Nutzung der Nachbarschaftsbeziehungen bis hin zum Einsatz der Veränderungsbeziehungen können sehr viele Bewertungen und Überführungsaussagen getroffen werden. In Projekt DeCOVER werden all diese Eigenschaften genutzt, Regeln aufgestellt und damit eine Prozesskette zusammengestellt, die (semi-) automatisch einen Ausgangsdatensatz in einen Zieldatensatz eines anderen Kataloges überführt. Die Schaffung von interoperablen Daten wird damit erreicht. Synergieeffekte können genutzt und Kosten für die mehrfache Datenaufnahme eingespart werden, indem ein aktualisierter Nutzerdatensatz rein technisch in weitere Nutzerkataloge überführt werden kann.

Der Prozess funktioniert, wenn gleich es auch Grenzen der Machbarkeit gibt. Dies betrifft hauptsächlich die Berechnung von ontologiebasierten Ähnlichkeiten, da die Zuordnung von semantisch korrespondierenden Objektbeschreibungen in verschiedenen Datensätzen das Expertenwissen und die Anwendersicht, die je nach Person und Einsatzgebiet anders eingeschätzt wird, bedarf. Somit stellt die automatisiert-erzeugte Mapping-Tabelle die Grundlage für weitere Abstimmungen dar, dessen Erfolg dennoch nicht zu verschmälern ist.

Der Einsatz des semantischen Wissens (als Oberbegriff aller inhaltlichen, geometrischen, topologischen und zeitlichen Eigenschaften und Prozessen) bietet zahlreiche Möglichkeiten, die bisher auch im Projekt DeCOVER nur ‚angeritzt‘ wurden. Ein zukünftiges Ziel sollte die Veränderung des bisher klassenbezogenen Regelwerkes unter Zur Hilfenahme des

wissensbasierten Ansatzes sein. Dann bezögen sich die Veränderungsrichtungen nicht mehr auf Objektarten, sondern auf Eigenschaften, wie z.B. der Versiegelung. Die Veränderung einer Fläche mit einer höheren in eine geringere Versiegelungsdichte wird dann als unwahrscheinlich angesehen, unabhängig, ob es sich dabei um Wohnbebauung oder Freizeitanalgen handelt.

5 Acknowledgements

Die Arbeit ist Teil des Projektes DeCOVER und wird vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) unter der FKZ 50EE0909 gefördert.

6 Literaturverzeichnis

- ADV 2008. ATKIS-Objektartenkatalog. <http://www.atkis.de> (2008/04/30).
- BOBZIEN, M., 2005: Methodische Aspekte der Generalisierung von Geodaten, BONN.
- FRAUNHOFER ISSI, 2009: Semantische Interoperabilität. Band 2: Semantische Konflikte. White Paper. Berlin
- KIELER, B., 2007: A Geometry-Driven Approach for the Semantic Integration of Geodata Sets. IN: PROC. OF 23RD. International Cartographic Conference, 4.-10. August 2007, Moscow, Russia. (http://www.ikg.uni-hannover.de/fileadmin/ikg/staff/publications/Konferenzbeitraege_abstract_review/Kieler_icc2007.pdf)
- LOIDOLD, M., 2005: Entwicklung einer automatisierten Konflikterkennung für partizipative GIS auf Basis dynamischer Ontologien, Salzburg. ([HTTP://WWW.IKG.UNI-HANNOVER.DE/FILEADMIN/IKG/STAFF/PUBLICATIONS/KONFERENZBEITRAEGE_ABSTRACT_REVIEW/KIELER_ICC2007.PDF](http://www.ikg.uni-hannover.de/fileadmin/ikg/staff/publications/Konferenzbeitraege_abstract_review/Kieler_icc2007.pdf))
- LUTZ, M., CHRIST, I., SCHUBERT, C., KLIEN, E. & HÜBNER, S., 2008: Overcoming Semantic Heterogeneity in Spatial Data Infrastructures, *in* Computers and Geoscience. Special Issue on Geoscience Knowledge Representation in Cyberinfrastructure, in press. Available online 25 January 2008, <http://www.elsevier.com/locate/cageo>.
- SCHUBERT, C., WOLPERT, I. & I. CHRIST, 2008: Comparison of Different Land Use Object Classes by Means of Semantic Measurements. Brady. S.R., Sinha, A.K. and Gundersen, L.C., editors, 2008, Geoinformatics 2008 – Data to Knowledge, Proceedings: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2008-5172, p. 66, ISBN 978-1-4-4113-2279-0.
- STAUB, P., 2009: Semantische Interoperabilität – Voraussetzung für Geodaten -Infrastrukturen. Géomatique Suisse, 6 (2009), S. 304-307.

Methoden der Fernerkundung zur Unterstützung des FFH-Monitorings – DeCOVER2 Thematische Dienste

JONAS FRANKE¹, VANESSA KEUCK¹ & FLORIAN SIEGERT^{1,2}

Zusammenfassung: Intensivierung der Landnutzung aufgrund landwirtschaftlicher Anpassung an die steigende Nachfrage nach regenerativen Rohstoffen stellt eine Gefahr für die Artenvielfalt in Europa dar. Insbesondere die Biodiversität von Dauergrünland steht dabei durch landwirtschaftliche Nutzungsintensivierung unter erhöhtem Druck. Umweltschutz-Richtlinien wie "Natura 2000" zielen auf den Schutz der Arten- und Lebensraumvielfalt ab. Die damit verbundenen Fauna-Flora-Habitat (FFH) Berichts- und Monitoringpflichten erfordern regelmäßige, flächenhafte Datenerhebungen zu Habitatverbreitung und Erhaltungszustand. Die in DeCOVER2 entwickelten Thematischen Dienste zum Monitoring der Nutzungsintensität von Grünland sowie zur Identifizierung von Potentialflächen für Lebensraumtypen zielen auf eine Unterstützung der Fachbehörden bei ihren FFH-Berichtspflichten mittels neuer Verfahren der Fernerkundung ab.

1 Einleitung

Landnutzungsveränderungen aufgrund der Anpassung der Landwirtschaft an die steigende Nachfrage nach regenerativen Rohstoffen zur energetischen Nutzung, bedrohen die Biodiversität in Europa (STOATE et al. 2009). Steigender Bedarf an Biokraftstoffen, die EU-Erweiterung und die damit verbundenen Änderungen der Agrarpolitik führen in manchen Teilen der EU zu einer starken Intensivierung der Landnutzung (KOH & GHAZOUL 2008, STOATE et al. 2009, EEA 2006). Die Implementierung internationaler Umweltschutz-Richtlinien wie das "Übereinkommen über die biologische Vielfalt" oder "Natura 2000" zielen darauf ab, weitere Verluste der Arten- und Lebensraumvielfalt zu minimieren. Insbesondere naturnahe und extensiv bewirtschaftetem Dauergrünland kommt dabei eine wichtige Rolle als Habitat mit hohem Erhaltungswert zu (SULLIVAN et al. 2010, CRITCHLEY et al. 2003, ÖSTER et al. 2008). 14 % des EU-27 Territoriums sind Dauergrünland (EUROPEAN UNION 2010), dessen Artenvielfalt durch landwirtschaftliche Nutzungsintensivierung unter besonderem Druck steht (HENLE et al. 2008).

Die in Verbindung mit Natura 2000 bestehenden Fauna-Flora-Habitat (FFH) Berichts- und Monitoringpflichten erfordern regelmäßige, flächenhafte Datenerhebungen zu Habitatverbreitung, Habitatveränderungen sowie Habitatqualität, wobei insbesondere die Fernerkundung zur Unterstützung dieser Datenerhebungen beitragen kann (VANDEN BORRE et al. 2011). Die großräumige Erfassung von Grünlandumbruch und der Nutzungsintensität von Grünland ist für verschiedene Berichtspflichten von großer Relevanz und hat kürzlich durch den Biosprit-Boom noch an Aktualität gewonnen. Der Mangel an aktuellen, flächenhaften Daten über den Zustand von Dauergrünland sowie die Änderungen der Lebensraumqualität innerhalb

1) RSS – Remote Sensing Solutions GmbH, Isarstraße 3, 82065 Baierbrunn, Tel: 089-48954766, email:franke@rssgmbh.de

2) GeoBio-Center, Biologie Department II, Ludwig-Maximilians-Universität München, Großhadernerstraße 2, 82152 Planegg-Martinsried

der Grünlandhabitats (Bsp. Nutzungsintensivierung) kann durch die Entwicklung von fernerkundungsbasierten Verfahren reduziert werden (VANDEN BORRE et al. 2011). Daher wurden in DeCOVER2 Thematische Dienste zum Monitoring der Nutzungsintensität von Dauergrünland sowie zur Identifizierung von Potentialflächen für Lebensraumtypen (LRT) entwickelt, welche auf eine Unterstützung der Fachbehörden bei ihren Natura 2000 Berichts- und Monitoringpflichten abzielen. Neue Informationsprodukte und Monitoringmöglichkeiten ergeben sich aus der erstmalig verfügbaren, hohen zeitlichen und räumlichen Auflösung von Satellitendaten, wobei vor allem die Systeme RapidEye und TerraSAR-X in DeCOVER2 für diese Anwendungen getestet werden. Die hier dargestellten Entwicklungen sollen Fachbehörden eine erhebliche Zeit- und Kostenersparnis beim FFH-Monitoring ermöglichen sowie durch großflächige Kartierungen eine statistisch verbesserte Datenbasis zum Erhaltungszustand von Natura 2000-Gebieten schaffen.

Im Rahmen der hier dargestellten Studie soll (i) das Potential multitemporaler RapidEye-Daten zum Monitoring von Dauergrünland getestet werden, (ii) ein neues Verfahren zur Erfassung der Nutzungsintensität von Grünland entwickelt und demonstriert werden, (iii) ein neues Verfahren zur Identifikation von Potentialflächen für FFH-Lebensraumtypen (außerhalb bereits kartierter Gebiete) entwickelt und getestet werden, sowie (iv) eine Potentialabschätzung solcher Dienste für das FFH-Monitoring durchgeführt werden.

2 Untersuchungsgebiete und Daten

Die hier dargestellten DeCOVER2 Thematischen Dienste wurden in 4 Testgebieten (TG), welche unterschiedliche Naturräume Deutschlands repräsentieren, entwickelt und getestet (Abb. 1). Das Verfahren zur fernerkundungsbasierten Erfassung der Grünlandnutzungsintensität wurde dabei im TG Murnau entwickelt und validiert, und zusätzlich in den TG Herne und Zinna angewendet. Das Verfahren zur Identifikation von Potentialflächen für FFH-Lebensraumtypen hingegen wurde im TG Donau-Ries entwickelt und demonstriert.



Abb. 1: DeCover2-Testgebiete (TG) in denen die Monitoringverfahren entwickelt und getestet wurden. In den rot dargestellten TG Murnau, Herne und Zinna wurde das Verfahren zur Erfassung der Nutzungsintensität von Grünland demonstriert. Im gelb dargestellten TG Donau-Ries wurde das Verfahren zur Identifikation von Potentialflächen für FFH-Lebensraumtyp 6510 entwickelt. Hintergrund: ESRI World Imagery.

Beide Verfahren basieren auf multitemporalen RapidEye Daten aus 2010 sowie 2011. RapidEye ist eine Konstellation aus 5 baugleichen Satellitensensoren, welche Daten mit 5 Spektralkanälen liefern. Zusätzlich zum blauen (440-510nm), grünen (520-590nm), roten (630-685nm) und NIR (760-850nm) Kanal, nimmt RapidEye im red-edge Bereich (690-730nm) Daten auf, die für Vegetationsanalysen geeignet sind. Die Pixelauflösung beträgt 6,5m, welche während der Vorprozessierung durch den Datenanbieter auf 5m resampled wird. Da RapidEye eine Konstellation mehrerer Satelliten mit der Möglichkeit der Schrägaufnahme darstellt, können tägliche Wiederholraten erreicht werden (5,5 Tage im Nadir) (TYC et al. 2005). Diese hohe zeitliche Auflösung der RapidEye Daten ist für ein Monitoring von hoher Relevanz, da sie die Wahrscheinlichkeit der Gebietsabdeckung mit geringer Wolkenbedeckung erhöht. Hierdurch ist die Aufnahme geeigneter Zeitreihen, welche die Vegetationsphänologie optimal wiedergeben, gewährleistet. Es wurden ausschließlich atmosphärenkorrigierte Szenen mit weniger als 5% Wolkenbedeckung in den Testgebieten verwendet (Tabelle 1).

Tab. 1: Übersicht verwendeter RapidEye Daten in den Testgebieten.

<i>Testgebiet</i>	<i>Aufnahmedatum</i>	<i>Bezeichnung</i>
Murnau	29.04.2010	M-t1
	05.05.2010	M-t2
	08.07.2010	M-t3
	21.07.2010	M-t4
	26.08.2010	M-t5
Herne	18.04.2010	H-t1
	03.06.2010	H-t2
	12.08.2010	H-t3
	10.10.2010	H-t4
Zinna	22.03.2010	Z-t1
	03.07.2010	Z-t2
	21.08.2010	Z-t3
Donau-Ries	11.10.2010	D-t1
	15.03.2011	D-t2
	05.05.2011	D-t3
	25.05.2011	D-t4

3 Anwendungsfelder und Methoden

3.1 Erfassung der Nutzungsintensität von Dauergrünland

Zur Erfassung der Grünlandnutzungsintensität mittels RapidEye Daten wurde im TG Murnau ein Verfahren entwickelt, welches die Nutzungsintensitäten in den vier Kategorien "Naturnahes Grünland", "Extensivgrünland", "Intensivgrünland" sowie "Grünlandumbruch" wiedergibt. Grünlandumbruch stellt einen Umbruch von Grünland zum Anbau von hoch produktiven Gräsern oder Ackerfrüchten (hauptsächlich Mais in 2010) dar. Intensiv genutztes Grünland sind relativ artenarme Flächen, die normalerweise zwischen 3 und 6 Mal pro Jahr gemäht werden, wobei die erste Mahd bereits sehr früh in der Vegetationsperiode zwischen Mitte April und Anfang Mai durchgeführt wird. Extensivgrünland hingegen stellt in den meisten Fällen relativ

artenreiches Grünland dar, welches in der Regel nicht vor Ende Mai/Anfang Juni gemäht wird. Um intensiv und extensiv bewirtschaftetes Grünland fernerkundungsbasiert zu unterscheiden, wird daher mindestens eine Satellitenszene aus dem Frühjahr benötigt, da nach der ersten Mahd des Extensivgrünlands beide Bewirtschaftungsarten ähnliche spektrale Charakteristika aufweisen können. Naturnahe Flächen sind durch sehr artenreiches Grünland charakterisiert, welches nur selten zur Futter- oder Streugewinnung verwendet wird. Naturnahes Grünland findet man meist auf sehr nassen oder sehr trockenen und nährstoffarmen Standorten. In 2010 fand eine Referenzkartierung der Grünlandnutzungsintensität im TG Murnau auf einer Gesamtfläche von 950 ha statt. Innerhalb dieser Fläche wurden anschließend 1500 zufällige Punkte (GIS) verteilt, welche zum Klassifikationstraining (400) sowie zur Validierung (1100) herangezogen wurden.

Um die Vegetationsdynamik der unterschiedlichen Grünlandklassen spektral zu analysieren, wurden verschiedene Parameter aus der RapidEye Zeitreihe abgeleitet. Neben dem Vegetationsindex NDVI, wurde für jeden Aufnahmezeitpunkt der hier so genannte Normalized Red-Edge Vegetation Index (NREVI) berechnet. Dieser wird ähnlich dem NDVI berechnet, wobei der NIR-Kanal mit dem Red-Edge-Kanal ersetzt wird. Zusätzlich wurde ein Parameter entwickelt der die gesamte Zeitreihe verwendet, um die spektrale Dynamik der Vegetation wiederzugeben. Der "Mean Absolute Spectral Dynamic (MASD)" Parameter gibt dabei die mittleren Beträge der Reflektanz-Differenzen bestimmter oder aller Aufnahmezeitpunkte der vegetationsrelevanten Kanäle 2 bis 5 wieder. Werden nur 2 Zeitpunkte ausgewählt, gibt der MASD lediglich die spektrale Änderungsintensität wieder. Werden jedoch mehrere Zeitpunkte zur Berechnung des MASD herangezogen, ist dieser ein Indikator für die spektrale Dynamik von Pixelspektren über den gesamten Beobachtungszeitraum hinweg. Verschiedene MASD Intervalle wurden mit Hilfe der RapidEye Daten berechnet, wobei entweder 2, 3, 4 oder alle 5 Zeitpunkte verwendet wurden.

Anhand der 400 Trainingspunkte der Referenzkartierung wurde die NDVI- und NREVI-Zeitreihe, sowie die unterschiedlichen MASD nach ihrer Grünlandnutzung analysiert und Regeln zur Klassifikation abgeleitet. Zum einen wurde dafür ein statistisches Verfahren (Entscheidungsbaum-Software See5 (RuleQuest Research Pty. Ltd., NSW, Australien)) verwendet, zum anderen wurden Kontext-basierte Regeln unter Berücksichtigung saisonaler Aspekte der Grünlandnutzung im TG definiert. Das Regelwerk von See5 als auch das Kontext-basierte Regelwerk wurde in eCognition (Trimble GeoSpatial, München) umgesetzt und die RapidEye Zeitreihe des TG Murnau innerhalb der Grünlandflächen des Amtlichen Topographisch-Kartographischen Informationssystems (ATKIS®) klassifiziert.

Um saisonale Aspekte näher zu beleuchten und um die geeignetste Kombination von Aufnahmezeitpunkten zu ermitteln, wurden insgesamt 8 Kombinationen unterschiedlicher RapidEye-Aufnahmezeitpunkte klassifiziert. Die Ergebnisse wurden anschließend mit den verbleibenden 1100 Referenzpunkten validiert. Unter Verwendung angepasster Klassifikationsregeln wurde das Verfahren ebenfalls in den TG Herne und Zinna übertragen.

3.2 Identifikation von Potentialflächen für FFH-Lebensraumtypen

In Zusammenarbeit mit dem Bayerischen Landesamt für Umwelt (LfU) wurden zusätzlich die Möglichkeiten der Fernerkundung zur Identifikation von Potentialflächen spezieller berichtspflichtiger LRTs im Rahmen von Natura 2000 untersucht. Das europäische Natura 2000-Netzwerk beinhaltet besondere Erhaltungsgebiete (BEG) der FFH-Richtlinie sowie besondere

Schutzgebiete (SPA) der Vogelschutzrichtlinie. Ziel von Natura 2000 ist der Erhalt und die Wiederherstellung der biologischen Vielfalt in der EU. Im Rahmen der FFH-Richtlinie erstellen die Mitgliedstaaten alle sechs Jahre einen nationalen Bericht über die Durchführung aller Erhaltungsmaßnahmen und bewerten deren Auswirkungen auf den Erhaltungszustand der LRTs. Im Rahmen der FFH-Berichtspflichten wäre neben der Erfassung der LRT-Flächen innerhalb der FFH-Gebiete auch die Ausbreitung (Range), bzw. das Verbreitungsbild, der LRTs außerhalb bereits kartierter Gebiete von Interesse. Somit können weitere LRT-Flächen ausgewiesen werden und zukünftig der europäischen Kommission gegebenenfalls als potentielle Gebiete gemeinschaftlicher Bedeutung vorgelegt werden. Das bisherige Verfahren zur Erfassung von LRT-Flächen basiert meist auf einer Vorauswahl von Gebieten im Luftbild und einer flächenhaften Vor-Ort-Kartierung in den ausgewählten Gebieten. Dieses Verfahren ist somit extrem kosten- und zeitintensiv und zudem könnten schwer zugängliche Flächen unberücksichtigt bleiben. Zudem müssen im Rahmen der FFH-Richtlinie dauerhafte Monitoringflächen über Stichprobenverfahren ausgewiesen werden. Um das bisherige Stichprobenverfahren fokussierter zu gestalten, wäre eine großflächige Indikation von Potentialflächen für LRTs sowie ein Monitoring von Veränderungen ebenfalls hilfreich. Mit Hilfe einer solchen Fernerkundungsmethode, könnte die Anzahl der Vor-Ort-Stichproben reduziert und die statistische Basis der Berichte verbessert werden.

Zentrale Fragestellung dieser Untersuchung war, ob mittels multitemporaler RapidEye Daten Flächen mit LRT 6510-typischer Phänologien identifiziert werden können (LRT 6510: Extensive Mähwiesen der planaren bis submontanen Stufe). Der LRT 6510 wird typischerweise extensiv bewirtschaftet, wobei die erste Mahd nicht vor der Hauptblütezeit der Gräser vorgenommen wird. Der anthropogen geprägte LRT beinhaltet sowohl trockene als auch feuchte bis wechselfeuchte Standorte. Die Entwicklung eines Phänologie-basierten Verfahrens basierte neben multitemporalen RapidEye Daten auf Referenzdaten der Biotopkartierung sowie spezieller LRT 6510 Kartierungen des LfU. Anhand einer spektralen Zeitreihenanalyse aktuell kartierter LRT 6510-Flächen wurde die typische Phänologie abgeleitet. Dazu wurden der NDVI, der NREVI sowie der MASD verwendet. Die RapidEye Zeitreihe wurde danach mit eCognition klassifiziert, wobei Bildobjekte die zu jedem Beobachtungszeitpunkt der vorgegebenen Phänologie der LRT Referenzflächen entsprachen, anhand eines fuzzy logic Regelwerks als Potentialfläche für LRT 6510 ausgewiesen wurde. Abschließend wurde eine Genauigkeitsanalyse mittels gesamter LRT-Kulisse der Biotopkartierung durchgeführt.

4 Ergebnisse

4.1 Nutzungsintensität von Dauergrünland

Zur fernerkundlichen Erfassung der Nutzungsintensität von Grünland wurde ein Verfahren entwickelt, welches RapidEye Zeitreihen verwendet, wobei ein spezieller multitemporaler Spektralparameter (MASD) die Erfassung der Vegetationsdynamik und Bewirtschaftungsintensität ermöglicht. Im TG Murnau konnten vier Nutzungsintensitäten „Naturnahes Grünland“, „Extensivgrünland“, „Intensivgrünland“ sowie „Grünlandumbbruch“, worin auch Ackerbau und sonstige Landbedeckungen ehemaliger Grünlandflächen enthalten sind, mit einer Klassifikationsgenauigkeit von 85,7% unter Verwendung von 5 RapidEye-Szenen sowie von 82,2% mit 3 Szenen erzielt werden (Tab. 2). Abb. 2 zeigt beispielhafte Ausschnitte der Klassifikationen aus den TG Murnau (A1, A2), Zinna (B1, B2) und Herne (C1, C2).



Abb. 2: RapidEye-Ausschnitte dreier DeCover2-Testgebiete (A1: Murnau (BY), 05/06/2010; B1: Zinna (ST), 03/07/2010; C1: Herne (NRW), 18/04/2010) mit multitemporal klassifizierter Grünland-Nutzungsintensität des Jahres 2010 innerhalb der ATKIS® Grünlandflächen (A2: Murnau; B2: Zinna; C2: Herne).

Tab. 2: Klassifikationsgenauigkeiten unterschiedlicher Kombinationen von verwendeten Szenen. Die fünf- sowie die beste vier- und drei-Szenen Kombination ist jeweils fett formatiert.

	Verwendete Szenen (M-*)	Genauigkeit anhand Trainingsdaten	Genauigkeit anhand Testdaten	Kappa Koeffizient
5 Szenen	t1,t2,t3,t4,t5	93,5 %	85,7 %	0,59
4 Szenen	t2,t3,t4,t5	85,7 %		
4 Szenen	t1,t2,t4,t5	91,0 %		
4 Szenen	t1,t2,t3,t5	88,5 %		
4 Szenen	t1,t2,t3,t4	91,7 %	74,4 %	0,11
3 Szenen	t1,t2,t4	88,7 %	82,2 %	0,55
3 Szenen	t2,t3,t4	85,5 %		
3 Szenen	t1,t2,t3	88,2 %		

4.2 Identifikation von Potentialflächen für LRT 6510

Mittels einer RapidEye Zeitreihe wurden im TG Donau-Ries Potentialflächen für LRT 6510 (Flächen mit ähnlicher Phänologie wie LRT 6510-Flächen) ausgewiesen (Abb. 3), diese wurden anschließend anhand der gesamten LRT-Kulisse der Biotopkartierung validiert.

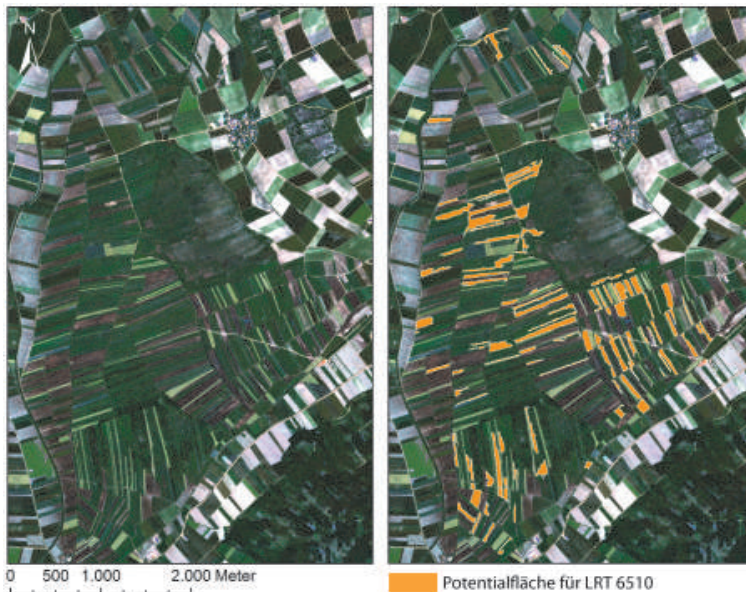


Abb. 3: RapidEye-Ausschnitt des FFH-Gebietes "Mertinger Hölle" vom 25.05.2011 (D-t4) (links), mit multitemporal klassifizierten Potentialflächen für LRT 6510 (rechts).

Von der Gesamtfläche des Untersuchungsgebiets (62.500 ha), welches nach ATKIS 9.575 ha Grünland beherbergt (15%), wurden 444 ha (0,7%) als Potentialfläche für LRT 6510 klassifiziert (4,6% der Grünlandfläche). Im Kontext einer fokussierten Vor-Ort-Kartierung durch eine solche Flächenvorauswahl stellt dies eine erhebliche Flächenreduzierung dar. Jedoch konnten nicht alle Referenzflächen der Biotopkartierung getroffen werden. Von 91 LRT-Referenzflächen wurden 59 Flächen von der Potentialflächenkartierung getroffen (65%). Eine genauere Analyse der nicht getroffenen Flächen ergab, dass ein Großteil dieser Flächen in diesem Jahr sehr früh gemäht wurden oder seit der Biotopkartierung gar eine Veränderung der Flächen stattgefunden hat, was in beiden Fällen zu einer starken Abweichung von der typischen Phänologie führt und solche Flächen somit nicht als Potentialfläche klassifiziert werden. Die Trefferquote der klassifizierten LRT 6510 Potentialflächen ist zudem abhängig von der Größe der LRT-Referenzfläche der Biotopkartierung. Je größer die LRT 6510-Referenzfläche, desto höher ist die Trefferquote der Potentialflächenklassifikation (Abb. 4). Somit stieg die Trefferquote bei Referenzflächen größer 2 ha auf 100%.

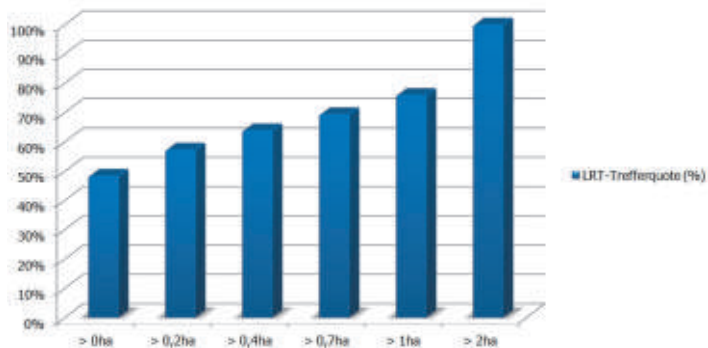


Abb. 4: Trefferquote der klassifizierten LRT 6510 Potentialflächen in Bezug auf LRT-Referenzflächen der Biotopkartierung in Abhängigkeit der Flächengröße (Referenz).

5 Fazit

Die Ergebnisse der hier dargestellten Verfahren zeigen, dass neue fernerkundungsbasierte Methoden unter Verwendung moderner Satellitensensoren Umwelt-Fachbehörden beim Monitoring schützenswerter Flächen unterstützen und Datenerhebungen im Rahmen von FFH-Berichtspflichten effektiver gestalten können. Die hohe räumliche und zeitliche Auflösung moderner Satellitensensoren ermöglichen eine zeitlich angepasste Akquise geeigneter Zeitreihen, welche die dynamischen Vegetationsphänologien abbilden sowie die spektrale Dynamik von Oberflächen wiedergeben. Wie hier demonstriert, ermöglicht die Verwendung solcher Zeitreihen eine zuverlässige Erfassung der Nutzungsintensität von Grünland, die für verschiedene Anwendungen im Bereich Umweltschutz und nachhaltiger Landwirtschaft, wie beispielsweise dem Monitoring von Nutzungsintensivierung, Habitat-Charakterisierung oder

Veränderungsmonitoring, relevante Informationen liefert. Zeitliche Aspekte des Monitorings sind dabei von großer Bedeutung wenn Kosten und Qualitätsstandards des Fernerkundungsverfahrens betrachtet werden, da beide Faktoren direkt von der Anzahl und den Aufnahmezeitpunkten der verwendeten Szenen abhängen. Hohe Klassifikationsgenauigkeiten konnten mit 5 Szenen (85,7%), als auch mit drei Szenen (82,2%) erzielt werden. Somit stellte eine Zeitreihe aus drei Szenen, wobei davon zwei vor Mitte Juni aufgenommen werden sollten, eine ausreichende Basis für die großflächige Erfassung der Grünlandnutzungsintensität dar.

Die hier ebenfalls dargestellte Methode zur Identifikation von Potentialflächen für LRT 6510 verdeutlicht weitere Anwendungsmöglichkeiten hochaufgelöster Satellitenbild-Zeitreihen im Bereich des FFH-Monitorings. Die Ausbreitung (Range) des LRT 6510 außerhalb bereits kartierter Gebiete konnte mit diesem Verfahren abgeschätzt werden, wobei insbesondere große LRT-Flächen, bzw. Potentialflächen für LRT 6510, mit sehr hoher Genauigkeit identifiziert werden konnten. Somit könnte durch eine solche Flächenvorauswahl eine deutliche Reduzierung der zu Vor-Ort-kartierenden Fläche erzielt sowie die statistische Basis von Vor-Ort-Stichproben verbessert werden. Eine Unterstützung der Vor-Ort-Kartierung ist insbesondere gewährleistet wenn die Flächen sehr weit verteilt sind. Diese Fernerkundungsmethode ist in hohem Maße von der Aktualität sowie dem Verfahren der Biotopkartierung (Referenzdaten) abhängig. LRT-Flächen die eine Veränderung seit der Biotopkartierung erfahren haben, als auch nicht teilflächenspezifische LRT-Kartierungen implizieren Fehler beim Training der Klassifikation und somit Ungenauigkeiten der Ergebnisse. Wie schon bei der Erfassung der Grünlandnutzungsintensität, sind zeitliche Aspekte der Fernerkundungsdatenaufnahme bei diesem Verfahren von großer Bedeutung, wobei insbesondere die frühe Wachstumsphase (März bis Mai) ausreichend abgedeckt sein sollte.

Neue Erdbeobachtungssysteme mit verbesserten Leistungsfähigkeiten stellen die Schlüsseltechnologie zur Unterstützung des FFH-Monitorings durch Fernerkundung dar. Die hier dargestellten Fernerkundungsverfahren wurden entwickelt, um den Mangel an flächendeckenden Informationen über Grünland-Habitate zu reduzieren, da sie das großflächige Monitoring von raum-zeitlich hoch dynamischen Ökosystemen ermöglichen. Die daraus gewonnenen Informationen stellen ein großes Potential für Umwelt-Fachbehörden zur genaueren und vereinfachten Berichterstattung innerhalb ihrer FFH-Berichtspflichten dar. Abschließend soll festgehalten werden, dass FFH-Richtlinien relevante Vor-Ort-Kartierungen durch diese Fernerkundungsverfahren nicht ersetzt werden können, diese jedoch erheblich verbessert und effizienter gestaltet werden können, da relevante Informationen flächendeckend erhoben werden.

6 Danksagung

Die hier vorgestellten Studien wurden im Rahmen von DeCOVER2 durchgeführt, ein Projekt gefördert von der Raumfahrt-Agentur des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V. mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages unter dem Förderkennzeichen FKZ 50EE0912. Besonderem Dank gilt dem Bayerischen Landesamt für Umwelt (LfU, Augsburg, Referat 51 Flächenschutz) für die Zusammenarbeit.

7 Literaturverzeichnis

- CRITCHLEY, C.N.R., BURKE, M.J.W. & STEVENS, D.P., 2003: Conservation of lowland semi-natural grasslands in the UK: a review of botanical monitoring results from agri-environment schemes. *Biological Conservation*, **115**, S. 263–278.
- EEA - EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY, 2006: Land accounts for Europe 1990-2000. Towards integrated land and ecosystem accounting. Copenhagen. ISSN 1725-9177. 112 Seiten.
- EUROPEAN UNION, 2010: Agricultural statistics - Main results 2008-09. eurostat European Commission pocketbooks. 2010 edition. Luxembourg. ISSN 1830-463X. 186 Seiten.
- HENLE, K., ALARD, D., CLITHEROW, J., COBB, P., FIRBANK, L., KULL, T., MCCracken, D., MORITZ, R.F.A., NIEMELÄ, J., REBANE, M., WASCHER, D., WATT, A. & YOUNG, J., 2008: Identifying and managing the conflicts between agriculture and biodiversity conservation in Europe - A review. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, **124**, 60-71.
- KOH, L.P. & GHAZOUL, J., 2008: Biofuels, biodiversity, and people: Understanding the conflicts and finding opportunities. *Biological Conservation*, **141**, S. 2450-2460.
- ÖSTER, M., PERSSON, K. & ERIKSSON, O., 2008: Validation of plant diversity indicators in semi-natural grasslands. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, **125**, S. 65–72.
- STOATE, C., BÁLDI, A., BEJA, P., BOATMAN, N.D., HERZON, I., VAN DOORN, A., DE SNOO, G.R., RAKOSY, L. & RAMWELL, C., 2009: Ecological impacts of early 21st century agricultural change in Europe - A review. *Journal of Environmental Management*, **91(1)**, S. 22-46.
- SULLIVAN, C.A., SKEFFINGTON, M.S., GORMALLY, M.J. & FINN, J.A., 2010: The ecological status of grasslands on lowland farmlands in western Ireland and implications for grassland classification and nature value assessment. *Biological Conservation*, **143**, S. 1529-1539.
- TYC, G., TULIP, J., SCHULTEN, D. KRISCHKE, M. & OXFORD, M., 2005: The RapidEye mission design. *Acta Astronautica*, **56(1-2)**, S. 213-219.
- VANDEN BORRE, J., PAELINCKX, D., MÜCHER, C.A., KOOISTRA, L., HAEST, B., DE BLUST, G. & SCHMIDT, A.M., 2011: Integrating remote sensing in Natura2000 habitat monitoring: Prospects on the way forward. *Journal for Nature Conservation*, **19(2)**, S. 116-125.

Modern Methods of Data Collection in Slovak Forest Management

MIROSLAV KARDOŠ¹ & ŠTEFAN ŽIHĽAVNÍK¹

Zusammenfassung: Der Artikel befasst sich mit der Ausnutzung der Digitalphotogrammetrie und der Fernerkundung und ihrer Produkte von der praktischer Anwendung im Slowakischen Forstwesen. Die Waldmappierung hat in der Slowakei einen festen Platz im Rahmen der Forsteinrichtung. Jedes Jahr wird 1/10 der Staatsfläche erneut kartiert für die Aktualisierung der Forstkarten. Die Mehrheit der Arbeiten wird mit der Hilfe der photogrammetrischen Methoden ausgeführt mit der Ausnützung der digitalen Flugaufnahmen mit 20cm DSG. Dieser Beitrag widmet sich auch neuen Möglichkeiten der Ausnutzung anderer modernen Techniken der Datensammlung und Mappierung wie z.B. schräge Flugaufnahmen oder herkömmliche Flugaufnahmen mit Großaufnahmabgrenzung. Diese Produkte können in den Projekten der Landeseinrichtung der Wälder und bei neuer Katastralmappierung nützlich sein. Hier sieht man auch die Möglichkeit des „Weißflächenproblems“ zu lösen (Weißfläche-Fläche, die als Ackerland ewidiert ist, aber zur Zeit ein Charakter des Waldes hat). In verschiedenen Landschaftsarten von der Herkunft gibt es Unterschiede zwischen Kataster und den Wirklichen Zustand im Teren.

1 Introduction

Basic task of forest management is identification of the forest state, production and cutting possibilities and conditions of management in forest spatial distribution units. The aim is to propose such precautions, which can secure production and other functions of the forest. This can be achieved through forest spatial arrangement, forest temporal control and forest cutting control mostly by the forest care programs and forest mapping. Forestry thematic maps and forest management plans are created and valid for 10 years period for whole forest land in the evidence of cadastre. Forest management in Slovak forestry is done in accordance with forest management plans. They serve mainly for sustainable development of forests. Every year they must be renewed at approximately tenth of the state area. Essential data needed for creation of these plans are aerial photos and terrestrial surveying. It means that data collection techniques, their economy and effectiveness are very important tasks in Slovak forestry and research. Forest management plan is created for forest unit, which represents continuous area on the landscape with area more than 1000km². Forest mapping provides information about forest spatial arrangement (forest units, ownership units, compartments). As the forest management plans are created on the forest land, most boundaries are taken from the cadastre. In spite of that there still exist a lot of wrong boundaries, where land type doesn't fit to real state in terrain. In most cases this problem is related to forest borders with agricultural land.

1) Miroslav Kardoš, Štefan Žihlavník, Department of Forest Management and Geodesy, Faculty of Forest sciences, T. G. Masaryka 24, 960 53, Zvolen, Slovakia, E-mails: kardos@vsld.tuzvo.sk, zhilav@vsld.tuzvo.sk

Forestry maps join the elements of topographic and thematic map and they are the result of forest mapping, which is related to the area of 1,998 million hectares, what represents almost 40,6% of

state area. Very important part is photointerpretation of aerial photos and terrain interpretation and measurement of forestry detail not visible in the photo. Correctly interpreted aerial photos serve for stereo photointerpretation using digital photogrammetric techniques.

Besides the geometric accuracy at aerial photos and photogrammetric evaluation process, the ability to precisely identify the measured object is crucial for the final accuracy of mapping. (TOMAŠTÍK, 2009)

Substantial amount of aerial photos utilization (e.g. HALVON, 2008) is within the forest mapping and forest management, where the method of digital photogrammetry dominates in the digital photogrammetric workstations. Aerial photos are taken with sufficient overlap in order to be possible to create photogrammetric stereomodels (at minimum 60% endlap and 30% sidelap). The subject of photogrammetric vectorization is all changes in forestry detail, new forest roads, openings which resulted from biotic or abiotic damage and so on. Also the basic topographic features like ridges, drainages, vertical faults are vectorized from stereomodel to improve the quality of terrain contours. At present aerial laser scanning is used for DTM and contour generation.

2 Description of the problem

Precise forestry is very popular term at present. The most frequently used tools are remote sensing technology, global navigation satellite systems (GNSS), geographic information systems (GIS). WARKOTSCH (2006) explain understanding of the precision forestry as follows: precise forestry uses hi-tech sensing and analytical tools for supporting of the site related economic, environmental, and sustainable decision support for forestry department and support of whole chain from the individual tree to final product.

In forestry there are still more requirements for accurate data, which can be used directly in forestry institutions, or within the other projects realized by environmental or agricultural institutions. In the last years (ŽIHĽAVNÍK, A., 2008) in Slovakia the ownership of original owners of forest land is being restored within the land consolidation projects. Some boundaries of forest have become also proprietary boundaries where must be the accuracy criterions of cadastral mapping fulfilled. Problem of new land mapping is also concerned with utilization of modern data sources, where more precise information can be obtained.

Meeting these higher accuracy standards, digital photogrammetry supported by high resolution aerial photos can solve problem of “white” areas in forestry and state cadaster evidence. White areas are forested areas, but in the cadaster evidence they have different attribute. These areas make a problem within the forest planning, and it could be solved by new mapping of such areas using high resolution aerial photos. At this time during the process of forest management plan renewal, the course of the forest boundary at the border is not solved. There is a need for identification such areas, their mapping according to the existing accuracy standards of cadastral mapping and then identify basic forest stand characteristics, like canopy, average height, wood species, age. In this article we deal with possibilities of utilization of aerial photos within forest boundary points interpretation and their accuracy.

3 Material

All experimental material was taken at the University Forest Enterprise in Kremnica Mountains, near Zvolen, in Central Slovakia. Elevation of area ranges from 280m to 980m a.m.s.l. Aerial photos and laser scanning were taken at the beginning of September 2011.

Digital high resolution aerial photos taken by the UltraCam X digital aerial camera were used as experimental data. Total area covered by the photos is 80km². Photos were obtained in Level 2 format what means individual high resolution panchromatic and lower resolution multispectral photo. Vexcel UltraCam digital camera (LILLESAND et al. 2008) has eight lenses. Four lenses are used for panchromatic photography with higher resolution and four are used to produce normal color and near IR composites by photographing through filters resulting in images with lower geometric resolution. Then we prepared RGB and CIR syntheses using pansharpening technique in the UltraMap software. Such prepared data are called Level 3. Parameters of photos are presented in the tab. 1. Exterior orientation parameters were acquired during the photo flight using GNSS/IMU in national coordinate system SJTSK03.

Tab. 1 Parameters of aerial photos

Number of photos	3052	Focal length	100,5 mm
Ground sample distance	10 cm	Photo dimensions	14430 x 9420 pixels
Average flying height	1800 m	Endlap/sidelap	80%/60%
Pixel size	7,2 μ m		

Low oblique and nadir aerial photos were acquired by the system Gbcam developed by the Geodis company. It consists from 4 cameras providing photos from sideways perspective. Their inclination is 36°. Moreover it provides classical vertical photos. Geometric resolution represented by the GSD was 20 cm. Aerial photos have traditional overlap 60/30%. Vertical photos can be used independently. Oblique photos of object, which can be seen from all sides can be viewed in the software Pixoview. As the inputs also digital terrain model and orthophotos have to be used. Exterior orientation parameters were acquired during the photo flight using GNSS/IMU in national coordinate system SJTSK03.

Ground control points (GCP's) were used for transformation of the block of photos or point clouds to the ground coordinate system. For aerial photos they were signalized and measured before the photo flight the same like check points. GCP's were signalized as white circles with 20cm diameter. There were totally measured 67 points for 1216 photos. Coordinates of points were determined in the national coordinate system SJTSK03. For purpose of this experiment we used point filed in selected forest stands. Experimental point field consists of 60 points. Points are following the boundary of four forest stands. Boundaries of the forest for experiment were measured by the combination of GNSS and electronic total station (polar method).

4 Methods

Processing of the aerial photos in photogrammetric projects was done in the Inpho's photogrammetric system Match-AT. The first step was to set up project parameters in the Application master (coordinate system, photo strips, control and check points, parameters of exterior orientation from GNSS/IMU, focal length, average terrain elevation, definition of strips, blocks of photos) and edit camera parameters (lens distortion, photo and camera orientation, coordinates of principal point). For purpose of faster image processing and utilization of image matching techniques were image overviews and tiles generated in each photo. Because of higher elevation range in the project (700 m between the lowest and highest point) also DTM had to be imported to fix tie point centres during the tie point extraction and bundle block adjustment and average terrain elevation was separately edited for smaller blocks of photos. Next step in digital aerial triangulation is control and check point measurement. Totally there were used 67 points, suitable distributed over the block (full X, Y, Z) at the edges and full and vertical inside the block. Next step is automatic tie point extraction with adjustment of block using standard matching techniques. Moreover software tries to find corresponding pixels in v. Gruber positions and uses mainly points in multiple folds. Also the shifts and drifts were computed to correct GNSS/IMU in the strips. The use of GNSS/IMU for direct geo-referencing of airborne scanning devices is nowadays standard. Such a system (e.g. SCHROTH, 2004) exists of receivers of the global positioning system (GPS) on board and on the ground (reference stations) and an inertial system combined with a sensor, which determines angles and accelerations of the sensor with high precision. Several tests have shown (e.g. JACOBSEN, K., 2007), that for many digital cameras, there are still systematic distortions effects in the images, which are not completely compensated for in the distortion information that is given in the calibration reports. These distortions can be minimized after applying camera self-calibration during the adjustment (12 or 44 parameters). After successful triangulation new camera was created with distortion grid and applied to all photos to compensate existing distortions and last bundle block adjustment was performed. Because interpretation of forest boundary points was performed in external software (Summit Evolution), absolute orientation had to be applied. Final accuracy of the aerotriangulation was evaluated based on the mean coordinate errors computed from the check points.

In the next step we acquired coordinates of forest stand boundaries in the area of interest by their interpretation from stereomodels using 3D pointing device and system Planar SD for viewing 3D models. These coordinates were in next steps compared to terrestrially measured boundary points and then accuracy assessment using statistical methods was performed. Possibilities of oblique photos utilization within the interpretation of forest boundary points were analysed by the same method which is described in the previous step. Then aerial photos with adjusted exterior orientation parameters were used for stereo-interpretation of forest boundary points. As the basis for correct identification of boundary points served aerial large scale printed photos with marked boundary points from field interpretation. The same principle was applied with oblique photos, where boundary points were measured by operator in software Pixoview in sideway views around the boundary point. Achieved coordinates were compared together using statistical methods, while as the comparing data set were selected coordinates of boundary points measured terrestrially by the combination of GNSS and electronic total station.

4.1 Statistical methods used for data evaluation

To compute the RMSE, residuals (ΔX , ΔY) i.e. differences in position between the source dataset (X^* , Y^*) and co-located values from independent source of higher accuracy i.e. check points (X , Y) were calculated. For the accuracy assessment we used standard statistical characteristics (reliability, precision, accuracy).

$$Eq. 1 \quad \Delta X = X^* - X, \quad \Delta Y = Y^* - Y,$$

In addition the mean error (ME) was used as a robust indicator for systematic error:

$$Eq. 2 \quad ME_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\Delta X) \quad ME_y = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\Delta Y)$$

The final accuracy represented by the RMSE was than computed as the square root of the average of these squared differences:

$$Eq. 3 \quad RMSE_x = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\Delta X)^2} \quad RMSE_y = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\Delta Y)^2}$$

$$Eq. 4 \quad RMSE_{xy} = \sqrt{\frac{1}{2} (RMSE_x^2 + RMSE_y^2)}$$

Since the application of these statistics assumes the data follow the Gaussian distribution, residuals (ΔX , ΔY) were tested for normality. The normality assumption was not rejected, so the statistical characteristics were computed.

5 Results and discussion

Within the experiment we processed aerial photos using digital automatic aerotriangulation in the Match-AT software. In the project we used 45 GCP's and 22 check points. There were also GNSS/IMU data used. The accuracy of each project after successful aerotriangulation is characterized by the root mean square error - mean coordinate error (RMSE_{xy}). In the project there were totally 1216 aerial photos processed and software automatically measured 18635 tie points in v. Gruber areas. Then they were adjusted by the least squares algorithm. Final accuracy after several post-processing steps (block adjustment), where various control points and their types (vertical, horizontal, both) were used is presented in the tab. 2. Also some of the GCP's had to be removed because of large errors e.g. in forest roads shadowed by the forest stand.

Tab. 2 Values of the RMS computed at check points after aerotriangulation

RMS [m]	x	y	z	xy
Without camera calibration	0,097	0,125	0,130	0,112
After applying camera self-calibration	0,095	0,118	0,110	0,107

Achieved results of RMS_{xy} are influenced by the number and distribution of the control and check points over the blocks. Next factor which influenced the results was in some cases difficult pointing on the GCP's in the images mainly in forested areas. In some cases these GCP's or some measurements in photos had to be removed what in the next step resulted in the insufficient number of GCP's in the part of block. Approximately 70% of area was covered by forests what

negatively affected the quality of point matching and bundle block adjustment. We got better results using camera self-calibration, what corrects image distortions of digital camera. After applying calibrated camera to all photos and running final adjustment without camera self-calibration results improved of about 4,5%.

Next experiment dealt with accuracy of forest boundary points interpretation. Boundaries of four forest stands were measured by the combination of GNSS and total station and computed coordinates served as a precise data set. Then using field interpretation boundary points were also measured at stereomodels (project results presented above), and at oblique photos by the skilled operator. Obtained coordinates were compared to precise data set and statistical characteristics were computed (tab. 3 and 4). Measurements at stereomodels contained systematic error, which had to be removed (tab. 3). It was probably resulting from interpretation in stereomodel where the boundaries were not clearly visible. Mean coordinate error 0,988m represents accuracy of forest boundary points interpretation at area of interest using high resolution aerial photos.

Tab. 3 Mean coordinate errors – accuracy of forest boundary points determination from stereomodels

Sum	5,180	31,050	5,180	-0,030
Mean	0,086	0,518	0,086	0,000
St. dev.	0,768	1,163	0,768	1,163
test criterion	0,863	3,416	0,863	-0,003
critical value	2,000		2,000	
frequency	60	60	60	60
RMSy RMSx	0,773	1,273	0,773	1,163
RMSyx	1,053		0,988	

Tab. 4 Mean coordinate error – accuracy of forest boundary points determination from oblique photos

Sum	-6,600	6,970	critical value	2,000	
Mean	-0,110	0,116	frequency	60,000	60,000
St. dev.	0,841	1,316	RMSy RMSx	0,848	1,321
test criterion	-1,004	0,678	RMSyx	1,110	

Accuracy of point interpretation in oblique photos achieved value 1,11m (tab. 4). Although we expected better results, still we think that oblique photos are great tool during the interpretation, which has large application if forestry. This value resulted from coordinates that were influenced by the data. At first GSD of oblique photos was 20cm and photos were directly georeferenced to national coordinate system SJTSK03 using GNSS/IMU data, which could contain systematic shifts. Next oblique and nadir photos were connected to project in software pixoview, where only rough DTM (10m grid size) was used. Presented results cannot be generalized and compared together because for example difference in GSD, smaller data set

(four boundaries of forest stands), operators own errors during point interpretation, but they show possibilities of such kind of data utilization in forest management practice.

Oblique photos can be used as a support for photointerpretation of forest boundary but only when working in not fully forested area, where it can't bring any advantage. In scattered forest, or forest stands divided by planned cutting it can be used for example for measurement of area of accidental cutting or planned cutting, where the whole area is visible.

When we compare achieved results with other experiments (e.g. TOMAŠTÍK, 2009) we can see that better results of point interpretation were achieved in the open area (tab. 5). In the projects there were also used similar data (digital camera UltraCam D, GSD 10cm, 80/30% overlap). In forested area achieved values are worse in comparison to our results. Probably main reason of such results is that during photointerpretation in stereomodels there were used 4 years old aerial photos.

Tab. 5 Mean coordinate errors (RMSyx) of point interpretation in the open and forested area

		Meas. Nr. 1	Meas. Nr. 2	Meas. Nr. 3	Meas. Nr. 4	Total
RGB aerial photos (GSD 10)	Forest	1,982	1,822	1,768	1,725	1,827 m
	Open area	0,222	0,269	0,288	0,254	0,259 m

6 Conclusion

Digital photogrammetry allows rising of the effectiveness and economy of work, what later on decrease the price of final products. At present almost 100% of forest mapping is done by the methods of digital photogrammetry and photointerpretation. The main task of the forest mapping is to create, update and publish thematic state map work with the content of forestry. Thematic maps create a basis for many forestry disciplines mostly for forest management, forest state determination and are used in forest research and education. At present mostly digital aerial photos with GSD 20 or 30cm and 60/30% overlap are used in forest mapping. They offer good base to height ratio, geometry and radiometry better than color analogue photos at the scale 1:15000 scanned at 15 μ m. (e.g. HALVON, 2011). In this article we examined such data like high resolution aerial photos (GSD 9cm) with non-traditional overlap 80/60%, which were used for generation of stereomodels used in next step for interpretation of forest boundary points. Higher overlap allowed software to generate tie points in more folds, what improved their quality in least square adjustment. Using DTM in the photogrammetric projects improved quality of tie point centers determination. Without the DTM, using only average terrain height in area with higher elevation range, photos were shifted from their proper position (in some case tens of meters). The results confirmed that we don't need so many GCP's when we use GNSS/IMU data, but they have to be suitable distributed over the block. (e.g. INPHO, 2009). We have also confirmed the assumption that for many digital cameras, there are still systematic distortions effects in the image. Interpretation in forestry is not important only for determination of forest spatial distribution units within the preparation of forest management plan, but also for solving of a problem of "white areas" on the boundaries of forest stands. Photointerpretation has its steady place within the forest mapping, determination of forest stands health status, wood species determination. Present digital cameras offer data in various spectral channels, what is a great

advantage opposite to analogue cameras. Main problem during photointerpretation is correct identification of boundary point especially in forested areas, where tree crowns extend over the real boundary. In this case skilled operators draw boundary line at the tops of the boundary trees. In forest stands composed from deciduous trees it's a problem to find correct position because top of the tree crown can be shifted from the stem several meters. Then whole responsibility stays at the decision of the interpreter. Very important during the photointerpretation on PC is the existence of quality field interpretation. Achieved results allow mapping of forested areas at the borderline between agricultural land. Mapping such areas for cadaster will need combination of several methods (remote sensing and terrestrial) for meeting higher accuracy standards (4th mapping accuracy class = 0,26m). Oblique photos can be used as a support for photointerpretation in not fully forested areas. In scattered forest, or forest stands divided by planned cutting it can be used for area measurement, determination of forest stand height. Moreover vertical photos can be used for interpretation of forest spatial distribution units from stereomodels.

Acknowledgements

This paper was created within the solving of the research project "Centre of excellence for decision support in forest and landscape" ITMS 26220120069

7 References

- HALVOŇ, L., 2008: Forestry map work. In *Forestry geodesy and photogrammetry –trends*, Zvolen: Technical university Zvolen, p. 112 – 132.
- HALVOŇ, L., 2011: Accuracy of aerial photos evaluation by methods of digital photogrammetry at forest mapping. *Dissertation*. Technical University Zvolen, 2011, 118 p.
- INPHO, 2009: Match-AT Reference manual, Stuttgart
- JACOBSEN, K., 2007: ASPRS 2007 Annual Conference Tampa. *Geometry of digital frame cameras*. Florida, 7-11. May 2007.
- LILLESAND, T. M, KIEFER, R. W. & CHIPMAN, J. W., 2008: Remote sensing and image interpretation. John Wiley & Sons, New York, USA, 756 s.
- LOHR, U., 2003: Precise LIDAR DEM and True Ortho Photos. In. Photogrammetric week 2003. Universität Stuttgart, s. 111 – 115, [cited 2011-09-10]. Available on the internet: <<http://www.ifp.uni-stuttgart.de/publications/phowo03/lohr.pdf>>
- SCHROTH, R., 2004: Direct Geo-Referencing in Practical Applications. International Federation of Surveyors. [cited 2011-09-10]. Available on the Internet <http://www.fig.net/pub/monthly_articles/may_2004/schroth.pdf>
- TOMAŠTIK, J., 2009: Problem of forest spatial distribution units determination at forest mapping. *Dissertation*. Technical University Zvolen, 2009, .
- WARKOTSCH, W., 2006: Precision forestry today and tomorrow. In *Precision Forestry in Plantation, Semi-natural and Natural Forests*. Power point presentation in the International Precision Forestry Symposium, South Africa: Stellenbosch University, 2006.
- ŽIHĽAVNÍK, A., 2008: *Forest management*. Technical University Zvolen, ISBN 80-228-1542-X

Vergleich der radiometrischen und geometrischen Auflösung von RapidEye und SPOT 5

SASCHA KLONUS¹, MANFRED EHLERS¹, MAREIKE SCHOOF¹,
RALF WOHLFAHRT¹ & THOMAS JARMER¹

Zusammenfassung: In dieser Studie werden die multispektralen Daten von RapidEye mit pan-geschärften 5 m SPOT Daten verglichen. Unter Nutzung der National Imagery Interpretability Rating Scala (NIIRS) wird die räumliche Auflösung und radiometrische Qualität der Daten von SPOT und RapidEye miteinander verglichen. Ergänzend wird die radiometrische Auflösung der beiden Datensätze durch Histogrammanalyse, Trennbarkeit und Analyse der Spektralkurven für bestimmte Objekte, wie Wasserflächen, Ackerflächen, Waldflächen und Feuchtgebiete untersucht. Die Untersuchung zeigt, dass die analysierten Systeme hinsichtlich der Geometrie und der Radiometrie ähnliche Ergebnisse erzielen. Objekte sind nicht schlechter in den RapidEye Daten zu erkennen, obwohl die tatsächliche Bodenpixelauflösung 6,5 m beträgt. Bei der radiometrischen Auswertung zeigt sich, dass bei den RapidEye-Daten aufgrund der höheren Auflösung von 12 bit mehr Informationen aus den untersuchten Objekten abzuleiten sind, während die SPOT Daten eine bessere Trennbarkeit einzelner Objekte aufweisen.

1 Einleitung

Seit dem Start von RapidEye gab es zahlreiche Untersuchungen zur Qualität und Anwendungsmöglichkeiten der RapidEye Daten (FÖRSTER et al. 2011, STOFFELS et al. 2011). Ein direkter Vergleich mit Daten eines anderen Sensors wurde bisher, unseres Wissens nach, nicht durchgeführt. RapidEye besitzt eine Bodenpixelauflösung von 6,5 m, die für die Bilddaten des Endkunden auf 5 m formatiert wird. SPOT 5 besitzt eine Auflösung von 10 bzw. 20 m im multispektralen Modus und eine Bodenauflösung von bis zu 2,5 m im panchromatischen Modus. Für den Endkunden bietet Spot pan-geschärfte multispektrale Daten in einer Auflösung von 2,5 und 5 m an. In dieser wurden die 5 m Daten beider Satelliten miteinander verglichen. Die wichtigsten Eigenschaften der Satelliten sind in Tab. 1 dargestellt.

2 Untersuchungsgebiet

Als Untersuchungsgebiet wurde eine Region zwischen Oldenburg und dem Landkreis Emsland ausgewählt (Abb. 1). Je Sensor wurde dazu eine Szene ausgewählt, bei der das gleiche Gebiet zum ungefähr gleichen Zeitpunkt aufgenommen wurde. Die SPOT 5 Szene wurde am 10. Juli 2010 aufgenommen und die RapidEye Szene am 07. Juli 2010. Die SPOT 5 Szene war nur für die Kanäle grün, rot und nahes infrarot in 5 m Bodenpixelauflösung verfügbar. Die RapidEye Szene enthielt einige Wolken, daher wurden nur solche Gebiete ausgewählt, die komplett wolkenfrei waren.

1) Sascha Klonus, Manfred Ehlers, Mareike Schoof, Ralf Wohlfahrt, Thomas Jarmer, Institut für Geoinformatik und Fernerkundung, Universität Osnabrück, Barbarastraße 22b, 49076 Osnabrück, E-Mail: sklonus@igf.uni-osnabrueck.de

Tab. 1: Parameter der Satelliten RapidEye und SPOT 5

Unternehmen	RapidEye AG	Spotimage, France	
System	RapidEye (Konstellation aus 5 Satelliten)	Spot 5 HRG	
	Start 08/2008	Start 05/2002	
Aufnahmemodus	multispektral	panchromatisch	multispektral
Radiometrische Auflösung	12 bit	8 bit	8 bit
Geometrische Auflösung	6,5 m (5 m resampled)	5 m	10 m / 20 m (SWIR)
Spektrale Auflösung in nm	440-510 (b) 520-590 (g) 630-685 (r) 690-730 (Red Edge) 760-850 (nir)	480-710	500-590 (g) 610-680 (r) 780-890 (nir) 1580-1750 (swir)
Schwadbreite	77 km	60 km	
Temporale Auflösung	Täglich (potenziell)	2-3 Tage (potenziell mit +/- 27° Viewing Angle)	
Orbit und Höhe	Sonnensynchron	Sonnensynchron	
	630 km	705 km	
Inklination	97,8°	98,2°	

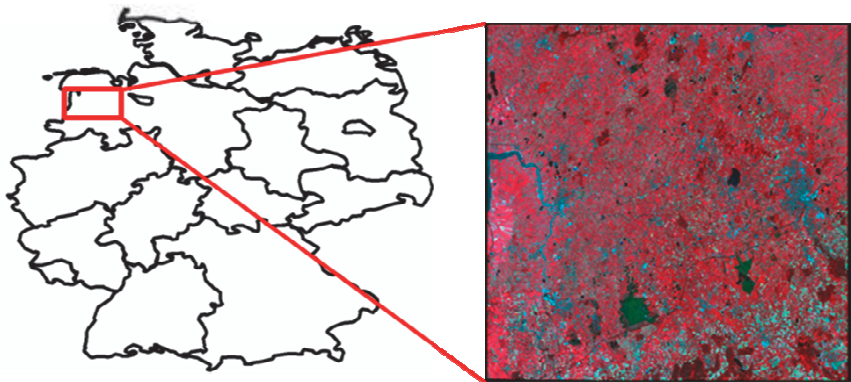


Abb. 1: Untersuchungsgebiet zwischen Oldenburg und dem Landkreis Emsland

3 Vergleich der Interpretierbarkeit

Die Grundlage dieser Analyse bildet der Civil National Imagery Interpretability Rating Scale (NIIRS) (LEACHTENAUER 1996). Dabei handelt es sich um einen Rahmen zur Beurteilung von Bilddaten verschiedener Bildsysteme, der sich mittlerweile zu einem Standard entwickelt hat (STEFANOU & KERESKES 2009). Der NIIRS wurde erstmals in den frühen 1970er Jahren für militärische Zwecke veröffentlicht und war ursprünglich auf die Erkennung militärischer Objekte ausgerichtet (Visible NIIRS). Da die Bedeutung der zivilen Verwendung von Bilddaten immer mehr zugenommen hat, ist mit dem Civil NIIRS ein eigenständiger Rahmen für zivile Nutzer entwickelt worden (HOTHEM et al. 1996).

Der NIIRS besteht aus 10 Ebenen (0 bis 9), die jeweils verschiedene Kriterien umfassen. Diese Kriterien sind ein Maß für die Informationen, die in einem Bild einer bestimmten Ebene enthalten sein sollen. Der NIIRS soll u. a. dazu beitragen, den Verwendungszweck eines Bildes und dessen Einsatzgebiete zu bestimmen, sowie die Performanz von Sensorsystemen zu messen. Die Kriterien werden in die drei Kategorien „Natural“, „Agricultural“ und „Urban/Industrial“ eingeteilt.

Die Kriterien der 10 Beurteilungsebenen dienen dazu Bilder vergleichbar zu machen. Erfüllen zwei Bilder dieselben Kriterien derselben Ebene, so werden sie für die Kriterien gleich bewertet. Dabei ist die Beurteilung, ob ein bestimmtes Objekt im Bild erkennbar ist, abhängig vom Bildanalysten. Zu beachten ist auch, dass nicht immer alle in den Kriterien erwähnten Objekte in einem Bild vorhanden sind. In einem solchen Falle muss der Bildanalyst abschätzen, ob ein Objekt zu erkennen wäre und das Bild die Kriterien demnach erfüllen würde oder nicht. Es wird also auch die potenzielle Information eines Bildes bewertet.

Der NIIRS versucht dem Bildanalysten ein Leitfadensystem zu sein, nach dem dieser das Bild interpretieren und anschließend einstufen kann. Dabei sollte die bestmögliche Einstufung erteilt werden, wenn gilt, dass die Kriterien der niedrigeren Ebene ebenfalls erfüllt sind. Dies ist auch der Fall, wenn Teile des Bildes z. B. durch Wolken verdeckt oder schlechter als der Rest des Bildes sind. Die Beurteilungsebene 0 wird nur für Bilddaten vergeben, deren Interpretation durch Verdunkelung, Rauschen oder sehr geringe Auflösung verhindert wird. Insgesamt ist die Zuweisung eines NIIRS Rating Levels ein subjektiver Prozess.

Die zu erfüllenden Kriterien sind aufgeteilt in die Begriffe „Erkennen“, „Unterscheiden zwischen“ und „Identifizieren“. „Erkennen“ ist die Fähigkeit, die Existenz eines Objektes anhand seiner Form oder im Kontext anderer Bildinformationen zu erkennen. Dazu gehört ein gewisser Grad an Identifikation, so dass ein Objekt korrekt benannt werden kann. „Unterscheiden zwischen“ beschreibt die Fähigkeit festzustellen, dass zwei Objekte von unterschiedlicher Art sind und nicht derselben Klasse angehören. „Identifizieren“ bedeutet, dass ein Objekt gemäß seinem Typ oder seiner Klasse benannt werden kann, und zwar aufgrund der Bildinformationen und nicht aufgrund von vorhandenem oder aus anderen Quellen bezogenem Wissen. Die Bilddaten von RapidEye und SPOT wurde anhand der Kriterien des Civil NIIRS (Beispiel für Level 3 in Tab. 2) analysiert.

Objekte der Beurteilungsebene 1 sind in beiden Aufnahmesystemen gut zu erkennen. Die einzelnen Nutzungsarten lassen sich in beiden Satellitenszenen gut unterscheiden. Ein Beispiel für die Beurteilungsebene 1 ist in der Abb. 2, einer Hafenanlage, dargestellt. Diese konnte eindeutig identifiziert werden. Außerdem konnte zwischen Landebahnen und Rollfeldern auf

einem Flugplatz unterschieden werden. Ebenso wurden abgetrennte Mäander identifiziert. Auch Transportwege wie Straßen bzw. Bahnschienen und Brücken sowie ein Golfplatz konnten detektiert werden.

Tab. 2: NIIRS Kriterien der Ebene 3

<p>Detect large area (i.e., larger than 160 acres) contour plowing. Detect individual houses in residential neighborhoods. Detect trains or strings of standard rolling stock on railroad tracks (not individual cars). Identify inland waterways navigable by barges. Distinguish between natural forest stands and orchards. Identify the path of a tornado through crop fields. Detect small (e.g., less than one acre) forest clearings in suspected opium growing areas. Detect individual large buildings (e.g., house, barn) in a farmstead. Detect slash and burn field abandonment in a jungle through observation of regrowth. Distinguish between crop land and pasture land. Detect hay mowing. Detect mechanized grain harvesting operations. Detect two-lane unimproved roads. Detect cleared security strip around a sensitive facility. Detect trail clearing/cutting in forested areas. Detect land-based oil exploration activity (e.g., bore-holes/spoils, seismic survey traces) in an arid environment. Identify an off-shore oil exploration drilling vessel. Detect indications of underground mining activity (e.g., headworks, tailings, rail spurs). Detect new oil drilling sites in or near a known oil field. Distinguish between roads with single and multiple lanes. Identify a road as divided or undivided. Detect very large vehicles (e.g., tractor-trailers). Detect major breaks in lines of communications (e.g., collapsed bridges, washed out roads, inundation) due to natural disasters. Detect a nuclear reactor containment structure. Count all large free-standing smokestacks and/or cooling towers at major power plants. Detect rows of automobiles in a parking lot. Detect single railcars on rail sidings. Detect fixed-wing aircraft at a dirt or grass airstrip. Detect control tower at airfield. Detect slag heaps at a mineral processing plant. Identify individual greens on a golf course. Distinguish between individual railcars in a train. Detect an automobile. Identify a small (e.g., less than 1/4 acre) electrical transformer yard in a residential neighborhood. Detect towers associated with power lines. Detect guard towers along perimeter fences. Identify general vegetation cover type (e.g., grass, brush, wetland, agricultural crop) in non-forested areas. Detect jeep trails. Identify small slash and burn agriculture plots (e.g., <1 acre). Identify inland waterways navigable by medium boats (e.g., 30' cabin cruiser). Detect small (e.g., less than 1 acre) man-made clearings in a forested area. Distinguish between open and closed forest canopies. Detect landslide or rockslide large enough to obstruct a single lane road. Distinguish between operational and abandoned quarries.</p>

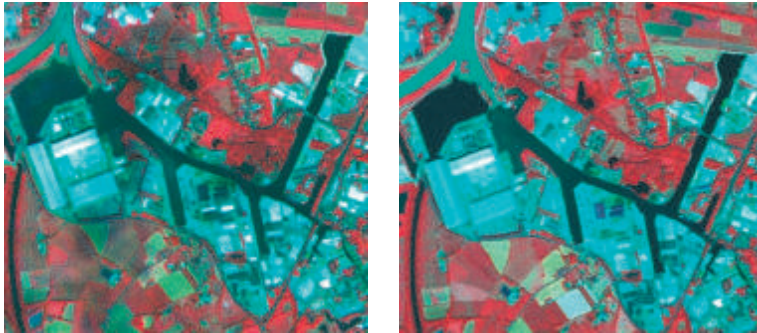


Abb. 2: Hafenanlage in der RapidEye Szene (links) und der SPOT 5 Szene (rechts)

Auch die Objekte der Beurteilungsebene 2 sind sowohl in der SPOT- als auch in der RapidEye-Szene gut zu erkennen. Als Beispiel sind in der Abb. 3 große Gebäude (Einkaufszentren) dargestellt. Ebenfalls zu erkennen sind die Verläufe von Straßen und entstehende Muster, hier z. B. ein Kleeblatt. Außerdem können in der Beurteilungsebene 2 Windschutzanlagen zwischen Feldern erkannt werden. Weitere Objekte, die identifiziert werden konnten, sind Häuserblöcke, große Gebäude mit mehreren Flügeln, zweispurige Straßen und (Eisenbahn-) Brücken über Fließgewässer.

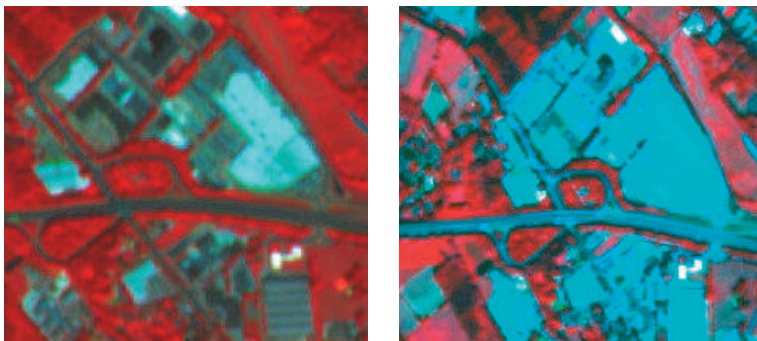


Abb. 3: Große Gebäude in der RapidEye Szene (links) und der SPOT 5 Szene (rechts)

Das Detektieren von Objekten der Beurteilungsebene 3 ist bei beiden Aufnahmesystemen bereits aufwändiger. Teil dieser Beurteilungsebene ist das Erkennen einzelner Gebäude in einem Wohngebiet oder auf einer Hofstelle. Die Abbildung 4 zeigt Häuser in einem Wohngebiet. Der Unterschied zwischen Acker- und Weideland ist erkennbar. Landwirtschaftliche Fahrzeuge bzw.

Geräte wie Grasmäher oder Mähdrescher konnten im Bild nicht detektiert werden. Züge konnten nur sehr schwierig ausgemacht werden, einzelne Waggons sind nicht mehr zu erkennen.

Gut erkennbar ist der Unterschied zwischen ein- und mehrspurigen Straßen, allerdings ist es nicht möglich, einzelne Autos zu detektieren. Außerdem konnten Wasserwege identifiziert werden, die von mittelgroßen Schiffen befahrbar sind. Des Weiteren konnten natürliche Wäldern von Obstplantagen unterschieden werden, ebenso wie offene von geschlossenen Baumdecken. Einzelne Grünflächen auf einem Golfplatz konnten nur schwer identifiziert werden.

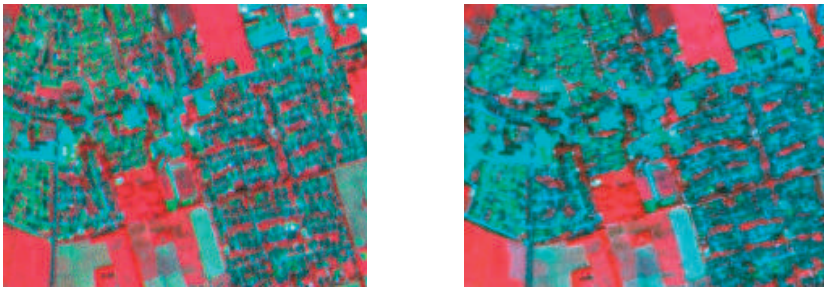


Abb. 4: Häuser in der RapidEye Szene (links) und der SPOT 5 Szene (rechts)

Objekte der Beurteilungsebene 4 zu erkennen, ist zum Teil sehr schwierig. Einzelne Gebäude auf einer Hofstelle können zwar detektiert, aber nicht eindeutig als Wohnhäuser oder Scheunen etc. identifiziert werden, wie es die Beurteilungsebene 4 fordert. Tennisplätze, einzelne Schienen, Schienenpaare bzw. Weichenschnittpunkte konnten nur schwer identifiziert werden. Eine Unterscheidung zwischen Lokomotiven und Waggons ist nicht möglich.

Aktives Pflügen von Feldern konnte ebenso wenig detektiert werden, wie Fahrspuren durch frisch gepflügte Felder oder große landwirtschaftliche Fahrzeuge auf einem Feld. Auch die Unterscheidung einzelner Bäume in einem Obstgarten war nicht möglich. Gewächshäuser konnten hingegen erkannt werden (Abb. 5).

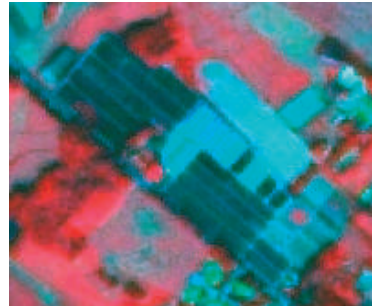
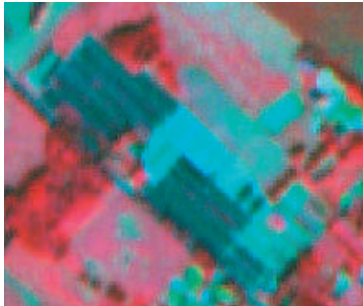


Abb. 5: Gewächshäuser in der RapidEye Szene (links) und der SPOT 5 Szene (rechts)

Objekte, die der Beurteilungsebene 5 zugeordnet werden, wurden kaum detektiert. Dazu gehört u. a. das Erkennen der Bauart eines Waggons, die Unterscheidung zwischen einzelnen Nadel- und Laubbäumen, das Erkennen einzelner Tiere, einzelner Heu- bzw. Strohballen sowie Markierungen auf Parkplätzen oder Fußballfeldern und die Identifizierung von Baumarten anhand der Krone. Die Abbildung 6 zeigt einen Campingplatz. Einzelne Zelte, wie in der Beurteilungsebene 5 gefordert, sind jedoch kaum noch zu erkennen.

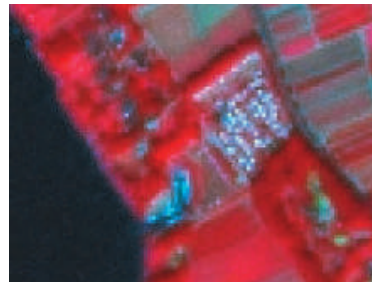


Abb. 6: Campingplatz in der RapidEye Szene (links) und der SPOT 5 Szene (rechts)

Objekte der Beurteilungsebene 6 und höher konnten nicht mehr detektiert werden. Um die Erkennbarkeit von Objekten zu steigern, wurden teilweise Maßnahmen zur Kontrastverstärkung auf den Bilddaten angewandt, z. B. eine Histogrammanpassung oder eine Streckung auf die zweifache Standardabweichung.

Insgesamt war es nicht möglich, alle im NIIRS vorgeschlagenen Objekte zu finden, weil sie einerseits in einem bzw. in beiden Bildausschnitten nicht vorhanden waren, wie z. B. Kühltürme, die nur in der RapidEye-Szene detektiert werden konnten. Andererseits handelt es sich beim NIIRS um einen in den USA entwickelten Standard, der Objekte enthält, die in den untersuchten Gebieten nicht vorkommen, wie z. B. Felder größer als 160 Acre (~64,75 ha). Sowohl die Bilddaten von SPOT, als auch von RapidEye, können insgesamt dem Rating Level 3 zugeordnet werden.

4 Vergleich der Radiometrie

4.1 Radiometrische Auflösung

SPOT 5 hat eine radiometrische Auflösung von 8 bit und RapidEye von 12 bit (Tab. 1). Pro Pixel sind also in den Rapideye Daten mehr Informationen enthalten. Eine Kombination von drei Kanälen hat bei 8 bit Daten theoretisch 16 Millionen Farben. In den meisten Bildverarbeitungsprogrammen wird diese Ansicht zur besseren Visualisierung auf 256 Farben reduziert. Es können daher nicht alle Informationen in einer Darstellung angezeigt werden.

4.2 Korrelation

Die Korrelation zwischen den unterschiedlichen Kanälen zeigt höhere Werte für SPOT und niedrigere für RapidEye (Tab. 3). Geringere Korrelationskoeffizienten bedeuten eine höhere Variation in den Kanälen, die zu einer verbesserten Unterscheidung der Objekte führen kann. Für SPOT kann dies erwartet werden, da die Information des panchromatischen Kanals in allen Kanälen zu einer erhöhten Korrelation führt. Dieses Ergebnis kann aber auch das Resultat der unterschiedlichen spektralen Filter sein.

Tab. 3: Korrelationskoeffizienten der Satelliten RapidEye und SPOT 5 für unterschiedliche Kanalkombinationen

Kanalkombination	SPOT	RapidEye
grün:rot	0,9047	0,8731
rot:nahes infrarot	0,0682	-0,2726
grün:nahes infrarot	0,3473	-0,0041

4.3 Spektrale Reflektion

Für eine detaillierte Analyse wurden 24 unterschiedliche Objekte ausgewählt. Diese 24 Klassen repräsentieren unterschiedliche Landnutzungs- und Landbedeckungsarten: 15 unterschiedliche Ackerflächen, ein Laub- und ein Nadelwald, zwei Moorgebiete, drei unterschiedliche Seen und 2 Flüsse mit unterschiedlichen Reflektionen.

Für die Analyse wurde die über der Atmosphäre gemessene Reflektion verwendet (SHOWENGERDT 1997). Allgemein zeigt der SPOT Sensor eine höhere Reflektion des grünen Kanals und eine geringere für den nahen infraroten Kanal als die RapidEye Szene. Eine Ausnahme stellen Gewässer dar, hier zeigt SPOT eine höhere Reflektion als RapidEye im nahen infraroten Kanal (Abb. 7).

4.4 Histogramme der Reflektionswerte

Die unterschiedlichen radiometrischen Auflösungen haben einen direkten Einfluss auf die Histogramme der Objekte (HANUSCH et al. 2009, ROSSO et al. 2008). Die Verteilung der Histogramme ist für beide Satelliten ähnlich (Beispiel Moor Abb. 8), aber die Histogramme von RapidEye zeigen, aufgrund der höheren Auflösung mehr Details. Das SPOT Histogramm zeigt

nur einige unterschiedliche Werte und weist Lücken auf. Dies ist ein deutliches Anzeichen dafür, dass der Detaillierungsgrad der Bilder in direkten Zusammenhang mit der radiometrischen Auflösung steht. Dies erlaubt eine bessere Unterscheidung von Klassen mit RapidEye Daten.

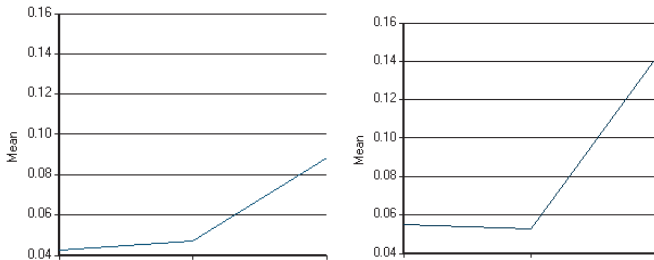


Abb. 7: Spektralkurven für einen See (Zwischenahner Meer) für RapidEye (links) und SPOT 5 (rechts) in der Kanalkombination nahes infrarot, rot, grün.

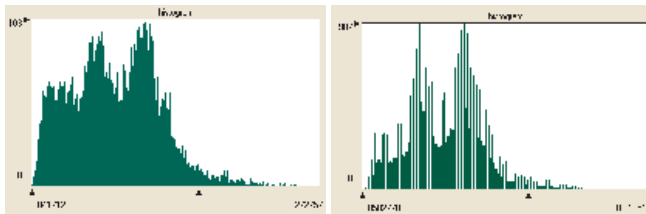


Abb. 8: Histogramme des Objektes Moor für RapidEye (links) und SPOT 5 (rechts) für den nahen infraroten Kanal.

4.5 Trennbarkeit

Basierend auf den 24 Objekten wurde eine Maximum Likelihood Klassifikation durchgeführt. Die SPOT Daten zeigten homogenere Trainingsgebiete, aber auch aufgrund der radiometrischen Auflösung von 8 bit eine reduzierte Variabilität. Daher waren die Klassifikationsergebnisse der Trainingsgebiete auch etwas besser: 97,2 % für SPOT und 94,42 % Gesamtklassifikationsgenauigkeit für RapidEye.

Zur Messung der Trennbarkeit wurden der grüne, rote und nahe infrarote Kanal verwendet. Alle Objekte wurden miteinander verglichen. Insgesamt wurden 276 Vergleiche durchgeführt. Der Jeffries Matusita Abstand und die "Transformed divergence" wurden als Trennbarkeitsmaße verwendet. Für den Jeffries Matusita Abstand wurde nur 26-mal das optimale Resultat (1414) von SPOT nicht erzielt. RapidEye erreichte dies 33-mal nicht. Für "Transformed divergence" wurde von SPOT das optimale Resultat (2000) 18-mal nicht erreicht und für RapidEye 44-mal. Unter der Annahme, dass die Trennbarkeit von 2 Objekten nicht mehr möglich ist mit einem Resultat von 1100 für Jeffries Matusita und 1700 für "Transformed divergence," konnten beim

Spot Datensatz nur wenige Objekte nicht getrennt werden, während bei RapidEye drei Paare bei Jeffries Matusita, bzw. 10 Paare bei "Transformed divergence" nicht getrennt werden konnten.

5 Zusammenfassung

Beim Vergleich der Interpretierbarkeit lassen sich anhand des NIIRS keine signifikanten Unterschiede feststellen. Sowohl die Bilddaten von SPOT als auch von RapidEye können insgesamt dem Rating Level 3 zugeordnet werden.

Beim radiometrischen Vergleich zeigt RapidEye einen Vorteil. Dieser Sensor hat eine höhere radiometrische Auflösung und erzeugt einen höheren Informationsgrad. Für die ausgewählten Objekte zeigte SPOT allerdings eine bessere Trennbarkeit. Ob dies auch zu besseren Klassifikationsergebnissen führt, muss noch weiter untersucht werden. Zudem wurden in dieser Studie nur drei Kanäle für jeden Sensor ausgewählt, dies soll in den folgenden Untersuchungen noch durch den MIR Kanal von SPOT und dem Red Edge sowie dem blauen Kanal von RapidEye ergänzt werden.

6 Literaturverzeichnis

- FÖRSTER, M., SCHUSTER, C., SONNENSCHN, R., BAHL, A. & KLEINSCHMIDT, B., 2011: Möglichkeiten der Erfassung von Landbedeckung und Vegetationsgesellschaften mittels RapidEye-Daten, In: Borg, E., Daedelow, H. (Hrsg.): RapidEye Science Archive (RESA) – Erste Ergebnisse, 3. Resa Workshop, S. 3-16.
- HANUSCH, T. & BALTSAVIAS, E., 2009: Evaluation of digital photogrammetric aerial camerasystems radiometric evaluation of DMC, ADS 40 and Ultracam-X, DGPF Tagungsband 18.
- HOTHEN, D., IRVINE, J. M., MOHR, E. & BUCKLEY, K. B., 1996: Quantifying Image Interpretability for Civil Users, ASPRS/ACSM Annual Convention & Exposition Technical Papers, Bethesda, 1, 292-298.
- LEACHTENAUER, J. C., 1996: National Imagery Interpretability Rating Scales Overview and Product Description, ASPRS/ACSM Annual Convention & Exposition Technical Papers, Bethesda, 1, S. 262-272.
- ROSSO, P.H., KLONUS, S., EHLERS, M. & TSCHACH, E., 2008: Comparative Properties of Four Airborne Sensors and their Applicability to Land Surface Interpretation, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XXXVII, Part B1, Beijing, S. 545-550.
- SCHOWENGERDT, ROBERT A., 1997: Remote Sensing: Models and Methods for Image Processing 2nd ed., Academic Press, San Diego.
- STEFANOUS, M. S. & KEREKES, J. P., 2009: A method for assessing spectral image utility, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 47, 6, S. 1698 – 1706.
- STOFFELS, J., HILL, J., NINK, S., NEUSSEL, M., MADER, S., SACHTLEBER, T., ONTRUP, G., EGIDI, H. & SEGATZ, E., 2011: Möglichkeiten zur Integration von RapidEye-Daten in Forstinventur- und Monitoringverfahren, In: Borg, E., Daedelow, H. (Hrsg.): RapidEye Science Archive (RESA) – Erste Ergebnisse, 3. Resa Workshop, S. 17-30.

Identifikation von Synergieeffekten durch die Verwendung von RapidEye und TerraSAR-X Daten für die Veränderungsdetektion von Landnutzungsgeometrien - Erfahrungen aus DeCOVER 2 -

MICHAEL SCHLUND¹, ERIK ZILLMANN², RENE GRIESBACH² & HORST WEICHEL²

Zusammenfassung: Im Rahmen von DeCOVER 2 wurden fernerkundungsgestützte Analysemethoden zur Veränderungserfassung zwischen Vektor- (t0) und Rasterbilddaten (t1) entwickelt, die eine effiziente Aktualisierung der Vektordaten ermöglicht. Ein fundamentaler Aspekt des gesamten Verfahrensablaufs ist die automatische Indikation potenziell veränderter Flächen.

Das technische Verfahren zur Veränderungsindikation wurde separat auf Basis von RapidEye und TerraSAR-X Daten entwickelt und angewendet. In Anbetracht des unterschiedlichen Informationsgehalts beider Aufnahmesysteme ist von verschiedenen, klassenspezifischen Vorteilen eines jeden Sensors auszugehen, deren Kenntnis zur Optimierung der klassenspezifischen Veränderungsindikation genutzt werden kann.

1 Einleitung

Die im Rahmen des DeCOVER 2 Verbundprojektes erarbeiteten Methoden zur Erfassung von Veränderungen sollen zur Steigerung der Kosteneffizienz des Aktualisierungsprozesses bestehender Geodaten beitragen, indem die Überarbeitung von Nutzerdatengeometrien und Attributen nur auf die Flächen fokussiert wird, die sich mit hoher Wahrscheinlichkeit verändert haben. Der verlässlichen Ausweisung potentieller Veränderungsflächen kommt somit eine tragende Rolle im Gesamtkonzept des Aktualisierungsprozesses zu, um eine Vollinventur und komplette Neukartierung des Geodatenbestandes zu vermeiden (BUCK 2010).

Es wurden fernerkundungsgestützte Analyseverfahren entwickelt, die die bestehende Kartierung (t0) mit aktuellen Satellitenbildern (t1) vergleicht. Der Ansatz verzichtet bewusst auf die Nutzung einer Fernerkundungsaufnahme des Zeitpunktes t0, denn oft gibt es keine passende Bildinformation vom Zeitpunkt der Erstellung der Karte. Die entwickelte Methode realisiert stattdessen den Vergleich der Bildinformation (t1) mit der Karte (t0) über eine bildspezifische Modellbildung in idealtypische Referenzsignaturen für jede Klasse. Die Untersuchungen wurden für TerraSAR-X und RapidEye durchgeführt, wobei die Analyseverfahren verschieden sind, um den jeweiligen Sensoreigenschaften Rechnung zu tragen (REDER et al. 2011).

Auf Grund des unterschiedlichen Informationsgehalts beider Aufnahmesysteme bestehen klassenspezifische Qualitätsunterschiede in der Veränderungsindikation. Kern des Artikels ist es, die Unterschiede und Vorteile jedes Sensors in Bezug auf die klassenspezifische Veränderungsindikation zu erläutern und entsprechende Synergien beider Systeme aufzuzeigen.

1) Michael Schlund, Astrium GEO-Information Services, Claude-Dornier-Str., 88090 Immenstaad, michael.schlund@astrium.eads.net

2) Dr. Erik Zillmann, Dr. Rene Griesbach, Dr. Horst Weichelt, RapidEye AG, Molkenmarkt 30, 14776 Brandenburg a.d.H., zillmann@rapideye.de, griesbach@rapideye.de, weichelt@rapideye.de

2 Datengrundlage

2.1 Satellitendaten

Für die Umsetzung mit TerraSAR-X wurden einfach polarisierte StripMap Aufnahmen in HH-Polarisation (horizontal) verwendet. Da meist ein Radardatensatz nicht ausreicht, um Klassen zu trennen, wurden multitemporale Daten genutzt und zusätzliche Merkmale abgeleitet. Diese Merkmale sind *co-occurrence* Texturmaße (HARALICK et al. 1973), der Variationskoeffizient, die langzeitliche und kurzzeitliche Kohärenz. Die Aufnahmedaten stammen vom März, Juli, August und September 2010. Mit den vier Aufnahmetermen wurde versucht, phänologische Unterschiede der Vegetation zu erfassen und somit Vegetationsklassen besser trennen zu können. Für die Veränderungserfassung mit TerraSAR-X wurden 15 Merkmale verwendet (Tab. 1). Die Kombination von Rückstreuung und Kohärenz sowie die Texturmaße sind als Trennungsmerkmale von Landbedeckungsklassen geeignet (BRUZZONE et al. 2004).

Tab. 1: Übersicht der abgeleiteten Merkmale aus TerraSAR-X

Merkmal	Ursprungsdatensatz des Merkmals	Pixelausdehnung (in m)
4 Amplituden	-	2,5
Texturmaß <i>mean</i>	2010-07-26	2,5
<i>Variance</i>	2010-07-26	2,5
<i>Homogeneity</i>	2010-07-26	2,5
<i>Contrast</i>	2010-07-26	2,5
<i>Dissimilarity</i>	2010-07-26	2,5
<i>Entropy</i>	2010-07-26	2,5
<i>Second moment</i>	2010-07-26	2,5
<i>Correlation</i>	2010-07-26	2,5
Variationskoeffizient	2010-07-26	5
Langzeitliche Kohärenz	2010-03-27 & 2010-07-26	5
Kurzzeitliche Kohärenz	2010-07-26 & 2010-08-06	5

Die Umsetzung des Verfahrens unter Nutzung optischer Satellitenbilddaufnahmen basiert auf einem mono-temporalen Datensatz des RapidEye Sensors vom Aufnahmezeitpunkt 07.07.2010. Im Rahmen der systematischen Datenprozessierung wurden die Daten sensorradiometrisch korrigiert und unter Verwendung hochgenauer Bodenreferenzpunkte orthorektifiziert. Auf eine Ko-Registrierung mit den Vektordaten des Basis-DLM (digitales Landschaftsmodell) konnte verzichtet werden, da die geometrische Abweichung zur Referenz kleiner als 5 m ist. Die verwendeten optischen Daten wurden nicht atmosphärisch korrigiert, da der verwendete methodische Ansatz unabhängig vom atmosphärischen Einfluss ist. Der abgedeckte Spektralbereich der 5 RapidEye Kanäle liegt zwischen 440 nm – 850 nm. Basierend auf diesem Bilddatensatz wurden verschiedene Merkmale erzeugt (Tab. 2).

Tab. 2: Abgeleitete Merkmale auf Basis der RapidEye Daten.

	Merkmale
Spektrale Kanäle	Blau, Grün, Rot, RedEdge, NIR, Brightness
Vegetationsindices	NDVI, ARVI, NDVI _{rededge} ,
<i>Band-Ratios</i>	NIR/Blau, Rot/Blau
<i>Statistische Transformationen</i>	<i>Sobel-Filter (3x3), 1. Hauptkomponente</i>
<i>Standardabweichung</i>	Blau, Grün, Rot, RedEdge, NIR, NDVI, HK1, Sobel-Filter, Homogeneity
<i>Haralick Texturen (HK 1, Rot)</i>	Entropy, Homogeneity, Dissimilarity, Correlation, Contrast, Angular 2nd Moment, Mean,
<i>IHS Transformation</i>	Intensity, Hue, Saturation

2.2 Nutzergeometrien

Die Veränderungsanalyse wurde für das Testgebiet Herne basierend auf dem aktuellen Basis DLM von 2010 im AAA® Fachschema (AFIS-ALKIS-ATKIS) durchgeführt. Diese Daten liegen als mehrlagiger Datensatz im Vektorformat vor und wurden von einem Projektpartner geometrisch in einen flachen Datensatz transformiert. Da die verwendete Satellitenbildgrundlage ebenfalls von 2010 datierte, war zu erwarten, dass nur wenige reale Veränderungen identifiziert werden könnten. Daher wurde der Vektordatensatz mittels einer Verschneidung mit ATKIS Daten aus dem Jahr 2008 rückdatiert, um die Anzahl der detektierbaren Veränderungen zu erhöhen.

Um Interoperabilität mit anderen Geoinformationen zu erreichen, wurde die Geodatenbank in die im Vorgängerprojekt entwickelte DeCOVER Nomenklatur übersetzt. Die DeCOVER Nomenklatur ist hierarchisch aufgebaut und besteht im feinsten Level aus über 30 Objektarten zur Landnutzung / Landbedeckung, aufgeteilt in die fünf verschiedenen Objektkategorien: Urbane Räume, Wald, Gewässer, Offenland agrarisch und naturnah geprägt (DeCOVER 2010). Einige dieser Klassen sind durch deren Landnutzung definiert und daher schwer mit Methoden der Fernerkundung zu detektieren.

3 Methodik

3.1 Veränderungsindikation

Die Veränderungsindikation erfolgt auf Basis von bestehenden Nutzerdaten (Vektordaten), die einem Zeitpunkt t_0 entsprechen, sowie aktueller Satellitenfernerkundungsdaten, die zum Zeitpunkt t_1 aufgenommen werden. Die bestehenden Nutzerdaten werden als Basis der Aktualisierung über Datenvorbereitungsprozesse syntaktisch und semantisch unter Berücksichtigung der Nutzerdatengeometrie in die DeCOVER Prozesskette überführt.

Die Vorverarbeitung der TerraSAR-X Daten umfasst die Segmentierung heterogener Klassen, die Kalibrierung der Daten sowie die Orthorektifizierung. Als Basis der Segmentierung wurden die Nutzergeometrien verwendet. Wie bereits erwähnt wurde, kann die Karte nicht direkt mit den Satellitenbilddaten verglichen werden. Der Vergleich erfolgt daher durch eine Modellbildung, indem für die Objekte der Klassen des Vektordatensatzes idealtypische Signaturen abgeleitet

werden. Mit Hilfe eines statistischen Vergleichs zwischen der Referenzsignatur mit der a priori Klasseninformation und der aktuellen Signatur aus den Bilddaten wird die Veränderung untersucht. Über das Maß der Übereinstimmung können Veränderungswahrscheinlichkeiten berechnet und mittels Grenzwertfestlegung Veränderungen indiziert werden (SCHLUND & PONCET 2011). Anschließend werden die indizierten Veränderungen mithilfe eines Regelwerkes automatisch hinsichtlich ihrer Plausibilität überprüft und falsch indizierte Veränderungen reduziert. Dabei wird innerhalb der indizierten Veränderungsobjekte segmentiert und deren Bestandteile sowie deren Kontext klassifiziert und bewertet (SCHLUND & PONCET 2011, PONCET et al. 2011).

Die für RapidEye-Daten entwickelte Methodik ist vergleichbar mit dem Ansatz für die Auswertung der TerraSAR-X Daten, denn auch hier erfolgt der Vergleich zwischen Bild und Karte auf Basis idealtypischer Signaturen der verschiedenen Klassen. Hier wird jedoch zunächst der Bildinhalt aller Nutzergeometrien der heterogenen Klasse Landwirtschaft mittels einer unüberwachten Klassifikation in mehrere Sub-Klassen geclustert. Der anschließende Segmentierungs- und Klassifizierungsprozess wird in zwei Iterationen durchgeführt. Im ersten Iterationsschritt werden mit einer schnellen Chessboard-Segmentierung (eCognition) innerhalb der vorhandenen originalen Nutzergeometrien Segmente von 1 ha Grundfläche erzeugt. Subsegmente mit einer Fläche < 0.25 ha, die aufgrund der Beibehaltung der Objektgrenzen dabei entstehen können, werden mit den angrenzenden Nachbarsegmenten gleicher Klasse fusioniert. Basis für die Analyse der Segmente sind die aus den originären Bilddaten generierten 39 spektralen Merkmale (Tab. 2). Die Klassifikation erfolgt mittels des C5-Klassifikators (QUINLAN 2003), der unabhängig von der Verteilung der Daten Entscheidungsbäume auf Basis von Trainingsdaten generiert. Kern des Verfahrens ist die automatische Auswahl der Referenzpolygone, auf deren Basis die ideal-typischen Signaturen für jede Nutzerklasse bestimmt werden.

Bei der nachfolgenden Klassifizierung wird dann entschieden, welche der Segmente diesen ideal-typischen Signaturen entsprechen und welche nicht, letztere werden als potentielle Veränderungspolygone ausgewiesen. Für jede Klasse wurde dazu ein Entscheidungsbaum unter Berücksichtigung der klassenspezifischen Übergangswahrscheinlichkeiten generiert und auf den Gesamtdatensatz angewendet (REDER et al. 2011). Alle Segmente, deren Klassenzugehörigkeit sich geändert hat, wurden anschließend selektiert, innerhalb der Nutzergeometrien zusammengefügt und anschließend einer zweiten Segmentierungsprozedur zugeführt. Diese zweite Segmentierung erfolgte mittels des Multi-Resolution-Verfahrens, um die Geometrie der veränderten Fläche möglichst gut zu erfassen. Anschließend werden die generierten Segmente abermals mit den zuvor erzeugten Entscheidungsbäumen klassifiziert.

3.2 Qualitätskontrolle

Gegenstand der Qualitätsprüfung waren die durch die Veränderungsanalyse generierten Datensätze basierend auf den für TerraSAR-X beziehungsweise RapidEye entwickelten Verfahren. Beide Datensätze der Veränderungsindikation wurden hinsichtlich ihrer thematischen Genauigkeit überprüft. Die angewandten Methoden zur Genauigkeitsanalyse basieren auf abgesicherten statistischen Methoden und entsprechen derzeitigen allgemeinen Standards (DIN ISO 19100-Serie). Die Berechnung des Stichprobenumfangs erfolgte unabhängig von der Fläche

der Klassifikation nach GOODCHILD et al. 1994.

Im Rahmen der Qualitätsprüfung wurde untersucht, ob eine als „verändert“ indizierte Fläche beziehungsweise eine als „nicht verändert“ gekennzeichnete Fläche korrekt ausgewiesen wurde. Darüber hinaus wurde im Falle einer vorgefundenen Veränderung die dazugehörige Veränderungsrichtung angegeben. Diese Angabe ermöglicht es, signifikante Veränderungsrichtungen zwischen bestimmten Klassen und/oder übergeordneten Kategorien, wie beispielsweise von Landwirtschaft nach Bebauung, zu analysieren.

Die Prüfung der thematischen Genauigkeit fand mittels einer gewichteten stratifizierten Zufallsstichprobe statt. Gewichtet, da die einzelnen Klassen in deutlich unterschiedlichen Mengenverhältnissen vorliegen. Die Anzahl der Stichproben variiert deshalb mit der Anzahl des Vorkommens einer Klasse im Untersuchungsgebiet. Stratifiziert bedeutet, dass aus allen vorkommenden Klassen eine gewisse Stichprobe gezogen wird. Bei einer zufällig verteilten Stichprobe erhalten somit alle Polygone einer Klasse die gleiche statistische Chance in die Stichprobe zu gelangen. Die Stratifizierung der Zufallsstichprobe basiert auf den Klassen des DeCOVER Objektartenkatalogs.

Anhand der im Projekt vorhandenen Genauigkeitsvorgaben und einem angenommenen Vertrauensintervall von 5 % wurde die minimale Größe einer Stichprobe je Klasse (Stratum) ermittelt. Durch diese minimale Anzahl an Stichproben wird gewährleistet, dass die Stichproben für das Untersuchungsgebiet repräsentativ sind. Die Größe der Gesamtstichprobe ergab sich aus der Anzahl der vorhandenen Klassen (Straten) multipliziert mit der errechneten Stichprobe pro Klasse. Diese Gesamtstichprobe wurde mit dem prozentualen Vorkommen der Klassen nach der Aggregation ins Verhältnis gesetzt. Die Obergrenze der Stichproben je Klasse entspricht der errechneten minimalen Stichprobengröße. Aufgrund der jeweiligen Gegebenheiten in einem Testgebiet (Häufigkeit der Klassen) kann die Anzahl der Stichproben pro Klasse variieren und unterhalb dem errechneten Minimum liegen. Hieraus ergeben sich Auswirkungen dahingehend, dass das Ergebnis für die betroffene Klasse möglicherweise nicht mehr repräsentativ ist.

Bei der sich anschließenden Prüfung wurden die selektierten Polygone als Ganzes bewertet. Als Referenz dienten die optischen Satellitendaten, die zur Erstellung der Veränderungsindikation verwendet wurden. Die Ergebnisse dieser Prüfung wurden in eine Konfusionsmatrix übertragen, deren Ergebnisse den nachfolgenden Tabellen entnommen werden können und beschrieben werden. Die unterschiedliche Anzahl an Stichproben pro Datensatz resultiert aus der unterschiedlichen Menge von Polygonen, die als verändert beziehungsweise als nicht verändert gekennzeichnet wurden.

4 Ergebnisse & Diskussion

4.1 Sensorspezifische Ergebnisse

Insgesamt wurden im Rahmen des Projektes ca. 40.000 Polygone im Untersuchungsgebiet Herne untersucht. Dies entspricht einer Fläche von rund 1.000 km². Bei der Anwendung des Verfahrens mit TerraSAR-X wurden ~ 5.000 Veränderungspolygone indiziert, was 14 % der untersuchten Polygone entspricht. Das bedeutet, dass ca. 200 km² der ursprünglichen Fläche als verändert erkannt wurden (20 %). Das Ziel der Fokussierung wurde damit erreicht, da bei nachfolgenden

Prozessen einer Aktualisierung nur noch 1/5 der Fläche und ca. 1/10 der Polygone bearbeitet werden müssten. Im Vergleich zu einer Vollinventur würden hierdurch arbeits-, kosten- und zeitintensive Prozesse reduziert werden. In Tabelle 3 ist eine Konfusionsmatrix des Ergebnisses aus TerraSAR-X dargestellt. Die Qualitätsprüfung erfolgte für TerraSAR-X anhand von 1.842 Stichprobenpunkten und ergab eine Gesamtgenauigkeit von ~ 77 %.

Tab. 3: Konfusionsmatrix des TerraSAR-X Ergebnisses (unabhängige Qualitätskontrolle).

	Veränderung	Keine Veränderung	User's Accuracy
Veränderung	358	237	60,17 %
Keine Veränderung	187	1060	85,00 %
Producer's Accuracy	65,69 %	81,73 %	Overall acc.: 76,98 %

Tabelle 4 zeigt die Ergebnisse der Validierung der Veränderungserfassung mit RapidEye Daten entsprechend der oben beschriebenen Methodik. Auch hier konnte das Ziel einer Fokussierung durch Reduktion der Anzahl der zu bearbeitenden Polygone auf ca. 50% erreicht werden. Geprüft wurden hier insgesamt 1.932 Polygone. Von den insgesamt vorhandenen 525 Veränderungen konnten über 75% gefunden werden. Allerdings wurden von den 1.030 als verändert ausgewiesenen Polygonen nur 397 als tatsächliche Änderung bestätigt, für 633 Flächen hat sich dieser Verdacht nicht bestätigt. Dies wirkt sich entsprechend auf die formale Gesamtgenauigkeit des Verfahrens aus.

Tab. 4: Konfusionsmatrix des RapidEye Ergebnisses (unabhängige Qualitätskontrolle).

	Veränderung	Keine Veränderung	User's Accuracy
Veränderung	397	633	38,54 %
Keine Veränderung	128	774	85,81 %
Producer's Accuracy	75,62 %	50,01 %	Overall acc.: 60,61 %

Eine genauere Analyse zeigt dabei, dass die nicht gefundenen Veränderungen nicht gleichmäßig verteilt über alle Klassen auftreten, sondern sich auf bestimmte Klassenübergänge konzentrieren. Für die weitere Untersuchung und Verbesserung der Methodik war dementsprechend eine klassenspezifische Untersuchung der erreichten Genauigkeit erforderlich.

Die Qualitätsprüfung beinhaltet nicht nur Informationen, ob eine Veränderung vorliegt, sondern auch die Angabe über die Richtung der Veränderung. Diese Information der Veränderungsrichtung wurde dazu verwendet, um häufige und wichtige Veränderungen zu erkennen. Wohnbebauung und Industrie verändern sich in lediglich ca. 10 % bzw. 9 % der Fälle der Stichproben. Die häufigsten Veränderungen sind von Grünland zu anderen Klassen, wobei

der Übergang von Grün- zu Ackerland den größten Anteil der Veränderungen stellt. Insgesamt verändern sich laut Validierungsergebnissen 45 % aller Strichproben der Klasse Grünland. Weitere Klassen, die sich häufig verändern, sind Mischwald (44 %), die Klasse „Strauchvegetation, Wald-Strauch Übergangsstadien, Gehölzstrukturen“ (30 %), städtische Grünflächen (30 %), Nadelwald (27 %) und Laubwald (25 %). Hierbei handelt es sich nicht nur um natürliche Veränderungen, sondern auch um Ungenauigkeiten in ATKIS, die ebenso eine Veränderung indizieren sollten.

Die Information der Veränderungsrichtung wurde verwendet, um Detektionen klassenspezifisch zu untersuchen. Hierfür wurden die Validierungspunkte, die separat für RapidEye und TerraSAR-X vorlagen, zusammengefasst, um eine verlässliche Anzahl an Punkten in bestimmten Klassen sowie vergleichbare Resultate zu erzielen. Nachfolgend werden die Ergebnisse für das Verfahren mit RapidEye und TerraSAR-X in den Veränderungsrichtungen Wohnbaufläche, Industrie und Gewerbefläche und Ackerbau vergleichend beschrieben. Diese Analyse beinhaltet demnach Punkte die beispielsweise zu Wohnbaufläche wurden bzw. Wohnbaufläche geblieben sind.

Tab. 5: Konfusionsmatrix der TerraSAR-X und RapidEye Ergebnisse für den Übergang zu Wohnbaufläche (aus 806 Untersuchungspunkten)

Klasse Wohnbaufläche (t1)	77 „Veränderungen“		729 „Keine Veränderungen“	
	Optische RapidEye Daten	TerraSAR-X Daten	Optische RapidEye Daten	TerraSAR-X Daten
Veränderungen	68	45	384	1
Keine Veränderungen	9	32	345	728

In der Tabelle 5 sind die Ergebnisse für die Veränderung in Richtung Wohnbaufläche zu erkennen. Hierbei sind die Ergebnisse der RapidEye und TerraSAR-X Daten vergleichend dargestellt. Die 806 Untersuchungspunkte setzen sich demzufolge aus der Spalte „Veränderungen“ und „Keine Veränderungen“ separat für RapidEye und TerraSAR-X zusammen. Die richtigen Ergebnisse sind hierbei grau hinterlegt. Von tatsächlich vorhandenen 77 Änderungen in der Klasse Wohnbaufläche konnten mittels des Verfahrens basierend auf RapidEye Bildern 68 (88 %) identifiziert werden. Darüber hinaus wurden von 729 tatsächlich nicht geänderten Objekten weitere 384 (52 %) als geändert eingestuft. Das Verfahren mit den optischen RapidEye Daten weist damit eine geringe Auslassungsrate bei gleichzeitigem hohem Einschließungsfehler auf. Auf der anderen Seite impliziert der Fakt, dass fast alle tatsächlichen Veränderungen gefunden werden, auch, dass die restlichen Objekte folglich mit hoher Wahrscheinlichkeit unverändert sind. Dies wird dadurch deutlich, dass von den insgesamt als „Keine Veränderungen“ ausgewiesenen 354 Polygonen nur 9, also weniger als 3 %, doch als geändert bewertet wurden. Somit wurden also 97 % der als nicht verändert ausgewiesenen Flächen richtig erkannt (Tab. 5).

Die auf der Nutzung von TerraSAR-X basierende Lösung erzielt eine Gesamtgenauigkeit im

Übergang zur bebauten Klasse von ~96 % (Tab. 5), wobei allerdings über 40 % der Änderungen nicht erfasst wurden. Eine genaue Analyse der Übergänge zeigt, dass neue Bebauungsflächen fast ausnahmslos gefunden werden und TerraSAR-X sich daher sehr gut eignet, neu bebaute Objekte zu erkennen und richtig zu detektieren. Die 32 Auslassungen stammen zu einem Drittel von dem Übergang von Industrie- zu Wohnbebauung. Diese funktionale Veränderung ist mit Fernerkundungsmethoden kaum zu detektieren, da verschiedene Bauarten schwer voneinander zu trennen sind. Im Gegensatz dazu wird nur ein Objekt überdetektiert.

Tab. 6: Konfusionsmatrix der TerraSAR-X und RapidEye Ergebnisse für den Übergang zu Industrie und Gewerbefläche (aus 211 Untersuchungspunkten)

Klasse Industrie und Gewerbefläche (t1)	18 „Veränderungen“		193 „Keine Veränderungen“	
	Optische RapidEye Daten	TerraSAR-X Daten	Optische RapidEye Daten	TerraSAR-X Daten
Veränderungen	14	13	122	4
Keine Veränderungen	4	5	71	189

Ähnliche Ergebnisse können mit TerraSAR-X für die Übergänge in die Klasse Industrie und Gewerbefläche erzielt werden. Auch hier liegt die Gesamtgenauigkeit in dieser Klasse bei ~95 % (Tab. 6). In der Detektion von Industriebebauung werden mit TerraSAR-X 72 % der Veränderungen richtig detektiert, wobei lediglich vier Objekte überdetektiert werden. Auch hier beruhen einige Auslassungen auf der Veränderung von einer Bauart in eine andere. Die auf RapidEye Daten basierende Methode erkennt im Test 14 von 18 (77 %) geänderten Klassensegmenten (Tab. 6). Ähnlich der Wohnbebauung können mit dem Verfahren der optischen RapidEye-Daten nahezu alle Veränderungen detektiert werden, wobei jedoch wiederum eine Überdetektion stattfindet. Das Verfahren reagiert sensibel auf Abweichungen zur Referenzsignatur, die in diesem Fall vor allem durch Vegetationsflächen innerhalb der Industriebebauung hervorgerufen werden, welche jedoch nicht als Veränderungen zu interpretieren sind.

Tab. 7: Konfusionsmatrix der TerraSAR-X und RapidEye Ergebnisse für den Übergang zu Ackerbau (aus 368 Untersuchungspunkten)

Klasse Ackerbau (t1)	66 „Veränderungen“		302 „Keine Veränderungen“	
	Optische RapidEye Daten	TerraSAR-X Daten	Optische RapidEye Daten	TerraSAR-X Daten
Veränderungen	64	30	140	73
Keine Veränderungen	2	36	162	229

An einem weiteren Beispiel werden natürliche Objektklassen betrachtet. Mittels der RapidEye basierten Methode lassen sich 64 von 66 Änderungen (97 %, Tab. 7) in der Klasse Ackerbau automatisch detektieren. Lediglich 2 Auslassungen erlauben hier den Schluss, dass die Methode zur Änderungsindikation sehr geeignet ist und die als „Keine Veränderung“ ausgewiesenen Polygone tatsächlich auch nicht verändert sind und in der Karte der korrekten Klasse angehören. Auch hier ist der Einschließungsfehler im Vergleich zu TerraSAR-X höher. Im Vergleich zu den Bebauungsklassen ist die Überdetektionsrate jedoch geringer, was auf eine bessere Trennbarkeit der Klasse Landwirtschaft hindeutet. Wie auch in den vorangegangenen Beispielen weist die auf TerraSAR-X basierende Methode einen großen Anteil (229 von 302, entspricht 76 %) der unveränderten Landwirtschaftsflächen-segmente korrekt aus. Gegenüber den Bebauungsklassen sind jedoch sowohl der Einschließungsfehler als auch die tatsächlich nicht detektierten Landbedeckungsveränderungen höher. Besonders der Übergang von Wirtschaftsgrünland zu Ackerbau wird schlecht erkannt (35 von 36 ausgelassenen Detektionen, Tab. 7). Beide Klassen sind nur schwer voneinander zu trennen, so dass Veränderungen zwischen Acker und Grünland generell schlecht zu detektieren sind.

4.2 Synergieeffekte

Wie in den meisten Anwendungsfällen ist die Informationsgenauigkeit höher, je mehr Ausgangsinformationen verfügbar sind. Die Ergebnisse der Bebauungsklassen zeigen, dass TerraSAR-X sehr gut geeignet ist, neu bebaute Objekte zu detektieren und Übergänge von natürlichen Oberflächen zu neuer Bebauung zu erkennen. Mit dem auf RapidEye Daten basierendem Verfahren können hier insgesamt deutlich mehr Veränderungen detektiert werden, jedoch ist die Überdetektion in diesen Klassen höher und daher eine Fokussierung schwieriger. Das Beispiel der Industrie- und Gewerbefläche mit einer Genauigkeit von ~95 % zeigt deutlich die Stärke des TerraSAR-X Verfahrens in diesen Klassen. Hier ist die Anzahl der gefundenen Veränderungen im Vergleich zum RapidEye Verfahren ähnlich bei einer weitaus stärkeren Fokussierung aufgrund geringer Überdetektion.

Im Vergleich dazu sind die optischen RapidEye Daten besser geeignet, Veränderungen zwischen natürlichen Oberflächen zu detektieren, wie das Beispiel der Klasse Ackerbau zeigen soll. Mit RapidEye-Bildern und dem dafür entwickelten Verfahren können nahezu alle Veränderungen zu dieser Klasse detektiert werden. Der Einschließungsfehler ist im Vergleich zu den urbanen Klassen wesentlich geringer. Die Anzahl der Überdetektionen mit TerraSAR-X in der Klasse Ackerbau ist höher als in den Wohnbau-, Industrie und Gewerbeklassen. Dies ist auf die Tatsache zurückzuführen, dass sich die Klasse Ackerbau durch eine große Variabilität bei gleichzeitig geringer Trennbarkeit zu anderen Vegetationsklassen auszeichnet. Vor allem die Veränderung von Grünland zu Ackerbau erzeugt Konfusionen, die in den RapidEye Daten deutlich geringer sind.

5 Fazit & Ausblick

Die Ergebnisse zeigen, dass beide Sensoren und die dafür jeweils entwickelten Verfahren zur Änderungsdetektion Vorteile und Nachteile haben. Die Leistungsfähigkeit der betrachteten Verfahren wird jedoch im Zusammenhang mit den jeweiligen Nutzeranforderungen zu bewerten

sein. Aus den hier aufgezeigten Beispielen ist bereits ersichtlich, dass eine multisensorale Anwendung Vorteile mit sich bringen würde. Aufgrund der Unterschiedlichkeit der Verfahren sind die Ergebnisse in Bezug auf die Synergieeffekte jedoch bedingt aussagekräftig. Daher sind weitere Analysen notwendig, um die Synergieeffekte quantitativ beschreiben zu können.

Des Weiteren könnten die Verfahren effektiver gemacht und verbessert werden. Für beide Sensoren gilt, dass sich durch eine Fokussierung auf Landbedeckungsklassen die Gesamtgenauigkeit verbessern ließe. Bei der Veränderungsindikation im DeCOVER Projekt werden über 30 Klassen untersucht, die bebaute Bereiche, Vegetationsflächen, vegetationsfreie/arme Flächen und Gewässer enthalten. Diese Vielzahl an Klassen erlaubt keine Auseinandersetzung mit einem bestimmten Trennbarkeitsproblem wie beispielsweise Grünland und Ackerland. Die klassenbezogenen Unterschiede in den Ergebnissen sind sowohl in den angewandten Verfahren als auch dem Informationsgehalt der verwendeten Sensordaten begründet. In der Integration multi-temporalen RapidEye Daten wird noch ein zusätzliches Verbesserungspotenzial gesehen.

Danksagung

Das Projekt DeCOVER2 wird gefördert von der Raumfahrt-Agentur des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V. mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie. Ein Dank gilt auch der GAF AG für die Unterstützung und Durchführung der unabhängigen Qualitätsanalysen.

6 Literaturverzeichnis

- BRUZZONE, L., MARCONCINI, M., WEGMÜLLER, U. & WIESMANN, A., 2004: An Advanced System for the Automatic Classification of Multitemporal SAR Images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **42** (6), S. 1321-1334.
- BUCK, O., 2010: DeCOVER 2 – The German GMES extension to support land cover data systems: Status and outlook, *Proceedings ESA Living Planet Symposium Bergen, Norwegen*. 28.06-02.07.2010.
- DeCOVER 2010: DeCOVER Objektartenkatalog V2.0, <http://www.decover.de/public/Beschreibung%20DeCOVER%20Ausgangsdienst%200910.pdf>, zuletzt besucht Februar 2011.
- GOODCHILD, M.F., BIGING, G.S., CONGALTON, R.G., LANGLEY, P.G., CHRISMAN N.R. AND F.W. DAVIS. 1994. Final Report of the Accuracy Assessment Task Force. California Assembly Bill AB1580, Santa Barbara: University of California, National Center for Geographic Information and Analysis (NCGIA).
- HARALICK, R.M., SHANMAGUN, K. & DINSTEIN, I., 1973: Textural Features for Image Classification. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, **3** (6), S. 610-21.
- LU, D. & Q. WENG, 2006: Use of impervious surface in urban land-use classification. - *Remote Sensing of Environment*, **102**, 146-160.
- PONCÉT, F. VON, B. MAYHEW & M. SCHLUND, 2011: TerraSAR-X support for geo-database update. – Poster of 4th TerraSAR-X Science Team Meeting, 14 – 16 February 2011, Oberpfaffenhofen, Germany.
- QUINLAN, J.R., 2003. *Data Mining Tools See5 and C5.0*. Rulequest Research, St. Ives, NSW,

Australia, www.rulequest.com/see5-info.html.

- SCHLUND, M. & F. VON PONCÉT, 2011: TerraSAR-X Daten zur Unterstützung der Aktualisierung von Geodatenbanken. In: SEYFERT, E. (Hrsg.): Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation e.V. Band 20. 31. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF. Potsdam: Deutsche Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation (DGPF), 389-399.
- REDER, J., ZILLMANN, E., KUNZE, M., LOEWE, P. & WEICHEL, H., 2011: Automatische Erfassung potentieller Veränderungsflächen in thematischen Vektordaten unter Verwendung von aktuellen nRapidEye Bilddaten. In: SEYFERT, E. (Hrsg.): Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation e.V. Band 20. 31. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF. Potsdam: Deutsche Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation (DGPF),

Analyse linearer Trends in der Phänologie multimodaler Vegetation, Auswertung von NDVI Zeitreihen für das Niger Binnendelta (Rep. Mali / Westafrika)

RALF SEILER¹

Zusammenfassung: Die Phänologie des Niger Binnendeltas ist durch sich teilweise überlagernde Vegetationsphasen gekennzeichnet, da die Hochwasserwelle außerhalb der Regenzeit eintrifft. Die Modellierung der Phänologien nutzt eine Erweiterung des HANTS-FFT Algorithmus. Trends werden mit dem saisonalen MANN-KENDALL Test analysiert. Im Zeitraum 1982 - 2006 weisen 71,6% der AVHRR GIMMS Zeitreihen signifikante Trends ($\alpha=0.05$) auf, die jedoch durchgängig nur schwache Steigungen aufweisen. Es zeigt sich dabei eine Gliederung des Binnendeltas in Nord-Süd Richtung. Während im südlichen Teil alle Trends positive Anstiege aufweisen, verlaufen sie im nördlichen Teil überwiegend negativ. Die räumliche Verteilung der Vegetationstypen folgt ebenfalls dieser Gliederung.

1 Einleitung

Phänologische Parameter beschreiben den Verlauf pflanzenphysiologischer Entwicklungen nebst ihrer Korrelation mit Umweltfaktoren. Eine Analyse mehrjähriger Beobachtungen erlaubt Rückschlüsse auf Trends im Vegetationsverlauf und über die Korrelation mit klimatologischen Faktoren lassen sich sowohl Auswirkungen von Klimaveränderungen auf die Vegetation als auch Trends der (globalen) Temperaturverteilung ableiten. Für eine Übersicht zum Forschungsstand sei auf CLELAND et. al. 2007, DE JONG et. al. 2011, FISHER et. al. 2006, LIANG & SCHWARTZ 2009, WHITE et. al. 2009 sowie SCHWARTZ et. al. 2002 verwiesen.

Die bis in das frühe Mittelalter reichenden phänologischen in-situ Beobachtungen sind mangels räumlich ausgedehnter Datengrundlagen auf ihre jeweiligen Standorte beschränkt, was sich im Kontext regionaler und globaler Untersuchungen besonders nachteilig auswirkt, da die Mehrzahl der Beobachtungsreihen in den gemäßigten Klimazonen angesiedelt sind. Fernerkundliche Daten eröffnen hier weitreichende Möglichkeiten zur Parametrisierung entsprechender Modelle (FISHER et. al 2007).

Gegenstand dieser Arbeit ist die Modellierung der im Niger Binnendelta auftretenden Phänologien sowie die Ableitung linearer Trends aus AVHRR NDVI Zeitreihen von Apr. 1982 bis März 2006. Aus den variablen sahelischen Niederschlägen und den jährlich stark schwankenden Wassermengen der Nigerflut resultiert eine spatio-temporal hoch variable Vegetationsdichte. Dies erfordert eine Adaption der Standardalgorithmen zur Ableitung phänologischer Parameter. Der hier vorgestellte Ansatz basiert auf einem erweiterten HANTS-FFT Algorithmus (ROERINK et. al. 2000). Die Ableitung phänologischer Ereignisse zur Kategorisierung des Vegetationstyps nutzt die inflection point Methode nach ZHANG et. al. 2003.

1) Ralf Seiler, TU Dresden, Helmholtzstrasse 10-12, 01062 Dresden;
E-Mail: rseiler@rcs.urz.tu-dresden.de

2 Phänologische Parameter

2.1 land surface phenology - LSP

Da der Zusammenhang zwischen fernerkundlich gemessenen funktionalen Aspekten (Intensität der Photosynthese) und in-situ bestimmaren strukturellen Aspekten der Vegetationsdynamik (Knospung, Blüte, Fruchtreife etc.) nicht restlos geklärt ist (CLELAND et. al. 2007, FISHER et. al. 2006, LIANG & SCHWARTZ 2009) hat sich für die Ableitung phänologischer Parameter aus Fernerkundungsdaten der Begriff der land surface phenology (LSP) etabliert. Auf Grund ihrer geringen räumlichen Auflösung erfassen Fernerkundungsdaten Parameter der Landoberfläche und nicht von Einzelpflanzen, was den Bezug zu punktuellen terrestrischen Beobachtungen erschwert. Allerdings erlauben die flächenhaften Fernerkundungsdaten über die Modellierung der zeitlichen Skala hinaus auch eine Berücksichtigung der räumlichen Varianz. Nach LIANG & SCHWARTZ 2009 liefert die kombinierte raum - zeitlichen Analyse beider Datengrundlagen einen ganzheitlichen Ansatz zur Beschreibung der Phänologie einer Landschaft (*landscape phenology*).

Abb. 1: links - geographische Lage des Niger Binnendeltas innerhalb der Republik Mali, rechts: zeitlicher Verlauf der Nigerflut für ausgewählte hydrologische Stationen am Beispiel des Jahres 1992/93 (die Regenzeit ist blau hinterlegt) Die Flutwelle des Niger bewegt sich von SW nach NO.

2.2 Phänologien im Gebiet de Niger Binnendeltas

Mit seiner Lage zwischen 13.5° N - 17° N und 2.5° W - 5.5° W stellt die ca. 40.000 km² große Überflutungsebene des Niger Binnendeltas (Abb. 1) innerhalb ihrer semi - ariden Umgebung ein Gebiet mit herausgehobener Vegetationsdynamik dar. Da das Vorhandensein von oberflächlichem Wasser den entscheidenden Faktor für die Entwicklung der Vegetation darstellt, ist die LSP eng an Niederschlagsaufkommen und Wasserspenden des Flußsystems gekoppelt. Beide Angebote treten zeitlich versetzt auf, da sich die Flut aus den Niederschlägen der Guineaschwelle speist und deshalb erst nach der eigentlichen Regenzeit (Juli bis September) das Binnendelta erreicht (September im Süden, November im Norden).

Im Ergebnis existieren zwei verschiedene Vegetationstypen. Eine Phänologie wird durch die sommerlichen Niederschläge gesteuert, eine zweite durch die Nigerflut. Beide überlagern sich

teilweise, sodass es im Ergebnis zu den in Abb. 2 skizzierten Vegetationsmodi kommt.

2.3 Modellierung der Phänologie, Definition des Start-of-Season

Die jährliche Abfolge aus Wachsen, Reifen, Verwitterung und Vegetationsruhe modelliert das in Abb. 2 dargestellte Schema nach ZHANG et. al. 2003. Phänologische Ereignisse bezeichnen dabei Übergänge zwischen zwei Phasen. Im Kontext der LSP lassen sich derartige Ereignisse nicht an Hand struktureller Merkmale bestimmen. Sie müssen vielmehr aus den gemessenen spektralen Reflexionsgraden abgeleitet werden.

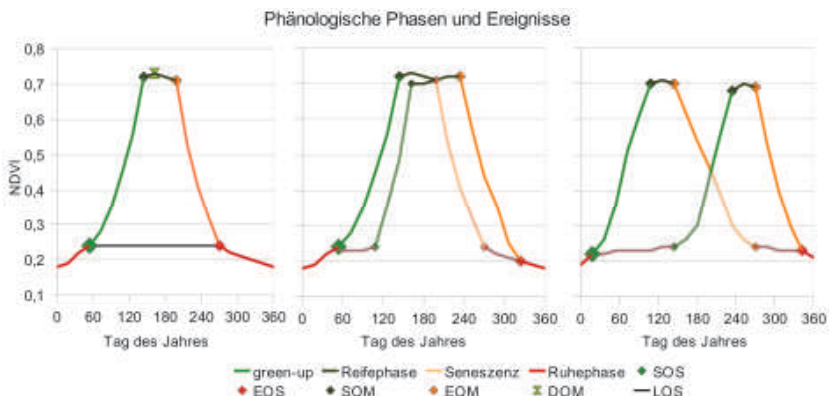


Abb. 2: links: monomodale Vegetation, mitte: verlängerte Vegetationsperiode, rechts: bimodale Vegetation mit zwei sich teilweise überlagernden Vegetationsperioden (adaptiert nach ZHANG et. al. 2003)

Ausgehend vom „Start of Season“ (SOS) sind die weiteren Ereignisse „End-of-Season“ (EOS), „Start / End-of-Maturity“ (SOM bzw. EOM) relativ zueinander definiert. Als EOS gilt jener Zeitpunkt, an dem das NDVI Signal den Wert des SOS erstmals wieder dauerhaft unterschreitet. Beginn und Ende der Reifephase sind durch einen Wechsel vom starken NDVI Anstieg des green-up zu einer Phase relativ konstant hoher Werte (SOM) bzw. durch den Beginn einer beschleunigten Reduktion der NDVI Werte (EOM) gekennzeichnet. Die zahlreichen, in der Literatur teilweise konträr diskutierten, Ansätze zur Festlegung des SOS (SCHWARTZ et. al. 2002, WHITE et. al. 2009, ZHANG et. al. 2003) lassen sich nach REED 2009 in drei Kategorien gliedern:

- schwelwertbasierte Verfahren (lokale und globale thresholds)
- phänologische Ereignisse als Wendepunkte in Modellierungsfunktionen
- Analysen der Modellierungsfunktion

Insbesondere die beiden letztgenannten Kategorien sind eng mit Glättungsfunktionen verknüpft. Eine umfangreiche Validierung verschiedenster Algorithmen zur Bestimmung des SOS findet sich in WHITE et. al. 2009. Gemäß dieser Studie liefert der HANTS-FFT Algorithmus (ROERINK et. al. 2000) die statistisch beste Übereinstimmung mit in-situ Werten der Pflanzenphänologie für unterschiedlichste nordamerikanische Ökosysteme.

3 Daten

Diese Arbeit nutzt den AVHRR GIMMS Datensatz, dessen 2-wöchige NDVI Zeitreihen als maximum value composite (MVC) der täglichen AVHRR Beobachtungen in 8 km Auflösung vorliegen (TUCKER et. al. 2005). Obwohl die MVC Technik keine atmosphärische Korrektur darstellt, können die so generierten Zeitreihen als (weitgehend) frei von Wolkenbedeckung, atmosphärischen Einflüssen, Trends infolge Satellitendrift oder Wechsel der Sensorplattformen betrachtet werden (KAUFMANN et. al. 2000). JONSSON & EKLUNDH 2002 bestätigen dies für die Sahelregion.

Ausschlaggebend für die Wahl des GIMMS Datensatzes war seine lange Beobachtungsdauer von Juli 1981 bis Dezember 2006. Die Nachteile der mäßigen räumlichen Auflösung mussten in den Hintergrund treten, da kein anderer Datensatz einen derart langen Zeitraum abdeckt. Dieser wurde auf 24 Jahre (April 1982 bis März 2006 = 576 Datenpunkte) begrenzt, um phänologische Abläufe jeweils in einer 12-monatigen Jahresreihe modellieren zu können.

Zur Abgrenzung der Regenphase wurden aus den UCAR (University Corporation for Atmospheric Research) Daten monatliche Niederschlagswerte für die Stationen Mopti und Tombouktou genutzt.

4 Methodik

Algorithmen zur Ableitung phänologischer Parameter umfassen allgemein folgende 3 Schritte:

- Glättung der Zeitreihe
- Modellierung der Phänologie (für den Abschnitt eines Jahres)
- Ableitung phänologischer Ereignisse (SOS, EOS) bzw. Analyse von Trends

Sofern die Zahl der Wachstumsphasen pro Kalenderjahr nicht a-priori bekannt ist, muss der Ansatz um eine Bestimmung der Anzahl an Vegetationsperioden erweitert werden.

Die Zeitreihen werden durch Anpassung einer Modellierungsfunktion M_F an die Messwerte geglättet. Da die Wahl der M_F gleichzeitig das Modell vom zeitlichen Verhalten der Vegetation beinhaltet, sind Glättung und Modellierung eng miteinander verknüpft. Zur Realisierung können sowohl lokal operierende Funktionen wie adaptive Savitzky-Golay Filter, asymmetrische Gaußsche Glockenkurven mit getrennter Parametrisierung für green-up und Seneszenz (JONSSON & EKLUNDH 2002) oder logistische Funktionen (ZHANG et. al. 2003) dienen.

Im globalen HANTS-FFT Ansatz unterstellen ROERINK et. al. 2000, das die Fourierkoeffizienten F_k für mean, jährliche und 6-monatige Komponente ($k = 0, 1, 2$ bei 1-jährigen Zeitreihen) den saisonalen Vegetationsverlauf beschreiben. In seiner ursprünglichen Form erlaubt dieser Ansatz damit keine Modellierung mehrerer Vegetationsperioden pro Jahr. Wie DE JONG et. a. 2011 durch Hinzunahme der 4-monatigen Komponente zeigen, ist er jedoch prinzipiell adaptierbar.

4.1 Konzeption der verwendeten Modellierungsfunktion – adaptiver HANTS-FFT

Angeht die komplexen raum-zeitlichen Beziehungen zwischen den Vegetationsmustern im Binnendelta sind die veröffentlichten M_F nicht ohne Anpassungen nutzbar. Einerseits erfordert der häufige Wechsel des Vegetationsmodus zwischen einzelnen Jahren sehr flexible M_F . Andererseits verhindert die zeitlich hoch variable Vegetationsentwicklung eine Verwendung

lokaler Funktionen, da die hier notwendig zu definierenden Bereichsgrenzen ebenfalls variabel sein müssten.

Der in dieser Arbeit verfolgte Ansatz flexibilisiert den HANTS-FFT Algorithmus als globale M_F durch Hinzunahme weiterer F_k . Der individuelle Anteil eines F_k zur Rekonstruktion der Zeitreihe entscheidet dann darüber, ob dieser F_k im Zuge der Modellierung erhalten bleibt. Hierfür werden zunächst die F_k gemäß ihrer Magnituden sortiert und anschließend mit der größten Magnitude beginnend, so viele F_k übernommen, wie zum Erhalt eines a-priori definierten Anteiles der originalen Information notwendig ist. Als Maß für die Bedeutung eines F_k wird seine Energie verwendet. Das die relevanten F_k mit dem Modus der Vegetation korrelieren, verdeutlicht Abb. 3. Durch diese adaptive Verwendung der einzelnen F_k wird eine optimierte Anpassung der M_F an die Messwerte bei gleichzeitig größtmöglichem Erhalt phänologischer Details erzielt.

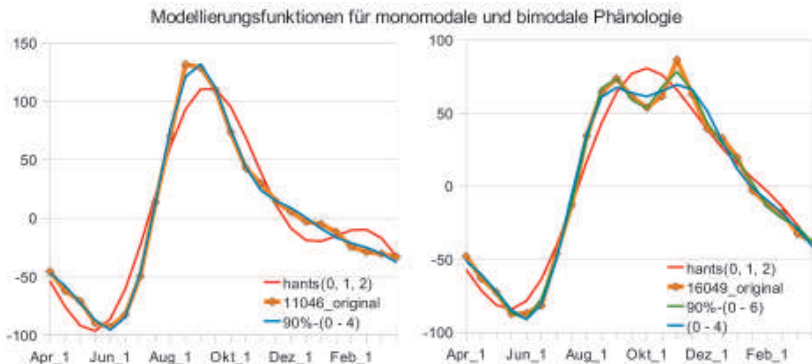


Abb. 3: Auswirkung der Anzahl verwendeter Fourierkoeffizienten auf die Glättung der originalen NDVI Reihe, links: monomodale Vegetation, rechts bimodale Vegetation, einjährige Zeitreihen, reduziert um das jährliche Mittel ($F_k[0] = 0$). Rechts ist zu Vergleichszwecken die Glättung mit den F_k 0 bis 4 eingetragen.

4.2 Ableiten des Vegetationsmodus

Die Bestimmung des Vegetationstyps (modal oder bimodal) basiert auf der Zählung von Wendepunkten in der M_F . Nach ZHANG et. al. 2003 weisen derartige Punkte lokale Extrema in der 1. Ableitung der nach Gl. (1) berechneten Krümmungsfunktion κ auf, weil an diesen Stellen die M_F rasch von einem quasi-linearen Abschnitt in einen anderen übergeht.

$$\kappa(x) \equiv \frac{d^2 f(x) / dx^2}{\left[\left(\frac{df(x) / dx}{dx} \right)^2 \right]^{3/2}} \quad (1)$$

$$d\kappa / dx = \frac{\left[\frac{d^3 f(x) / dx^3}{dx} \right] \left[\frac{3 \left(\frac{df(x) / dx}{dx} \right) \left[\frac{d^2 f(x) / dx^2}{dx} \right]^2}{\left[\left(\frac{df(x) / dx}{dx} \right)^2 \right]^{5/2}} \right]}{\left[\left(\frac{df(x) / dx}{dx} \right)^2 \right]^{3/2}}$$

Ein Übergang in ansteigende NDVI Werte ist durch den Wechsel zu negativen ($d\kappa / dx$)-Werten

gekennzeichnet, beim Übergang in fallende NDVI Werte verläuft der Wechsel hingegen von negativen zu positiven ($d\kappa/dx$)-Werten. Für die unterschiedlichen Modi aus Abb. 3 ist dies exemplarisch in Abb. 4 dargestellt.

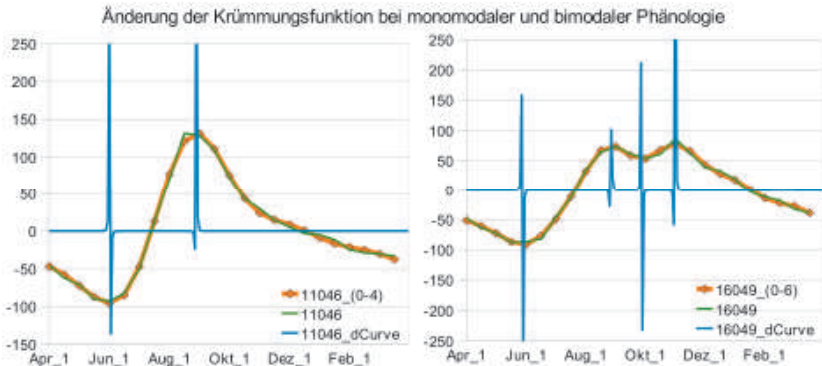


Abb. 4: Änderungsverhalten der Krümmung für die Modellierungsfunktionen monomodaler (links) und bimodaler (rechts) Vegetation.

4.3 Analyse linearer Trends

Es wird implizit unterstellt, dass auftretende Trends ihren Anstieg über den gesamten 24 jährigen Zeitraum behalten. Die saisonalen Muster der NDVI Zeitreihen verhindern eine unmittelbare Anwendung linearer Regressionsmodelle, da die hierfür zentrale Annahme unabhängiger NDVI Werte nicht gegeben ist. Deshalb kommt der nicht-parametrische saisonale Mann-Kendall Trend Test (sMK) zum Einsatz, der in der Literatur vielfach für die Auswertung saisonaler Daten angewandt worden ist. Für Beispiele sei auf DE JONG et. a. 2011 und die dort angegebene Literatur verwiesen. Dabei werden die Testgröße Kendall - Score (S) und ihre Varianz (var) zunächst für alle Saisons separat berechnet und anschließend aufsummiert. Die Anzahl der Saisons entspricht dabei der Zahl jährlicher Beobachtungen. In Gl. (2) gilt $p = 24$ für die Saisons und $n = 24$ für die Beobachtungen je Saison. Letzteres entspricht der Spanne jeder Zeitreihe in Jahren, da die Daten lückenlos sind.

$$S = \sum_{i=1}^p S_i ; S_i = \sum_{k < h} \text{sgn} [NDVI_h - NDVI_k] \quad (2)$$

$$\text{mit } \text{sgn} [NDVI] \equiv \begin{cases} 1; \Delta > 0 \\ 0; \Delta = 0 \\ -1; \Delta < 0 \end{cases}$$

$$Z = \begin{cases} \frac{S - 1}{\sqrt{\text{var}}} ; S > 0 \\ 0 ; S = 0 \\ \frac{S + 1}{\sqrt{\text{var}}} ; S < 0 \end{cases} \text{ mit } \text{var} = \sum_{i=1}^p \frac{\frac{n_i}{4} \frac{n_i - 1}{4} - 1}{18} \quad (3)$$

Die Nullhypothese H_0 lautet auf zufällig angeordnete Beobachtungen in jeder der p Saisons ($\text{mean}(S_i) = 0$). Die sich daraus ableitende Alternativhypothese H_A : „es existiert in mindestens einer Saison ein monotoner Trend“ wird akzeptiert, sofern die Statistik Z (Gl. (3)) in einem 2-seitigen Test als signifikant von 0 ($\alpha = 0,05$) verschieden angesehen werden kann. Für eine ausführliche Beschreibung der Teststrategie sei auf MANN 1945 sowie HELSEL & HIRSCH 2002 verwiesen. Abschließend ist der Anstieg eines Trends mit dem Kendall - Theil slope Schätzer nach HELSEL & HIRSCH 2002 als dem Median aller Anstiege zwischen den Wertepaaren innerhalb einer Saison berechnet worden.

5 Diskussion der Ergebnisse

5.1 Glättung der GIMMS Zeitreihen und Modellierung der Phänologie

Hierzu sind die AVHRR GIMMS Zeitreihen jeweils in 24 einjährige Teilreihen gesplittet und anschließend separat modelliert worden. In allen GIMMS Reihen ist die jährliche Komponente ($F_k=1$) nahezu durchgängig bedeutsam (siehe Tab. 1). Nur bei 18,8% kommt es in einzelnen Jahren zur Elimination. Die im originalen HANTS-FFT Algorithmus ebenfalls berücksichtigte 6-monatige F_k ist vergleichbar relevant, jedoch mit leicht höheren „Eliminationsraten“. Sie bleibt nur in 25% aller GIMMS Reihen in jedem der 24 Jahre erhalten.

Tab. 1: Häufigkeit, mit der ein F_k bei der Glättung einer AVHRR GIMMS Reihe signifikant ist. Der Wert 14,5% für den 12-monats Koeffizienten für $h = 23$ bedeutet dabei: Für 14,5% aller GIMMS Reihen ist die jährliche Komponente in 23 von 24 Jahren bei der Glättung als bedeutsam erhalten geblieben. Umgekehrt wird diese Komponente in einem von 24 Jahren nicht benötigt.

F(k)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Periode [Monate]	12	6	4	3	12/5	2	12/7	3/2	4/3	6/5	12/11	1
h												
0	0,0%	0,0%	0,0%	1,7%	1,2%	4,9%	19,8%	22,6%	25,0%	31,0%	53,9%	98,6%
1	0,0%	0,0%	0,3%	3,9%	4,6%	9,8%	20,3%	23,8%	27,3%	27,6%	25,7%	1,3%
2-8	0,0%	0,2%	5,5%	30,2%	56,5%	70,2%	56,7%	51,5%	46,6%	41,2%	20,1%	0,1%
9-15	0,0%	3,2%	24,7%	48,8%	36,2%	15,1%	3,2%	2,2%	1,1%	0,2%	0,2%	0,0%
16-22	4,3%	44,0%	64,2%	15,5%	1,5%	0,1%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
23	14,5%	27,3%	4,2%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
24	81,2%	25,3%	1,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%

Umgekehrt ist die hochfrequente 1-monatige Komponente für 98,6% aller Reihen irrelevant und für die verbleibenden Reihen nur in einem der 24 Jahre. Auch die höherfrequenten F_k mit Perioden von 12/7 bis 12/11 Monaten sind bei der Glättung nur vereinzelt erhalten geblieben. Weniger eindeutig ist die Situation bei den F_k mit Perioden zwischen 4 und 2 Monaten. Hier treten innerhalb einer GIMMS Reihe gleichmäßig niedrige relative Häufigkeiten über eine weite Spanne jeweils relevanter Jahre auf. Die 4 monatige F_k ist dabei eher ortstabil, da sie im Falle einer Relevanz mit hohen Werten bei der Anzahl relevanter Jahre auftritt (überwiegend 16 bis 22 von 24 Jahren). Die 2 monatige Komponente tritt hingegen sporadisch, mit leichter Häufung zwischen 2 bis 8 von 24 Jahren, auf.

Diese heterogene Situation zeigt die hohe Variabilität der Phänologie im Niger Binnendelta. Weder lässt sich in jedem Fall für einen konkreten Oberflächenausschnitt (= eine spezifische

GIMMS Reihe) über den gesamten 24 jährigen Zeitraum ein eindeutiges setting der jährlich relevanten F_k angeben, noch gilt dies für mehrere Zeitreihen innerhalb eines konkreten Jahres. Fazit: Für eine Modellierung der (durchschnittlichen) Vegetationsdynamik sind die F_k 1 bis 3 (12, 6 und 4 monatige Perioden) ausreichend. Zur Untersuchung interannueller Trends sollten auch die F_k mit 3, 12/5 und 2 monatiger Periode Berücksichtigung finden.

5.2 Abschätzen des überfluteten Bereiches

Von den in 4.2 beschriebenen Vegetationsmodi ist die monomodale Vegetation charakteristisch für nicht überflutete Gebiete. Darauf basiert eine Abschätzung des jährlich überfluteten Gebietes. Beispielhaft sind die Ergebnisse für ein trockenes und ein feuchtes Jahr in Abb. 5 dargestellt. Vor allem in feuchten Jahren zeigt sich eine ausgeprägte Nord - Süd Teilung. Dann bewirkt das hohe Wasserangebot nach der eigentlichen Regenzeit im Norden eine 2. Vegetationsperiode. Das zeitigere Eintreffen der Flut im Süden führt dort und entlang der Flussläufe zu einer verlängerten Vegetationsphase. In trockenen Jahren ist nicht nur insgesamt weniger Wasser verfügbar, die Flutwelle ebbt auch deutlich eher ab, so dass es im nördlichen Teil maximal zu einer verlängerten Vegetationsphase kommt.

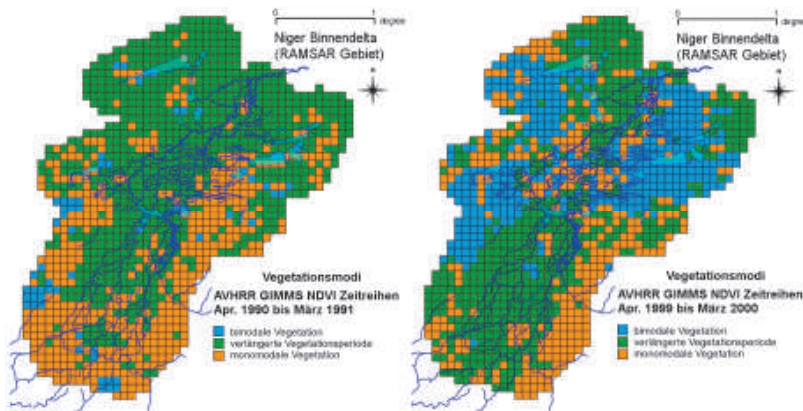


Abb. 5: räumliche Verteilung der Vegetationsmodi im Binnendelta für ein Jahr geringer Flut (links) und ein Jahr stärkerer Flut (rechts)

5.3 Trends in der Vegetationsdynamik

Das Gebiet des Niger Binnendeltas erstreckt sich über 1298 GIMMS Reihen, von denen nach Tab. 2 ca. 45% positive Trends und lediglich knapp 26% negative Trends aufweisen. Insgesamt verfügen die als signifikant ermittelten monotonen Trends nur über geringe Anstiege (78% aller Trends weniger als 1,5‰ NDVI / Jahr).

Die Auswertung der sMK Trends zeigt ebenfalls die Nord-Süd Gliederung des Niger Binnendeltas. Während in der nördlichen Hälfte ein Rückgang der Vegetation zu verzeichnen ist, liefert die Analyse für den südlichen Teil ausschließlich positive Trends. Berücksichtigt man,

dass der Beginn des untersuchten Zeitraumes mit der schweren Dürre 1982/84 zusammenfällt, zeigen die Ergebnisse eine Erholung der Vegetation von dieser dürrbedingt niedrigen Ausgangssituation lediglich für den südlichen Bereich.

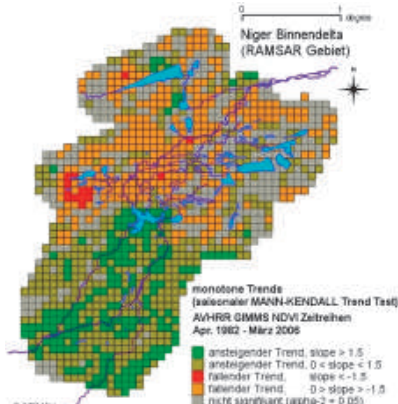


Abb. 6: monotone Trends für den Zeitraum Apr. 1982 bis März 2006

Tab. 2: Häufigkeit monotoner Trends in den NDVI Zeitreihen für den Zeitraum Apr. 1982 bis März 2006

	Anzahl	rel. Häufigkeit
ansteigend, slope > 1,5	195	15,02%
ansteigend, 0 < slope ≤ 1,5	395	30,43%
fallend, slope < -1,5	14	1,08%
fallend, 0 > slope ≥ -1,5	321	24,73%
nicht-signifikant	373	28,74%

6 Literaturverzeichnis

- CLELAND, E. E., CHUINE, I., MENZEL, A., MOONEY, H. A. & SCHWARTZ, M. D., 2007: Shifting plant phenology in response to global change. *Trends in Ecology and Evolution*, **22** (7), S. 357-365.
- DE JONG, R., DE BRUIN, S., DE WIT, A., SCHAEPMAN, M. E. & DENT, D. L., 2011: Analysis of monotonic greening and browning trends from global NDVI time-series. *Remote Sensing of Environment*, **115** (2), S. 692-702.
- FISHER, J. I., MUSTARD, J. F. & VADEBONCOEUR, M. A., 2006: Green leaf phenology at Landsat resolution: Scaling from the field to the satellite. *Remote Sensing of Environment*, **100** (2), S. 265-279.
- FISHER, J. I., RICHARDSON, A. D. & MUSTARD, J. F., 2007: Phenology model from surface meteorology does not capture satellite-based greenup estimations. *Global Change Biology*, **13** (3), S. 707-721
- HELSEL, D. R. & HIRSCH, R. M., 2002: *Statistical Methods in Water Resources*. Techniques of Water Resources Investigations, Book 4, chapt. A3, U. S. Geological Survey, 522 pages.
- JONSSON, P. & EKLUNDH, L., 2002: Seasonality extraction by function fitting to time-series of satellite sensor data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **40** (8), S. 1824-1832.
- KAUFMANN, R. K., ZHOU, L., KNYAZIKHIN, Y., SHABANOV, V., MYNENI, R. B. & TUCKER, C. J., 2000: Effect of orbital drift and sensor changes on the time series of AVHRR vegetation index data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **38** (6), S. 2584-2597.
- Liang, L. & Schwartz, M. D., 2009: Landscape ecology: an integrative approach to seasonal

- vegetation dynamics. *Landscape Ecology*, **24** (4), S. 465-472.
- MANN, H. B., 1945: Nonparametric Tests Against Trend. *Econometrica*, **13** (3), S. 245-259.
- REED, B., 2009: Remote Sensing Phenology.
http://www.usanpn.org/files/shared/files/pw_rsensing_reed.pdf
- ROERINK, G. J., MENENTI, M. & VERHOEF, W., 2000: Reconstructing cloud-free NDVI composites using Fourier analysis of time series. *International Journal of Remote Sensing*, **21** (9), S. 1911-1917.
- SCHWARTZ, M. D., REED, B. C. & WHITE, M. A., 2002: Assessing satellite-derived start-of-season (SOS) measures in the conterminous USA. *International Journal of Climatology*, **22** (14), S. 1793-1805.
- TUCKER, C. J., PINZON, J. E., BROWN, M. E., SLAYBACK, D., PAK, E. W., MAHONEY, R., VERMOTE, E. & SALEOUS, N., 2005: An Extended AVHRR 8-km NDVI Data Set Compatible with MODIS and SPOT Vegetation NDVI Data. *International Journal of Remote Sensing*, **26** (20), S. 4485 – 4498.
- WHITE, M. A., DE BEURS, K. M., DIDAN, K., INOUE, D. W., RICHARDSON, A. D., JENSEN, O. P., O'KEEFE, J., ZHANG, G., NEMANI, R. R., VAN LEEUWEN, W. J. D., BROWN, J. F., DE WIT, A., SCHAEPMAN, M. E., LIN, X., DETTINGER, M., BAILEY, A. S., KIMBALL, J., SCHWARTZ, M. D., BALDOCCHI, D. D., LEE, J. T. & LAUENROTH, W. K., 2009: Intercomparison, interpretation and assessment of spring phenology in North America estimated from remote sensing for 1982-2006. *Global Change Biology*, **15** (10), S. 2335-2359.
- ZHANG, X., FRIEDL, M. A., SCHAAF, C. B., STRAHLER, A. H., HODGES, J. C. F., GAO, F., REED, B. C. & HUETE, A., 2003: Monitoring vegetation phenology using MODIS. *Remote Sensing of Environment*, **84** (3), S. 471-475.

Schätzung von forstlichen Kenngrößen auf der Grundlage von Punktwolken aus digitaler Photogrammetrie und flugzeuggetragener Laserscannermessung

CHRISTOPH STRAUB¹ & RUDOLF SEITZ²

Zusammenfassung: Diese Studie zeigt Möglichkeiten zur Schätzung der Oberhöhe von Waldbeständen und des Holzvorrats pro Hektar unter Einsatz von amtlichen Stereo-Luftbildern und flugzeuggetragenen Laserscannerdaten. Die Untersuchung wurde in einer sehr strukturreichen Waldfläche durchgeführt. Über Image-Matching konnte aus den Stereo-Luftbildern eine dichte photogrammetrische Punktwolke berechnet werden. Anschließend wurden die photogrammetrischen Höhenmessungen sowie die First-Echo-Laserpunkte mit einem Geländemodell aus Last-Echo-Laserpunkten normalisiert. Über lineare Regressionen wurden Zusammenhänge zwischen abgeleiteten Metriken aus den normalisierten Punktwolken mit terrestrischen Messungen an 225 Stichprobenpunkten einer Forstbetriebsinventur untersucht. Die Ergebnisse dieser Studie zeigen, dass photogrammetrische Punktwolken genauso wie Laser-Punktwolken zur Schätzung forstlicher Kenngrößen verwendet werden können. Mit den Laserpunkten wurden allerdings etwas geringere Schätzfehler erzielt.

1 Einleitung

In zahlreichen Studien konnte die Eignung von flugzeuggetragenen Laserscannerdaten zur Schätzung von forstlichen Kenngrößen aufgezeigt werden. Eine zusammenfassende Darstellung zum Einsatz der Laserscannermessung für Forstinventuren findet sich in HYYPPÄ et al. (2009). Hierbei wurden sowohl Verfahren zur Erfassung von Einzelbaummerkmalen als auch zur Schätzung von Bestandeskenngrößen wie Holzvorrat, Grundfläche oder Stammzahl pro Hektar entwickelt. Zur Schätzung von Bestandeskennwerten wurden häufig Regressionsanalysen eingesetzt (z.B. MEANS et al. 2000, NÆSSET 2002 oder HOLLAUS et al. 2007) oder nichtparametrische Verfahren wie k -NN (k -nearest neighbor) bzw. k -MSN (k -most similar neighbor) (z.B. NOTHDURFT et al. 2009 oder PACKALÉN & MALTAMO 2006). Ein zweiphasiges Verfahren zur Schätzung von Bestandesattributen in borealen Wäldern, unter Verwendung von Laserscannerdaten und georeferenzierten Stichprobenpunkten einer Forstinventur, wurde von NÆSSET (2002) vorgeschlagen: Über Regressionsanalysen werden in der ersten Phase Beziehungen zwischen mehreren Höhen- und Dichtemetriken aus der Lasermessung und den im Feld gemessenen forstlichen Kenngrößen an den Stichprobenpunkten untersucht, um geeignete Modelle zu entwickeln. In der zweiten Phase werden die Modelle genutzt, um Schätzungen für die gesamte Waldfläche und einzelne Waldbestände durchzuführen. In Norwegen wurde diese

- 1) Dr. Christoph Straub, Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF),
Abt. 1 Informationstechnologie, Hans-Carl-von-Carlowitz-Platz 1, D-85354 Freising,
Email: Christoph.Straub@lwf.bayern.de
- 2) Rudolf Seitz, Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF),
Abt. 1 Informationstechnologie, Hans-Carl-von-Carlowitz-Platz 1, D-85354 Freising,
Email: Rudolf.Seitz@lwf.bayern.de

Vorgehensweise bereits operational bei Forstinventuren angewendet (NÆSSET 2004 und NÆSSET 2007).

Amtliche Laserdaten werden allerdings von den Vermessungsverwaltungen in Deutschland (und auch in anderen europäischen Ländern) nicht regelmäßig aktualisiert, wohingegen Stereo-Luftbilder über einen regelmäßigen Befliegungszyklus erneuert werden. Aus diesem Grund untersuchen derzeit einige Forschergruppen den Einsatz von Stereo-Luftbildern für forstliche Anwendungen als mögliche Alternative zur Lasermessung. Der aktuelle Stand der Arbeiten ist in BREIDENBACH & ASTRUP (2011) dargestellt. In mehreren Studien (z.B. STRAUB & SEITZ (2011), BALTSAVIAS et al. (2008), WASER et al. (2008) und OFNER et al. (2006)) konnte bereits die Eignung von digitalen stereoskopischen Luftbildern bzw. automatisierten Image-Matching-Techniken zur Generierung von hochaufgelösten Oberflächenmodellen in Waldgebieten aufgezeigt werden. Durch die Normalisierung mit einem Laser-Geländemodell können aus den photogrammetrischen Oberflächenmodellen hochaufgelöste Vegetationshöhenmodelle abgeleitet werden. Auf der Grundlage eines photogrammetrischen Vegetationshöhenmodells konnte in STRAUB & SEITZ (2012) ein erster Ansatz zur Schätzung von forstlichen Kenngrößen entwickelt werden. Aufbauend auf diesen Ergebnissen befasst sich nun die vorliegende Studie mit der Schätzung von forstlichen Kenngrößen auf der Grundlage von Punktwolken aus digitaler Photogrammetrie und flugzeuggetragener Laserscannermessung. Hierbei wurde unter anderem untersucht, ob mit Punktwolken geringere Schätzfehler erzielt werden können, als bei der Verwendung von Höhenmodellen.

1.1 Untersuchungsgebiet

Als Untersuchungsgebiet wurde der Stadtwald Traunstein ausgewählt. Die Versuchsfläche ist durch sehr strukturreiche Waldbestände gekennzeichnet. Die häufigsten Baumarten sind: Fichte (49%), Buche (21%), Tanne (15%), Esche (5%) und Bergahorn (4%). Das Gelände ist durch Höhenunterschiede zwischen 570 bis 710 Meter ü. NN und einer mittleren Hangneigung von ~20% gekennzeichnet.

1.2 Fernerkundungsdaten

Vom Landesamt für Vermessung und Geoinformation (LVG) Bayern wurden digitale Stereo-Luftbilder mit 4 Farbkanälen und einer Bodenauflösung von 20 cm zur Verfügung gestellt. Die Längs- und Querüberdeckung der Bilder beträgt 65% bzw. 30%. Die Befliegung wurde Ende April 2009 mit einer UltraCamX durchgeführt. Das Untersuchungsgebiet wird von insgesamt 30 Stereo-Luftbildern abgedeckt. Außerdem wurden vom LVG flugzeuggetragene Laserscannerdaten mit einer Punktdichte von 5-6 Punkten / m² bereitgestellt. Die Lasermessung erfolgte im Frühjahr 2010.

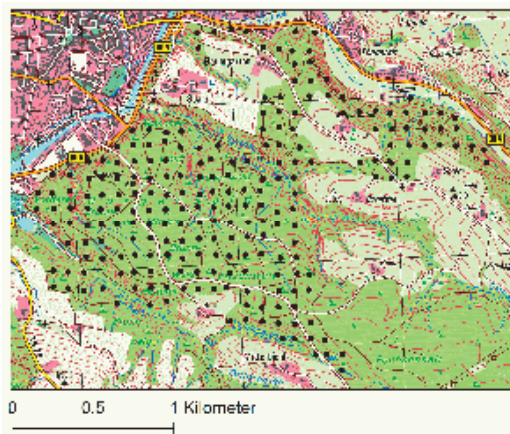
1.3 Referenzdaten

Vom Lehrstuhl Waldwachstumskunde der TU München wurden 228 Stichprobenpunkte der Forstbetriebsinventur aus dem Jahre 2008 zur Verfügung gestellt. Wie Abbildung 1 zeigt, wurden die Inventurpunkte mit einem systematischen 100 × 100 m Abstand über die Waldfläche verteilt. Die Stichprobenpositionen wurden im Feld mit einem GPS aufgesucht. An jedem Inventurpunkt erfolgte die Messung von Einzelbäumen in konzentrischen Probekreisen. Die

Aufnahmemethodik ist in STMELF (1982) beschrieben. Der größte konzentrische Kreis, der als Bezugsfläche für die Auswertungen in dieser Studie verwendet wurde, hat einen Radius von 12,62 Meter bzw. eine Flächengröße von 500 m².

Auf Grundlage der Einzelbauminformationen konnte an jedem Stichprobenpunkt eine Bestandesoberhöhe OH [m] sowie das gesamte Holzvolumen in Erntefestmeter pro Hektar V [m³/ha] modelliert werden. Aufgrund der zeitlichen Differenz zwischen den terrestrischen Messungen der Forstinventur und der Aufnahme der Fernerkundungsdaten, wurde an drei Inventurpunkten eine deutliche Veränderung in der Waldstruktur (z.B. durch Holzernte oder Sturmwurf) festgestellt. Diese Punkte wurden deshalb aus dem Datensatz entfernt. Bezogen auf die Baumartenzusammensetzung, Bestandessichtung (z.B. ungeschichtet, mit Unterstand oder mit Überhältern) sowie die Altersklasse decken die Inventurpunkte ein breites Spektrum unterschiedlicher Waldstrukturen ab. Tabelle 1 veranschaulicht die hohe Variabilität der Kenngrößen OH und V im Untersuchungsgebiet.

Abb. 1: Topographische Karte vom Untersuchungsgebiet Traunstein mit den Positionen der Stichprobenkreise (schwarze Punkte) der Forstinventur



Tab. 1: Variabilität der Kenngrößen OH und V im Untersuchungsgebiet Traunstein (berechnet mit 225 Stichprobenpunkten der Forstinventur)

Kenngröße	Mittelwert	Standardabweichung	Min	Max
Bestandesoberhöhe OH [m]	27,23	10,20	1,50	42,30
Holzvolumen V [m ³ /ha]	321,99	225,60	0,00	968,40

2 Methodik

Über ein Image-Matching-Verfahren konnte eine dichte photogrammetrische Punktwolke (der Baumkronenoberfläche) aus den Stereo-Luftbildern berechnet werden. Hierfür wurde die Software LPS eATE – Version 11.0.3 (ERDAS 2011) mit einem Algorithmus zur Generierung von dichten Punktwolken aus Stereobildern verwendet. Hierbei wurden die folgenden bedeutenden Merkmale und Einstellungen zur Berechnung der photogrammetrischen Punkte ausgewählt:

- Die Messung der Ähnlichkeit von Punkten in den Bildern erfolgte über normalisierte Kreuzkorrelation (normalized cross correlation)
- Sowohl zwei als auch drei Bilder („pairwise matching“ und „triplet matching“) wurden zur Berechnung der Punktwolke genutzt
- Mehrstufige Verarbeitung über Bildpyramiden (Prozessierung vom Groben zum Feinen)
- Verwendung von Näherungsdaten aus einem globalen Höhenmodell
- Qualitätskontrolle über “reverse matching”
- Multi-core Prozessierung zur Beschleunigung der Berechnungen

Im Anschluss wurden die photogrammetrischen Punkte sowie die First-Echo-Laserpunkte mit einem Geländemodell aus Last-Echo-Laserdaten normalisiert. Abbildung 2a) zeigt beispielhaft eine 3D Ansicht der normalisierten photogrammetrischen Messungen an einem Inventurpunkt in Traunstein. In Abbildung 2b) sind die First-Echo-Laserpunkte dargestellt.

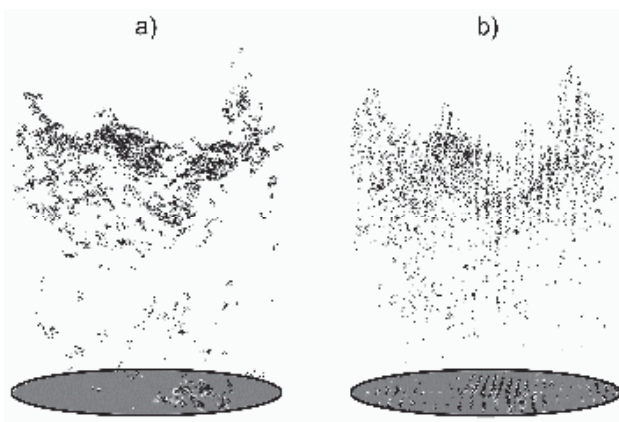


Abb. 2: Zugeschnittene Punkte an einem Inventurpunkt in Traunstein: a) normalisierte photogrammetrische Höhenmessungen und b) normalisierte First-Echo-Laserpunkte

Zur Charakterisierung der Vegetationshöhen, an jedem kreisförmigen Inventurpunkt, wurden (in Anlehnung an Studien mit Laserdaten z.B. MALTAMO et al. (2006) oder NÆSSET (2002)) mehrere Lagemaße der Höhenverteilung bzw. die Quantilen h_{10} , h_{20} , ..., h_{90} und der Maximalwert h_{max}

sowie der Mittelwert h_m berechnet. Außerdem wurde ein Maß für den Überschirmungsgrad \bar{UG} über das Verhältnis von klassifizierten „Vegetationspunkten“ zur Gesamtanzahl der Höhenmessungen am jeweiligen Inventurpunkt hergeleitet. Die Erfassung von potentiellen Vegetationspunkten erfolgte ebenfalls in Anlehnung an MALTAMO et al. (2006) und NÆSSET (2002) über einen Höhengrenzwert von 2 Meter. Zur Charakterisierung der Oberflächenrauigkeit wurde zusätzlich der Variationskoeffizient h_{vk} der Höhenmessungen bestimmt.

Zur Beurteilung des Zusammenhangs zwischen den terrestrisch gemessenen forstlichen Kenngrößen OH und V mit den fernerkundlichen Variablen aus den Punktwolken wurden lineare Regressionen mit schrittweiser Variablenauswahl verwendet. Die Beurteilung der Modellgüte erfolgte über den (multiplen) Korrelationskoeffizient R bzw. das Bestimmtheitsmaß R^2 sowie über den absoluten $RMSE$ und $Bias$, welche über eine Leave-One-Out-Kreuzvalidierung berechnet wurden.

3 Ergebnisse

In Tabelle 2 sind die Ergebnisse der Regressionsanalyse für die Schätzung der Oberhöhe auf Grundlage von normalisierten Laser- und Luftbild-Punktwolken dargestellt. Tabelle 3 zeigt das Ergebnis für die Schätzung des Holzvorrats. Aufgelistet ist die verwendete Datengrundlage, das Regressionsmodell (mit der Reihenfolge der jeweils selektierten Variablen) sowie R , R^2 , $RMSE$ und $Bias$.

Tab. 2: Schätzung der Bestandesoberhöhe OH auf Grundlage von Variablen aus normalisierten Laser- und Luftbild-Punktwolken

Datengrundlage	Modell	R	R^2	$RMSE$ [m]	$Bias$ [m]
Laser-Punktwolke	$0,601h_{max} + 0,432h_{90} - 0,353$	0,91	0,82	4,46	0,007
Luftbild-Punktwolke	$7,044 + 0,445h_{90} + 0,319h_{max}$	0,83	0,69	5,82	-0,008

Tab. 3: Schätzung des Holzvorrats V auf Grundlage von Variablen aus normalisierten Laser- und Luftbild-Punktwolken

Datengrundlage	Modell	R	R^2	$RMSE$ [m³/ha]	$Bias$ [m³/ha]
Laser-Punktwolke	$28,849h_m - 6,063h_{10} - 1,399\bar{UG} + 2,704h_{max} - 40,788$	0,86	0,74	118,56	0,253
Luftbild-Punktwolke	$13,227h_{90} + 5,850h_{30} - 0,823\bar{UG} + 6,175$	0,82	0,67	132,14	0,005

4 Diskussion

Sowohl bei Verwendung der Luftbild- als auch beim Einsatz der Laser-Variablen konnten geeignete Modelle zur Schätzung der Oberhöhe von Waldbeständen und des Holzvorrats pro Hektar hergeleitet werden. Hierbei wurden mit der Laser-Punktwolke geringere Schätzfehler erzielt. Wie der Vergleich mit Tabelle 1 verdeutlicht, ist der Schätzfehler ($RMSE$) der Modelle zur Vorhersage von OH und V für beide Fernerkundungsdatensätze deutlich geringer als die Standardabweichung der Feldmessungen an den Stichprobenpunkten. Dadurch sind beide Datensätze zur flächendeckenden Schätzung forstlicher Kenngrößen bzw. zur Regionalisierung von Forstinventuren geeignet.

Höhenbezogene Variablen sind die wichtigsten Prädiktoren zur Schätzung von OH und V . Die Variable \bar{UG} konnte jedoch in beiden Fällen die Schätzung des Holzvorrats leicht verbessern. Die Variable h_{vk} (als Maß für die Oberflächenrauigkeit) wurde dagegen nicht in die Modelle aufgenommen.

Der Vergleich mit den Ergebnissen in STRAUB & SEITZ (2012) zeigt, dass im Stadtwald Traunstein mit den Punktwolken ein etwas geringerer $RMSE$ zur Vorhersage des Holzvorrats erzielt werden kann, als bei Verwendung von Vegetationshöhenmodellen. Dies liegt möglicherweise daran, dass sich mit Punktwolken die Dichte der Vegetation bzw. die Überschirmung besser charakterisieren lässt. Diese Vermutung muss jedoch in weiteren Versuchsflächen überprüft werden. Zur Bestimmung der Oberhöhe sind die Höhenmodelle besser geeignet. Grundsätzlich hat die Verwendung eines Höhenmodells mit regelmäßig angeordneten Stützpunkten den entscheidenden Vorteil, dass sich dieses effizienter abspeichern und verarbeiten lässt, was insbesondere bei der Prozessierung von großen Waldflächen von Bedeutung ist.

Verglichen mit Laserpunkten sind photogrammetrische Messungen im Waldgebiet häufig deutlich inhomogener verteilt. Bei guter Beleuchtung und ausreichender Textur werden in der Regel viele Punkte über das Image-Matching gemessen. Aufgrund von Schatten oder Verdeckungen werden allerdings stellenweise keine Höhenmessungen generiert. In diesen Bereichen ist die Lasermessung der Photogrammetrie überlegen.

Die vorliegende Untersuchung wurde in einer sehr strukturreichen Waldfläche durchgeführt. In Wäldern mit geringerer Baumartenmischung und vertikaler Gliederung kann davon ausgegangen werden, dass die Schätzfehler der Regressionsmodelle niedriger ausfallen. Bei homogeneren Waldverhältnissen würde sich u.a. bei der Koregistrierung von Fernerkundungsdaten mit den Feldmessungen der Lagefehler der Inventurpunkte weniger stark auswirken.

5 Schlussfolgerung und Ausblick

Die Ergebnisse dieser Studie zeigen, dass Punktwolken aus digitaler Photogrammetrie in derselben Weise wie Laser-Punktwolken zur Schätzung forstlicher Kenngrößen bzw. zur Regionalisierung von Forstinventuren eingesetzt werden können.

In Bayern werden amtliche Stereo-Luftbilder vom Landesamt für Vermessung und Geoinformation (LVG) in einem dreijährigen Befliegungszyklus aktualisiert, wohingegen eine flächendeckende Aktualisierung der amtlichen Laserdaten gegenwärtig nicht geplant ist. Über eine Ressortvereinbarung stehen die Bilder der Bayerischen Forstverwaltung zuverlässig zur Verfügung und sind dadurch eine nachhaltige Datenquelle für viele forstliche Anwendungen.

Durch die Verknüpfung von amtlichen Stereo-Luftbildern mit forstlichen Inventurdaten könnten in Zukunft flächendeckende Aussagen zu forstlichen Kenngrößen ermöglicht werden, welche derzeit in der forstlichen Praxis häufig fehlen. Flächendeckende Informationen mit hoher räumlicher Auflösung wären sowohl für die einzelbestandsweise Planung als auch für forstliche Beratungsaufgaben von entscheidendem Vorteil.

In zukünftigen Arbeiten wird eine Verbesserung der Modelle durch die zusätzliche Verwendung der spektralen Information der Luftbilder in den Regressionen angestrebt. Denkbar wäre auch eine Klassifizierung der Waldfläche in Baumarten bzw. Baumartengruppen, um für die einzelnen

Klassen unterschiedliche Modelle zu entwickeln. Außerdem werden alternative Schätzmethoden wie z.B. *k*-NN getestet.

6 Literaturverzeichnis

- BREIDENBACH, J. & ASTRUP, R., 2011: Creation of digital elevation models from aerial images for forest monitoring purposes. Report from Skog og landskap, Ås, Norway.
- BALTSAVIJS, 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), S. 1243-1259.
- ERDAS, 2011: LPS 2011 Product Description. Online (17.01.2012): <http://www.erdas.com/products/LPS/LPSeATE/ProductLiterature.aspx>
- HOLLAUS, M., WAGNER, W., MAIER, B. & SCHADAUER, K., 2007: Airborne laser scanning of forest stem volume in a mountainous environment. *Sensors*, **7**, S. 1559-1577.
- HYYPÄ, J., HYYPÄ, H., XIAOWEI, Y., KAARTINEN, H., KUKKO, A. & HOLOPAINEN, M., 2009: Forest inventory using small-footprint airborne LiDAR. In: J. Shan & C.K. Toth, *Topographic Laser Ranging and Scanning, Principles and Processing*, Boca Raton, CRC Press, Taylor and Francis Group, S. 335-370.
- MALTAMO, M., MALINEN, J., PACKALÉN, P., SUVANTO, A. & KANGAS, A., 2006: Nonparametric estimation of stem volume using airborne laser scanning, aerial photography and stand-register data. *Canadian Journal of Forest Research*, **36** (2), S. 426-436.
- MEANS, J. E., ACKER, S. A., FITT, B. J., RENSLOW, M., EMERSON, L. & HENDRIX C. J., 2000: Predicting forest stand characteristics with airborne laser scanning LIDAR. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, **66** (11), S. 1367-1371.
- NÆSSET, E., 2002: Predicting forest stand characteristics with airborne scanning laser using a practical two-stage procedure and field data. *Remote Sensing of Environment*, **80** (1), S. 88-99.
- 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** (6), S. 554-557.
- NÆSSET, E., 2007: Airborne laser scanning as a method in operational forest inventory: Status of accuracy assessments accomplished in Scandinavia. *Scandinavian Journal of Forest Research*, **22** (5), S. 433-422.
- NOTHDURFT, A., SABOROWSKI, J. & BREIDENBACH, J., 2009: Spatial prediction of forest stand variables. *European Journal of Forest Research*, **128** (3), S. 241-251.
- OFNER, M., HIRSCHMUGL, M., RAGGAM, H. & SCHARDT, M., 2006: 3D stereo mapping by means of UltracamD data. *Workshop 3D Remote Sensing in Forestry*, Vienna, Austria.
- PACKALÉN, P. & MALTAMO, M., 2006: Predicting the plot volume by tree species using airborne laser scanning and aerial photographs. *Forest Science*, **52** (6), S. 611-622.
- STRAUB, C. & SEITZ, R., 2011: Möglichkeiten der automatisierten Generierung von Oberflächenmodellen in Waldgebieten aus digitalen Luftbildern. *DGPf Tagungsband 20*, S. 153-161.
- STRAUB, C. & SEITZ, R., 2012: Möglichkeiten der Schätzung von Bestandesoberhöhen und des Holzvorrats auf der Grundlage von digitalen Stereo-Luftbildern – ein Vergleich mit flugzeuggetragenen Laserscannerdaten. *Informationstechnologie für eine nachhaltige*

Landbewirtschaftung, Fokus: Forstwirtschaft, Volume P-194, ISBN 978-3-88579-288-8, ISSN 1617-5468.

STMELF, 1982: Richtlinien für die mittel- und langfristige Forstbetriebsplanung in der Bayerischen Staatsforstverwaltung (Forsteinrichtungsrichtlinien) - FER 1982. aktualisiert 1990 u. 1991.

WASER, L.T., BALTSAVIAS, E., ECKER, K., EISENBEISS, H., FELDMEYER-CHRISTE, E. GINZLER, C., KÜCHLER, M. & ZHANG L., 2008: Assessing changes of forest area and shrub encroachment in a mire ecosystem using digital surface models and CIR aerial images. *Remote Sensing of Environment*, **112** (5), S. 1956-1968.

Luftbildarchäologie römischer Siedlung im Rheinland

URSULA HEIMBERG & RALF ZANTOPP

Zusammenfassung: Mit dieser Arbeit werden die durch Luftbildarchäologie zwischen Rhein und Maas, dem südlichen Teil der römischen Provinz Niedergermanien entdeckten römischerzeitlichen Siedlungsbefunde vorgestellt und in den wissenschaftlichen Kontext gesetzt. Die luftbildarchäologischen Befundbereiche werden in Form einer photogrammetrischen Auswertung und in einer archäologischen Beschreibung dargestellt. Sie repräsentieren den augenblicklichen Bearbeitungszustand der Luftbildarchäologie des LVR-Amtes für Bodendenkmalpflege im Rheinland.

Außer einem vicus mit Tempel, einer dorffartigen Anlage für Handel, Handwerk und Reiseverkehr und einer Straßenstation sind in erster Linie Teile von Bauernhöfen erfasst worden. Viele Befunde sind fragmentarisch, ganze Anlagen sind selten. Die kleinteilige Flurgliederung, der Verlust von geeigneten Anbauflächen, die Zerstörung durch Tiefpflüge mögen Gründe für die bruchstückhafte Überlieferung sein; dazu kommt die im Rheinland fast überall festgestellte Erosion von 80 cm oder mehr, die heute bis zum römischen Laufhorizont fehlen. Viele Wirtschaftsgebäude römischer Gehöfte waren zudem Pfostenbauten, die im Luftbild oft nicht erfasst werden. Zu sehen sind meistens die Wohnhäuser, wobei neben den normalen kleinformatischen Häusern der Familienbetriebe mit 80-100 ha Landbesitz die mittel- und großformatigen als reine Wohnsitze oder mit mehreren hundert Hektar Betriebsgröße gut vertreten sind. Auch eine Reihe von Nebengebäuden aus Stein, teilweise mit ungewöhnlichen Grundrissen sind überliefert. Die Luftbildbefunde ergänzen und variieren die bisherigen Kenntnisse der römischen Villen mit einer unerwarteten Vielfalt.

1 Motivation

Ziel dieser Arbeit ist, die durch Luftbildarchäologie in den beiden Regierungsbezirken Köln¹ und Düsseldorf des Bundeslandes Nordrhein – Westfalen entdeckten römischen Siedlungsbefunde vorzustellen und in den wissenschaftlichen Kontext zu setzen. Die luftbildarchäologischen Befundbereiche werden in Form einer photogrammetrischen Auswertung und in einer archäologischen Bewertung dargestellt. Diese Darstellung repräsentiert den momentanen Aufarbeitungszustand des Luftbildarchives, eine Ergänzung der Befundlage ist geplant.

Die Untersuchungsfläche umfasst zur Zeit ein Areal von 12654 km² wobei die für die Luftbildarchäologie relevante Agrarfläche nur 5928 km² beträgt.

Die Agrarflächen haben sich in den letzten zehn Jahren durch Flächenumwandlung um 5 %² zu Gunsten des Waldes (2%) und der Besiedlungsversiegelung (3%) verringert.

2 Befundenstehung, qualitative und quantitative Hintergründe

Die im Projektrahmen bearbeiteten Befunde sind im Zeitraum 1960 bis 1998 entstanden.

¹ ohne den bodendenkmalpflegerisch selbstständigen Bereich der Stadt Köln

² Daten des Landesamtes für Statistik und Datenverarbeitung NRW

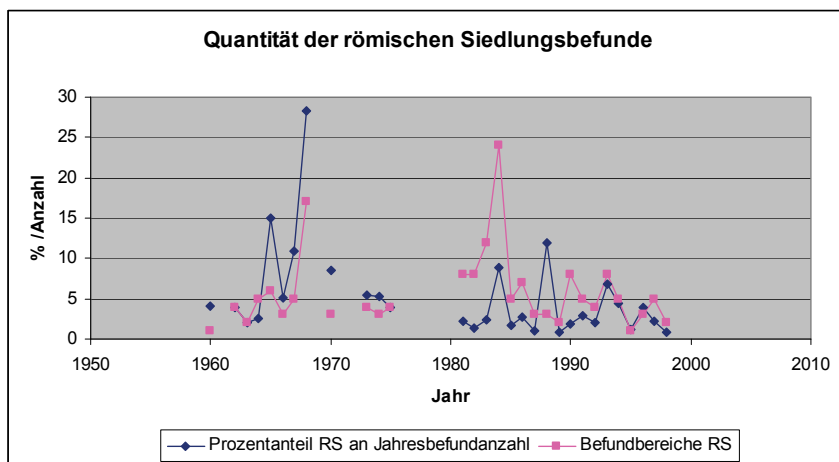


Abb. 1: Befundanzahl und den Prozentanteil der römischen Siedlungsbefunde im jeweiligen Jahr an der Gesamtbefundanzahl.³

⁴Die Befunde wurden in den Jahren 1981 - 1985 von G. Amtmann, in Jahren 1974 und 1975 von C. Machat, in den Jahren 1963 -1964 und 1975 von A. M. Martin, in den Jahren 1962, 1973 und 1975 von C.P. Rüger, in den Jahren 1960, 1962, 1965,1966 und 1970 von I. Scollar, im Jahre 1970 von E. Wagner, in den Jahren 1965 – 1968 von A. Wittich und in den Jahren 1987-1998 von R. Zantopp aufgenommen.

Wie Abb. 1 zu entnehmen ist, fanden Befliegungen mit höherem Befundaufkommen erst ab 1982 statt, was zum einen mit dem ab 1982 höherem Flugstundeneinsatz zu erklären ist und zum anderen mit der durch das ab 1990 eingesetzte Bodenfeuchtemodell⁵.

Die Merkmale die bei den luftbildarchäologischen Bildflügen zur Erkennung der Befundbereiche führten bzw. den Befund beschreiben, sind in 65 Fällen negative Bewuchsmerkmale in 8 Fällen positive Bewuchsmerkmale und in 8 Fällen helle Bodenverfärbungen.

Negative Bewuchsmerkmale bezeichnen den zurückbleibenden Bewuchs von Pflanzen über im Boden befindliche Sperrschichten in der vertikalen Verteilung der Bodenfeuchte. Im Falle von Siedlung, meistens im Boden befindliche Mauerreste. Beispiele zeigen die negativen Bewuchsmerkmale der Villenkomplexe bei Pier (Abb. 2) und Odendorf (Abb. 6).

³ Datengrundlage für die Berechnung sind Originaldaten des Arbeitsbereiches Luftbildarchäologie des LVR- Amt für Bodendenkmalpflege im Rheinland und für das Jahr 1962 das Bonner Jahrb. 164,1964, 407-408, für das Jahr 1963 das Bonner Jahrb. 165,1965,398, für das Jahr 1964 Bonner Jahrb. 166,1966,527, für das Jahr1966 das Bonner Jahrb. 168,1968,416, für das Jahr1967 Bonner Jahrb. 169,1969,443, für das Jahr 1968 Bonner Jahrb. 170,1970,320

⁴ entsprechend denen im Ortsarchiv des LVR- Amtes für Bodendenkmalpflege im Rheinland nachgewiesenen Daten

⁵ Zantopp, R. Methoden und Möglichkeiten der Luftbildarchäologie im Rheinland in Kunow, J., Luftbildarchäologie in Ost- und Mitteleuropa Aerial Archaeology in Eastern and Central Europe. Forsch. Arch. Land Brandenburg 3 Potsdam 1995 S. 156

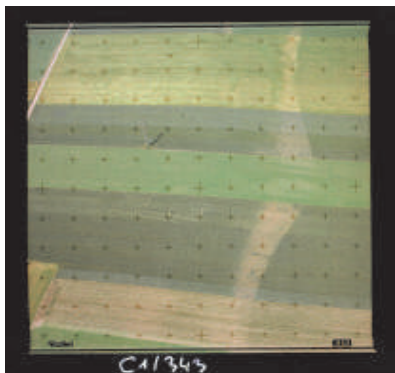


Abb. 2: Luftbild C1/343 Zantopp/LVR-ABR(93ra031)



Abb. 6: Luftbild C2/412 Zantopp/LVR-ABR(RP01502)

Positive Merkmale hingegen entstehen wenn durch in Gruben, Gräben oder Löcher eingebrachte gute Böden die vertikale Verteilung der Bodenfeuchte optimiert wurde und die Pflanzen durch bessere Wachstumsbedingungen als in der Umgebung stärkeres vertikales Wachstum entwickeln.



Abb. 3: Luftbild MSAG 3 Rüger/LVR-ABR (A061613a)



Abb. 4: Luftbild SRN36 Amtmann/LVR-ABR (A06390)

Als Beispiel können hier die positiven Bewuchsmerkmale über Entnahmegruben eines vermutlich römischen Gebäudes bei Vettweiß dienen (Abb. 3).

Helle Bodenverfärbungen sind farbliche Veränderungen des Oberflächenbodens die durch anstehen oder anpflügen von anderen Bodenschichten oder in die Erde eingebauter Materialien wie Mauern oder Kiesbetten entstehen.

Der Villenkomplex Eschweiler (Abb. 4) der an Hand von hellen Bodenverfärbungen erkannt wurde macht dieses Merkmal deutlich.

3 Photogrammetrische Bearbeitung der Befundbereiche

Da in der rheinischen Luftbildarchäologie erst ab 1990 Messkamarasysteme⁶ eingesetzt wurden, mussten für die bis dahin eingesetzten Kamerasysteme Näherungswerte hinsichtlich der Abbildungseigenschaften (innere Orientierung, Objektivverzeichnung) gebildet werden, um die Bilddaten der Kameras photogrammetrisch auswerten zu können.

Es wurden sowohl analoge wie digitale Bilddaten in dem photogrammetrischen Arbeitsprozess integriert. Um die teilweise auch im LVR- Amt für Bodendenkmalpflege hergestellten digitalen Daten photogrammetrisch bearbeiten zu können, musste der hauseigene Scanner Agfa DUOSCAN T2500⁷ photogrammetrisch kalibriert werden.

Alle übrigen digitalen Bilddaten wurden mit dem photogrammetrischen Scanner Zeiss SCAI bzw. in dem P3- Orthophotoprozess⁸ beim Institut für Photogrammetrie der Universität Bonn hergestellt.

Die Startkoordinaten für den photogrammetrischen Auswerteprozess wurden der dem Befundaufnahmezeitpunkt zeitnahen DGK5L⁹ entnommen, die Höhendaten dem DTM25 über eine Interpolation mit INPHO/SCOP¹⁰.

Mit PMS/Elcovision 10¹¹ wurde dann für jedes Bild des jeweiligen Projektes eine absolute Raumorientierung berechnet. Ein Modell dieser Bildraumlagen des Projektes 93ra031 zeigt Abb. 5

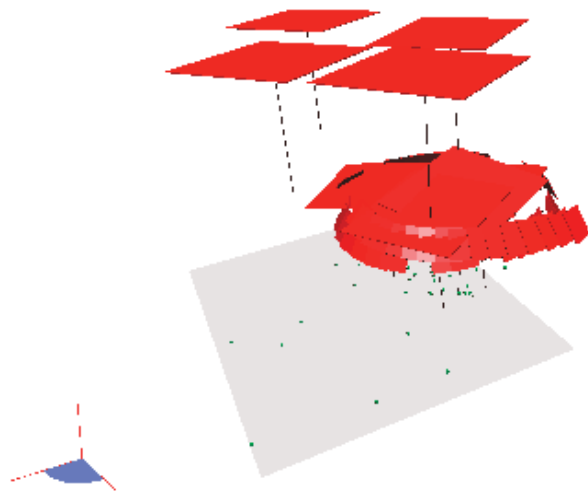


Abb. 5¹² Lagemodell der Luftbilder im Raum

⁶ Zantopp, R. Die Anwendung der Methoden der Fernerkundung und Luftphotogrammetrie in der archäologischen Prospektion in Gruen, A., Baltsavias, E. Close Range Photogrammetry Meets Machine Vision, SPIE Vol. 1395 Part 2 S. 1310-1213

⁷ Agfa-Gaevert N.V. DUOSCAN T2500 Getting Started PC Morsel 1998

⁸ Fuchs C., Ruwidel, S. Digitizing and Rectification of Transparencies with the Analytical Plotter P3 Internat. Archiv of Photogr. and Remote Sensing 29, 1992 18-24

⁹ Pape, E. Das Luftbildkartenwerk von Nordrhein- Westfalen Nachr.öffentl. Vermessungswesen Nordrhein- Westfalen 15, 1982 97-125

¹⁰ INPHO SCOP Digitale Geländemodelle Produktinformation Stuttgart 1990

¹¹ pms Photo Mess Systeme AG Elcovision 10 7.104 Handbuch St. Magarethen 2009

In dem Projekt wurden 51 Luftbilder photogrammetrisch orientiert und gemeinsam in einer Bündeltriangulation¹³ berechnet. Im Falle analoger Bilddaten wurden dann die Befundkartierung im 3D Bildraum vorgenommen. Bei digitalen Bilddaten wurde von einigen der Bilder mit der jeweilig prägnantesten Befundaussage mit PMS/Elcovision 10 ein digitales Orthophoto hergestellt. Die Befundkartierungen und die Orthophotos wurden dann projektweise mit dem Geoinformationssystem SICAD-SC erfasst über den digitalen Orthophotos wurden dann in SICAD-SD¹⁴ Befundkartieren hergestellt.

Durch den photogrammetrischen Auswerteprozess wurden die Befundkartierungen je nach Qualität der beteiligten Bilddaten mit einer absoluten Lagegenauigkeit von 0,2 – 2 Metern kartiert.

4 Archäologische Bewertung der Befunde

4.1 Die Gebäudetypen

Angesichts der großen, scharfen und oft weitgehend vollständigen Luftbildpläne von Villenkomplexen im nördlichen Frankreich¹⁵ ist die Beschäftigung mit den luftbildarchäologischen Befunden des Rheinlandes ziemlich ernüchternd. Gut erkennbare Gebäudepläne sind eher selten, zahlreich dagegen nur teilweise erhaltene Grundrisse oder gar nur Fragmente, die schwer zu interpretieren sind. Den weiten Ebenen Nordfrankreichs, die einheitlich zum Getreideanbau oder als Weideland, also zum Anbau sensibler Nutzpflanzen verwendet werden, steht die eher kleinteilige Flurgliederung zwischen Rhein und Maas und die entsprechend wechselnde Kultivierung auch mit grobrastrigen Pflanzen wie Kartoffeln, Mais oder Zuckerrüben einer Erfassung großer Flächen gegenüber. Hinzu kommt im Rheinland die kontinuierliche Verringerung der Agrarflächen, einerseits zugunsten des Waldes (5%), andererseits (2%) durch Besiedlung¹⁶. Außerdem spielt sicherlich die Erhaltung der antiken Bauten eine einschränkende Rolle: die bei Grabungen fast überall konstatierte Erosion der Oberfläche von bis zu 0,8 m oder mehr, die den römischen Laufhorizont und auch viele Bauspuren vernichtet hat. An bereits ausgegrabenen Beispielen zeigt der Vergleich der Luftbild- und der Grabungspläne oft gravierende Unterschiede, sie sind manchmal kaum zur Deckung zu bringen; die ergrabenen Grundrisse sind immer wesentlich differenzierter als die Luftaufnahmen. Schließlich bestanden viele Wirtschaftsgebäude aus Holz, deren Pfostengruben keine aus der Luft erkennbaren Merkmale ausprägen. Argumente für die römische Zeitstellung der Luftbildspuren sind zum einen ihre von der heutigen Infrastruktur (Vermessungsrichtung) abweichende Orientierung und zum anderen die Nähe einer römischen Trümmerstelle; beide können die zeitliche Zuweisung höchstens andeuten, absolute Hinweise sind es nicht. So gibt es mehrere Pläne, deren römische Datierung schon wegen der Dimensionen zweifelhaft ist.

Die meisten Luftbilder sind im Kreis Düren (26) und im Rhein-Erftkreis (17) dokumentiert worden, gefolgt von den Kreisen Euskirchen (8) und Neuss (6); die wenigsten Spuren kamen im Rhein-Siegkreis (4) sowie in den Kreisen Aachen (4) und Heinsberg (2) zutage.

Eine Villa ist ein bäuerlicher Betrieb, ein Gehöft, ein Gut, zu dessen Baubestand ein Wohnhaus und diverse Wirtschaftsgebäude gehören: Scheunen und Speicher, Remisen und Ställe. Die Wohnhäuser haben in den Nordwestprovinzen des Römischen Reiches die typische Form mit einer Portikus-Risalitfassade, einem offenen Laubengang zwischen vorspringenden Eck-

¹² pms Photo Mess Systeme AG Elcovision 10 7.104 St. Magarethen 2009 Programmdisplay zur Modellorientierung des Projektes 93RA031

¹³ Lehmann, G. Photogrammetrie Berlin 1969 161

¹⁴ AED – SICAD, SICAD-SD 6.0.2, Handbuch München 2006

¹⁵ R. Agache, La Somme pré-romaine et romaine. Mem. Soc. Ant. de Picardie 24 (Amiens 1978).

¹⁶ Daten des Landesamtes für Statistik und Datenverarbeitung NRW

räumen oder seitlichen Flügeln. Ökonomisch gesehen ist die Villa ein Unternehmen, das mit zusätzlichen Arbeitskräften und mit rationalen Methoden Überschüsse produziert und diese am Markt verkauft. Die Villenwirtschaft versorgte also die nicht in der Landwirtschaft tätige Bevölkerung der Städte und Dörfer, in den Grenzprovinzen auch die Armee mit Grundnahrungsmitteln und Rohstoffen. Höfe und Güter dieser architektonischen Gestalt und wirtschaftlichen Ausrichtung entstanden in Niedergermanien in der zweiten Hälfte des 1. Jh. n. Chr.

An Rhein und Maas hatten sich spätestens seit der Eisenzeit zwei Regionen mit gegensätzlichen Wirtschaftsweisen herausgebildet. Der fruchtbare Lößgürtel im Süden zwischen Köln und Maastricht, der sich weiter durch Nordgallien zieht bis hin zur Picardie am Atlantik; er wurde seit jeher agrarisch genutzt zum Anbau von Getreide. Die Schotterböden und sandigen Dünen des Nordens eigneten sich besser als Weideland und zur Viehwirtschaft, hier vornehmlich zur Rinderzucht. Beide Varianten unterscheiden sich in den Hauslandschaften: mehr als 20 m lange Pfostenbauten, die Wohnstallhäuser kennzeichnen den Norden auch noch in römischer Zeit; im Süden findet man gleichzeitig die Villenanlagen. Die Hauslandschaften demonstrieren somit eine an die Umweltbedingungen angepasste ökonomische Spezialisierung, die in römischer Zeit beibehalten wurde.

Im folgenden werden zuerst die gut erkennbaren Pläne kurz vorgestellt, eingeteilt nach den verschiedenen Typen der Wohnhäuser und der Nebengebäude; danach kommen Fragmente zur Sprache, die zu römischen Anlagen gehört haben können und zuletzt die Pläne, deren antike Zeitstellung fraglich ist.

4.1.1 Wohnhäuser

Die Wohnhäuser der normalgroßen Gehöfte im südlichen Niedergermanien¹⁷ haben Fassadenbreiten zwischen 20 und 40 m und sind unterschiedlichen Kategorien zuzuordnen: dem Hallen- und dem Reihentypus. Die ‚Halle‘ ist ein großer rechteckiger Gemeinschaftsraum, teilweise mit Seitenräumen, in dem sich die hauswirtschaftlichen Tätigkeiten abspielten; sie sind ausgestattet mit der für die Nordwestprovinzen charakteristischen Fassade aus vorgelagerter Portikus und vorspringenden Eckräumen, den Risaliten. Beim ‚Reihentyp‘ mit entsprechender Fassade bildet ein rechteckiger bis quadratischer Empfangssaal das Zentrum des Gebäudes, dem beidseitig kleinere und größere Räume ‚angereiht‘ sind. Die beiden Formen spiegeln sehr wahrscheinlich eine soziale Differenzierung; ein Hallenhaus kann auch zu einem Gebäude des Reihentyps umgebaut werden.

4.1.1.1 Hallentypus

Zum Typus der Hallenhäuser gehören *Kelz (1)/Dü* (Abb. 21), *Dom-Esch/Eu* (Abb. 39), *Broichweiden/Aa* (Abb. 8), vermutlich auch *Sindorf (1)/RhE* (Abb. 68). Alle haben eine Portikusfassade, die Risaliten springen bei *Dom-Esch/Eu* seitlich weit vor, bei den anderen nur wenig, bei *Broichweiden* sind sie vorne und seitlich eingebunden; innen sind an einer Seite kleine Eckräume abgetrennt, bei *Sindorf/RhE* dazu noch ein größerer Seitenraum.

Andere Wohnhäuser des Hallentyps haben Portiken an beiden Langseiten: *Dirmezheim/RhE* (Abb. 56), *Nettesheim/Ne* (Abb. 51) und *Titz-Ameln/Dü* (Abb. 36) sowie die weniger gut erhaltenen bei *Langenich/RhE* (Abb. 66) und *Echtz/Dü* (Abb. 15) - letzteres könnte auch ein Nebengebäude gewesen sein. Bei Magnetometermessungen in *Dirmezheim* kamen vor dem Haus weitere Spuren zutage, wahrscheinlich die Reste eines Gartens oder eines Hofes. Bei dem bereits ergrabenen Wohnhaus in *Nettesheim/Ne* waren der südliche Teil des Gebäudes und die Ostfassade im Luftbild sehr gut erhalten, die Rückseite ist nicht mehr so klar, die Nordseite fehlt fast ganz; andererseits erscheinen hier vor der Fassade weitere Räume, die die

¹⁷ Dazu Heimberg, Villen 91-93.

Grabung offenbar nicht erfasst hat. *Langenich* ist sehr fragmentarisch, die Fassade mit seitlich überstehendem Risaliten im Nordosten wies möglicherweise nach Norden; einen kleineren, seitlich eingebundenen Risaliten erkennt man auch im Südosten. Bei *Echtz/Dü* treten nur die rückwärtigen Portikusmauern und gegenüber zwei Eckräume in Erscheinung

4.1.1.2 Reihentypus

Zum Reihentypus zählen das schon lange bekannte und sehr klar sich abzeichnende Wohnhaus bei *Liblar-Frauenthal/RhE* (Abb. 67) mit quadratischem Saal, mehreren Seitenräumen verschiedener Größe, Portiken an beiden Langseiten und an die Schmalseiten angebaute, vorne eingebundene Risaliten. Ebenfalls einen etwa quadratischen Saal und seitlich angebaute Risalite an allen Ecken hat *Stotzheim/Eu* (Abb. 45), vor dessen Nordseite Mauerreste wohl einen Hof abgrenzen mit weiteren Räumen oder Nebengebäuden an der Ostseite. Dem Wohnhaus ähnelt das etwas kleinere Gebäude bei *Merzenich/Dü* (Abb. 30), bei dem die kleinteilige Innengliederung auffällt; viele Versturzstellen könnten wie bei *Stotzheim/Eu* Hypokausten oder Keller andeuten. Größer ist *Randerath (1)/He* (Abb. 46) mit quadratischem Saal und Risalitvorsprüngen nach beiden Seiten. *Gymnich/RhE* (Abb. 61) hat einen rechteckigen Saal, seitlich kaum vorspringende Räume an allen Ecken, eine u-förmige Portikus vorne und eine gerade an der Rückseite. Vermutlich gehört auch das schon teilweise ausgegrabene Wohnhaus von *Obergartzem/Eu* (Abb. 44) hierher, dessen Grundriss wesentlich differenzierter war als es die wenigen Mauerzüge der Luftaufnahme ahnen lassen; auch der Anbau vor der Westecke fehlt im Luftbild; das zweischiffige Nebengebäude im Süden lässt dagegen eine sehr kleinteilige Gliederung erkennen.

4.1.1.3 Wohnhäuser ohne Risalite

Die Häuser in *Kelz (2)/Dü* (Abb. 22) und *Korschenbroich/Ne* (Abb. 50) haben zwei schmale Neben- und kleine, aber nicht vorspringende Eckräume an den Langseiten, es sind also wohl Wohnhäuser des Hallentyps ohne Risalite¹⁸; letzteres hat dazu noch einen rechteckigen Anbau an der Westseite. Entsprechende Gebäude, aber mit Räumen an allen vier Seiten kamen in *Engelsdorf/Dü* (Abb. 16) und *Elsdorf (2)/RhE* (Abb. 58) zutage; in *Elsdorf (2)/RhE* sind außerdem zwei große rechteckige Gebäude im rechten Winkel dazu angeordnet, die wohl zugleich die Breite des Gehöftes - knapp 120 m - markieren.

Das nur aus einem Luftbildes bekannte Gehöft *Erbericher Hof/Aa* (= *WW 80*) (Abb. 4. 9) - die Ausgrabung brachte keine weiteren Ergebnisse - bestand aus einem Wohnhaus ohne Risalite und vier oder fünf Nebengebäuden; auch ein Brunnen ist analysiert worden mit zahlreichen wichtigen Ergebnissen zu archäologischen Funden sowie zur Botanik und zur Zoologie, die Hinweise auf die Umwelt des Hofes lieferten¹⁹.

4.1.1.4 Mittelformate

Gebäude mit mittleren Fassadenmaßen um 60 m sind in *Altdorf(2)/Dü* (= *WW 118*) (Abb. 12), *Arlöff/Eu* (Abb. 38), *Kelz (1)/Dü* (Abb. 3. 21), *Kreuzweingarten/Eu* (Abb. 42) und *Luchem/Dü* (Abb. 28) dokumentiert; sie verdoppeln die Anzahl der bisher bekannten und bereits ausgegrabenen rheinischen Beispiele in Ahrweiler, Blankenheim, Kreuzweingarten, Lürken, Müngersdorf und Weilerswist²⁰.

Altdorf (2)-WW 118 (Abb. 12) ist inzwischen ausgegraben²¹. Das Luftbild wird durch viele Schuttflächen verunklärt; legt man den Grabungsplan darüber, so erkennt man dazu noch

¹⁸ Heimberg, Villen 104 ff. Abb. 33-36; als Nebengebäude Abb. 43.

¹⁹ W. Gaitzsch u.a., Archäologische und naturwissenschaftliche Beiträge zu einem römischen Brunnenfundament. Bonner Jahrb. 189, 1989, 225-283.

²⁰ Heimberg, Villen 93 ff. Abb. 26. 29. 30.

²¹ Grabung B. Paffgen, noch unpubliziert.

viele Abweichungen. Das Haus zeigt im Osten eine mit Portiken umgebene Fläche, wahrscheinlich ein Peristyl; die im Grundriss entsprechende Westseite ist in Räume aufgeteilt. Risalitartige Vorsprünge sind an allen vier Ecken vorhanden. Die stärker gegliederte Hauptfassade scheint nach Nordwesten zu weisen, während der Wirtschaftshof offenbar auf der Rückseite liegt - eine Disposition, die der von Köln-Müngersdorf²² entspricht. Dabei stehen ein Wirtschaftsgebäude mit Innenstützen und einem Gang aus Pfosten im Westen, außerdem ein etwa quadratischer Pfostenbau weiter südlich.

Die sehr fragmentierten Reste bei *Kreuzweingarten/Eu* (Abb. 42) gehören wohl ebenfalls zu einem Wohnhaus dieser Größe, sofern nicht ein zweiter Flügel im Norden bestand, womit der Bau dann zum Großformat würde. Es scheint sich um ein ziemlich tiefes Gebäude zu handeln, an dessen Südseite ein Seitenflügel nach Osten vor springt: wegen des Apsidenraumes ganz außen möglicherweise das Bad. Im Hauptflügel reihen sich beiderseits eines quadratischen Saales - in der Gebäudemitte? - zahlreiche Räume unterschiedlicher Größe neben- und hintereinander; mehrere Schuttflächen im Außenbereich weisen vielleicht auf erhaltene Fußböden oder vertiefte Räume hin.

Einmalig im Rheinland ist bisher ein Befund in *Kelz (1)/Dü* (Abb. 21). Vier sehr scharf gezeichnete Bauten sind über fast einen halben Kilometer verstreut. Im Norden erkennt man ein Wohnhaus des Mittelformates (Abb. 21 a) mit einer schmalen Raumreihe zwischen zwei Galerien sowie einen nach Nordwesten vorspringenden Flügel, ebenfalls mit mehreren Räumen. Hier könnte ein vierflügeliges Gebäude vorliegen, ein im Rheinland bisher seltener Plan; nur bei der schon lange ergrabenen Villa von Kreuzweingarten liegt ein geschlossener Hof hinter einer Villa mit Portikus-Risalit-Fassade²³. Vor der Südecke der Kelzer Anlage zeichnet sich ein gleich orientiertes, quadratisches Wirtschaftsgebäude mit 15 m Seitenlänge ab. Etwa 300 m entfernt liegt im Südosten ein normales Wohnhaus des Hallentyps (Abb. 21 b) mit Portikus, Risaliten und Eckräumen an einer Seite; es ist etwas anders orientiert und deshalb wohl Teil eines kleineren Gehöftes. Fast in der Flucht des großen Hauses erscheint gut 400 m entfernt eine kreisrunde Spur von gut 30 m Durchmesser: vielleicht die Einfassung eines Grabtumulus²⁴. Trotz der unterschiedlichen Orientierung könnten die beiden Wohnhäuser zu einem Gehöft gehört haben - kommt hier möglicherweise ein Pachtverhältnis zum Vorschein?

Ein weiteres Villenwohnhaus dieser Größe zeichnet sich fragmentarisch bei *Luchem/Dü* (Abb. 28) ab, ein ziemlich kleinräumig gegliederter Grundriss mit vorgelagerter Portikus; flächige Versturzspuren könnten wiederum Hypokausten andeuten.

Als Reste eines Wohnhauses des Mittelformates können wohl auch die Spuren bei *Arloff/Eu* (Abb. 38) angesprochen werden: der Mittelteil eines Gebäudes mit Seitenflügel, bei dem wieder ein Raum mit kleiner Apsis auffällt. Der rechteckige Raum im Südosten könnte zum Garten gehört haben.

4.1.1.5 Große Formate

Zu den großen Formaten mit Fassadenbreiten von 80-120 m gehören die aus älteren Luftbildern schon länger bekannte Villa in *Schleiden/Dü* (Abb. 35) sowie die palastartigen Gebäude in *Dormagen/Ne* (Abb. 48), *Kelz (4)/Dü* (Abb. 24), *Kirchberg (2)/Dü* (Abb. 26), *Blatzheim/RhE* (Abb. 54), *Sechtem/RhS* (Abb. 74), *Froitzheim/Dü* (Abb. 18, 19) und *Pier/Dü* (Abb. 2, 31); ob das riesige Gebäude in *Miel/RhS* (Abb. 72) römisch datiert werden kann, ist fraglich. Mit diesen sechs oder sieben neuen großformatigen Villenwohnhäusern hat sich die Anzahl im Rheinland verdreifacht, wo bisher nur noch Morken sowie wahrscheinlich Nie-

²² Heimberg, Villen Abb. 18

²³ Heimberg, Villen Abb. 26

²⁴ Zur Größe von Tumuli: A. Wigg, Grabhügel des 2. und 3. Jahrhunderts n. Chr. an Mittelrhein, Mosel und Saar.

Trierer Zeitschr. Beih.16 (Trier 1993) 19 Abb. 2; 23 Abb. 3.

denmerz und Godesberg Beispiele dieser Gattung waren²⁵. Vor allem in den Kreisen Düren, Euskirchen und Rhein-Sieg, den expliziten Lößregionen, signalisieren sie ebenso wie die Mittelformate die Anwesenheit von Großgrundbesitzern; ob diese Villen nur als Wohnsitz dienten oder ob jeweils ein Gutshof dazu gehörte, ist bisher bei keinem Beispiel bekannt. Die zugehörigen Güter können auch von Pächtern in normalen Höfen bewirtschaftet worden sein. Das Wohnhaus in *Schleiden/Dü* (Abb. 35) ist in der vorliegenden Aufnahme nicht so genau erfasst wie in früheren²⁶. Der dreipassförmige und für die spätantike Datierung wichtige Raum an der Westecke erscheint nur als Oval, der nordwestliche Seitenflügel fehlt ganz; dafür springt die mittlere Quermauer weiter nach Nordwesten vor, verschiebt entsprechend die Außenwand und unterbricht die Portikus an dieser Stelle.

Wegen der vielen hellen Schuttflächen schwer zu entziffern ist der Plan bei *Dormagen/Ne* (Abb. 48); die diagonale Mauer im Südosten könnte eine Grenzmauer sein, an die das Wohnhaus mit größeren Räumen in der Mitte und kleineren an den Seiten dann unmittelbar anschloss.

Gestochen scharf zeichnet sich dagegen ein langes Gebäude bei *Pier/Dü* (Abb. 31) ab, dem allerdings die nordwestliche äußere Längsmauer fehlt, sicherlich wegen der unterschiedlichen Feldbepflanzungen. Im Nordosten erscheint ein kurzer Mauerabschnitt mit äußeren Wandverstärkungen, eher die Schmalseite des Gebäudes als eine Grenzmauer zum Flusstal hin, das sich daneben als heller Streifen abhebt. Das langschmale Gebäude hatte zumindest im Südosten eine Portikus, wahrscheinlich aber auch an der Rückseite; dazwischen zeichnen sich einzelne größere und kleinere Räume ab. Der mit Gängen umgebene Platz an der Südecke könnte ein Garten gewesen sein. Der vordere quadratische Raum mit Querteilung, dem zwei Pilaster an der Außenwand entsprechen, markiert vielleicht die Gebäudemitte und den Eingangsbereich.

Ein gut 90 m breites Wohngebäude, vielleicht mit zentralem, von Räumen umgebenem Hof und einer südlichen Portikus liegt bei *Kelz (4)/Dü* (Abb. 24), ein weiteres Haus dieser Größe bei *Kirchberg (2)/Dü* (Abb. 26).

Blatzheim/RhE (Abb. 54) hat einen Mittelteil mit Galerie im Westen und seitlichen Anbauten, die fragmentarisch bleiben.

Die Fragmente eines mindestens 120 m breiten Wohnhauses erscheinen in *Froitzheim (1-3)/Dü* (Abb. 18, 19) nordöstlich der drei ebenfalls in Luftbildern entdeckten Burgi, von dem einer ausgegraben wurde. Auf dem Grabungsplan²⁷ sind Hausreste skizziert, die aber durch die neuen Befunde deutlicher werden. Im Norden sind zwei von Südwesten nach Nordosten gleich ausgerichtete Baublöcke (1-2) zu sehen, die vielleicht beide zum Wohnhaus gehörten; in der Mitte fehlen etwa 40 m. Als Besonderheit kann der mit Portiken gesäumte Hof oder Garten im Westen gelten, zu dessen Ostseite vielleicht eine Wasserzu- oder -ableitung führt. Südwestlich in rund 90 m Entfernung liegt ein etwas anders orientierter Wirtschaftsbau (3), ein rechteckiger Grundriss mit vorgelagertem Gang und schmalen Querräumen. Wenn die Interpretation der nördlichen Komplexe als Wohnhaus richtig ist, dann gehörte zu einem derartigen Palast sicherlich ein entsprechend großer Grundbesitz; die höchst ungewöhnliche Kombination von drei Burgi mit Wehr- und Speichertürmen würde damit etwas verständlicher.

²⁵ Heimberg, Villen Abb. 31.

²⁶ Vgl. K.H. Lenz, Siedlungen der römischen Kaiserzeit auf der Aldenhovener Platte. Rhein. Ausgr.

45 (Köln/Bonn 1999) 121 Abb. 12.

²⁷ L.H. Barfield, Ein Burgus in Froitzheim, Kreis Düren. Rhein. Ausgr. 3 (Düsseldorf 1968) 9 Abb. 1.

Die

Interpretation als Wirtschaftsbauten - Heimberg, Villen Abb. 43. 44 - entfällt damit.

In diese Kategorie würde auch ein bei römischen Scherbenstreuungen liegender Baukomplex bei *Sechtem/RhS* (Abb. 74) gehören; mehrere parallele bis zu 100 m lange Mauerzüge mit einigen Querteilungen könnten ein großformatiges Wohnhaus andeuten.

Ein Grundriss bei *Miel/RhS* (Abb. 72), der zwar mit vorspringenden Seitenflügeln aussieht wie eine Villa, wäre etwa 190 m breit gewesen, eine im Rheinland bisher noch nicht bekannte Dimension. Zwar gibt es wenige Anlagen mit solchen Maßen, die aber jeweils anders gebaut sind: mehrere nebeneinander liegende, von Räumen umgebene Höfe in Orbe/Schweiz (220 m), zwei mit einer halbrunden Portikus verbundene Flügel in Tétting/Elsass (150 m), zwei Flügel mit gerader Portikus und weiteren Raumkomplexen in Thalerhof/Graz (170 m); also immer einzelne normalgroße Baublöcke, jeweils von Portiken zur Prestigearchitektur zusammengefasst²⁸. Wie der Plan von *Miel/RhS* zu erklären ist, bleibt ungewiss; man muss sicherlich mit einer im Luftbild nicht sichtbaren räumlichen Differenzierung rechnen; die römische Datierung würde von einer Scherben- und Ziegelstreuung gestützt.

4.1.2 Wirtschaftsgebäude

Ein einfaches rechteckiges Nebengebäude erscheint bei *Giesendorf/RhE* (HA 125) (Abb. 59), wo inzwischen zwei weitere Gebäude und wahrscheinlich das Fundament eines Turmspeichers sowie mehrere Brunnen ergraben wurden; sie lagen in einem Obstgarten und wurden deshalb nicht von den Luftaufnahmen erfasst.

Bei *Sindorf (2)/RhE* (Abb. 69) zeichnen sich in einem Feld mehrere gleichgerichtete rechteckige oder quadratische Bauten und einzelne Mauerzüge ab, die als Nebengebäude eines mindestens 100 m breiten Gehöftes gelten könnten. Zwei einfache rechteckige Wirtschaftsbauten sind zusammen mit dem Wohnhaus bei *Elsdorf (2)/RhE* (Abb. 58) zu sehen, ein langschmales Gebäude - vielleicht ein Stall - außerdem bei *Arnoldsweiler (2)/Dü* (Abb. 14) und eine große rechteckige Scheune mit breiter Einfahrt an der Nordostecke bei *Randerath (2)/He* (Abb. 47). Mit 70 m extrem lang ist ein schmales Gebäude bei *Wissersheim/Dü* (Abb. 37), das im Rheinland nur eine Parallele in Frimmersdorf 42 hat²⁹.

Eine andere Anlage mit mehreren langschmalen Häusern und einem quadratischen Bau mit Innengliederung und äußeren Maueransätzen ist mit einer Aufnahme bei *Erberich /Aa* (Abb. 9) dokumentiert.

Bei zwei Beispielen in *Kerpen (1)/RhE* (Abb. 64) und *Lüxheim/Dü* (Abb. 29) ist an einer Langseite des rechteckigen Hauses ein schmaler Gang abgetrennt. Sicherlich gehörten auch die Spuren in *Altdorf (1)/Dü* (Abb. 11) und *Bornheim/RhS* (Abb. 71) zu dieser Gruppe.

Fragmentarisch erscheint ein Haus in *Widdendorf/RhE* (Abb. 70), wohl ein rechteckiger Hauptraum mit kleinen Räumen an einer Langseite.

Rechteckige Häuser mit Räumen an einer Schmalseite sind bei *Rödingen/ Dü* (Abb. 34), *Broichweiden/Aa* (Abb. 8) und *Arnoldsweiler (1)/Dü* (Abb. 13) gefunden worden.

Das Nebengebäude der großformatigen Villa bei *Froitzheim(3)/Dü* (Abb. 19) hat einen Gang an einer Langseite und ist mit schmalen Querräumen gegliedert.

Eine zweischiffige Sonderform mit vielen kleinen Räumen an einer Lang- und einer Schmalseite kam in *Obergartzem/Eu* (Abb. 44) zutage; diese Variante ist im Rheinland selten³⁰, sie

²⁸ Orbe: L. Flutsch, Die römische Villa von Orbe-Boscéaz und ihre Mosaiken (Bern 2001). - Tétting: V. Poinson, Implantation et éssquisse d'une typologie des villas gallo-romaines en Alsace et en Lorraine.

Cah. Alsaciens Arch. Hist. 30, 1987, 107-133; 130 Abb. 10. - Thalerhof: Thalerhof bei Graz 170 m: K. Genser,

Die ländliche Besiedlung und Landwirtschaft in Noricum. In: H. Bender, H. Wolff (Hrsg.), Ländliche Besiedlung und Landwirtschaft in den Rhein-Donau-Provinzen des römischen Reiches. Passauer Univ. Schriften zur Archäologie 2 (Espelkamp 1994) 331-376; Band 2, 131 Abb. 17, 18.

²⁹ Vgl. Heimberg, Villen Abb. 45.

³⁰ Heimberg, Villen Abb. 44.

zeigt wohl eine bestimmte Spezialisierung der Wirtschaftsweise an, es könnten auch Wohnräume dazugehört haben; die Dimensionen entsprechen denen des Wohnhauses.

In *Odendorf/RhS* (Abb. 6. 73) blieb ein besonderer Befund erhalten: der Rest eines rechteckigen Wirtschaftsgebäudes mit parallel zu den Langseiten verlaufenden Innenstützen. Im Rheinland sind bisher ein halbes Dutzend Beispiele dieses Typs mit verschiedenen Pfeilerstellungen bekannt; *Odendorf/RhS* entspricht am besten dem als Speicher angesprochenen Bau in Nideggen³¹; vor der Südecke ist noch ein kleiner Schuppen von 4 x 5 m zu erkennen. Sehr scharf zeichnen sich wiederum die Grundrisse bei *Kirchberg (1)/Dü* (= *WW 112*) (Abb. 25) ab: eine lange Grenzmauer, daran im Norden ein großes quer geteiltes Gebäude mit vorspringendem Eckraum im Süden und vorgelagerter Pfeilerreihe; weiter südlich ein kleineres Nebengebäude mit einem an der nördlichen Schmalseite abgeteilten Raum. *WW 112* ist bereits ausgegraben, der nördliche Bau erwies sich als Kornspeicher mit Suspensurapfeilern für einen Schwebeboden³², die Portikus gehört wohl einer späteren Bauphase an. Der südliche Bau entspricht genau dem Luftbild. Später ist das *horreum* mit einem Burgusgraben gesichert worden, den die Luftaufnahme jedoch nicht wiedergibt.

Eigenartig ist schließlich eine Baugruppe bei *Mechernich/Eu* (Abb. 43): ein langrechteckiger Grundriss mit quadratischem Raum im Südwesten, im langen Abschnitt weitere Mauern, die einen dreischiffigen Grundriss ergeben; dicht daneben ein gleichartiges Gebäude, dessen Innengliederung nicht erkennbar ist.

4.1.2.1 Fragmente von Haupt- und Nebengebäuden

Zahlreiche Luftbildspuren sind so unvollständig, dass es kaum möglich ist, sie einer bestimmten Gebäudeform zuzuordnen.

Parallele, eng nebeneinander liegende Wände und kleine Räume in *Kelz (3)/Dü* (Abb. 23) gehörten vielleicht zur Portikusfassade eines Wohnhauses, der schmale Gang im Südwesten könnte eine Kellertreppe gestützt haben; an den Schmalseiten setzen lange Mauerzüge an, vielleicht die Querteilung einer Villa des achsialen Typs.

Wegen der detaillierten Raumaufteilung sind wahrscheinlich auch die wiederum von Schuttfächern verunklärten Spuren eines Grundrisses bei *Pingsheim/Dü* (Abb. 32) einem Wohnhaus größeren Formates zuzuordnen. Ebenso gehörten vier parallele Mauern und Ansätze von Querteilungen bei *Poll/Dü* (Abb. 33) sowie diverse Mauerwinkel in *Gehn/Eu* (Abb. 40) und *Glesch/RhE* (Abb. 60) wahrscheinlich zu Wohnhäusern.

In *Rommerskirchen/Ne* (Abb. 52) sind zwei etwa gleichgroße, nord-südlich ausgerichtete Rechtecke mit einer Quermauer verbunden, im Süden schließt ein schmaleres Rechteck an. Der Grundriss erinnert an das Turmfundament eines Burgus³³, ist aber mehr als doppelt so groß; die Reste sind typologisch nicht zu definieren.

Kleinteilig gegliederte Hausreste sind bei *Weisweiler/Aa* (Abb. 10) und ein kleines Rechteck bei *Frixheim/Ne* (Abb. 49) beobachtet worden. Ein großes Rechteck und ein Mauerwinkel erscheinen schließlich als breite zerpfülte Flecken in *Vinkenpütz/Ne* (Abb. 53).

Reste von mindestens drei Häusern wurden als positive Bewuchsmerkmale unterschiedlicher Größe bei *Kleinbüllesheim/Eu* (Abb. 41) dokumentiert; es kann sich um Ausbruchsrinnen einiger Bauten eines Gehöftes handeln. Ein ähnliches Bild in positiven Bewuchsmerkmalen

³¹ Heimberg, Villen 116 Abb. 45. – Ein entsprechendes Gebäude hat die Ausgrabung bei Altdorf (2) = *WW 118*

zutage gefördert, vgl. Abb. ● .

³² Grabung B. Paffgen, noch unpubliziert; Kornspeicher abgebildet in Heimberg, Villen Abb. 46.

³³ Z.B. wie in Froitzheim: L.H. Barfield, Ein Burgus in Froitzheim, Kreis Düren. Rhein. Ausgr. 3 (Düsseldorf 1968)

bietet *Koslar/Dü* (Abb. 27) mit rechteckigen und ausgefranst wirkenden Gruben und verschiedenen langen Gräben.

4.1.2.2 Anlagen ungewisser Form und Zeitstellung

Einige Luftbilder zeigen helle, ausgepflügte Bodenverfärbungen, Komplexe in sehr großen Dimensionen, in denen klare Grundrisse nicht zu erkennen und kaum zu interpretieren sind, ihre römische Zeitstellung ist wegen der Dimensionen zudem höchst unsicher.

Die Reste bei *Heppendorf/RhE* (Abb. 62) - unscharfe parallele Linien und Flecken – könnten zu einer Villa des Großformates gehört haben; da die Spuren aber mit der heutigen Orientierung der Feldvermessung übereinstimmen, ist die antike Datierung ungewiss.

Auch bei drei wiederum riesigen Komplexen in *Buir/RhE* (Abb. 55) und *Aachen-Paulinenhof/Aa* (Abb. 7 a.b) mit großen Flecken und einzelnen Mauerzügen (?) sind Grundrisse nicht zu erkennen, eine Interpretation ist ebenfalls kaum möglich. In *Buir* entspricht die Orientierung ebenfalls der heutigen Vermessung.

4.1.3 Ein vicus

Spuren eines einzigen *vicus* kamen bei *Elsdorf (1)/RhE* zutage (Abb. 57). *Vici* sind geschlossene dorfbartige Siedlungen für Handwerker und Händler sowie mit Infrastrukturen - Unterkünfte, Gasthäuser, Pferdewechsel und dergleichen - des Reiseverkehrs. Auch Bäder, Tempel, Märkte oder Einrichtungen der Verwaltung waren hier manchmal anzutreffen. Die Bauern der umliegenden Gebiete konnten hier ihre Erzeugnisse verkaufen und andererseits sich selbst mit Waren versorgen, die sie nicht selbst herstellten, zum Beispiel Keramik, Werkzeuge, Textilien. Die Grundstücke waren lang und streifenförmig und mit der schmalen Seite - den Läden oder Werkstätten - zur Strasse hin orientiert³⁴. In *Elsdorf (1)* zeichnen sich mehre-

³⁴ Zu *vici*: U. Heimberg, Siedlungsstrukturen in Niedergermanien. Jülicher Geschichtsblätter 67/68, 1999/2000, 189-240; Elsdorf: 215 Abb. 15. - Zum Tempel: A.-B. Follmann-Schulz, Die römischen Tempelanlagen in der Provinz Germania Inferior. ANRW II 18,1 (Berlin/New York 1986) 672-793; 721 Taf. III 2.

re Streifenhäuser in negativen Bewuchsmerkmalen ab sowie ein Tempel und ein Gebäudefragment positiv als Ausbruchsrampen.

Ein zweiter Tempel oder ein Grabbezirk nahe der Strasse Köln-Heerlen ist wahrscheinlich bei *Engelsdorf (2)/ Dü* erhalten (Abb. 17).

4.1.4 Eine Straßenstation

Bei *Kenten/RhE* liegen zwei Gebäude (Abb. 63) neben der Fernstraße von Köln nach Heerlen, die vor längerem bereits ergraben wurden. Eine Gebäudegruppe aus zwei steinernen Gebäuden und zwei hölzernen Pfostenbauten an einem diagonal von der Hauptstraße abzweigenden Weg wurde als Straßenstation interpretiert, zu der Remisen, Ställe und einfache Unterkünfte für Reisende gehört haben dürften. Im Luftbild erscheint der größere westliche Steingrundriss und etwa ein Drittel des östlichen Steinfundamentes.

5 Katalog der luftbildarchäologischen Befunde

Kreis Aachen (Aa)

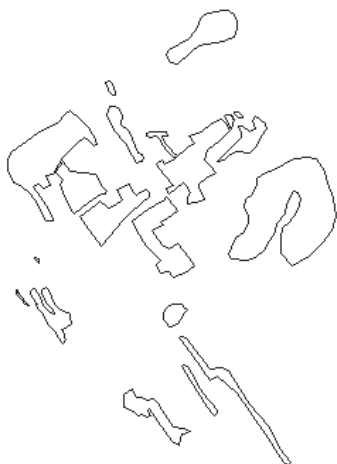


Abb. 7a (A06154 sw) Maßstab 1:3200 Legende Abb. 75

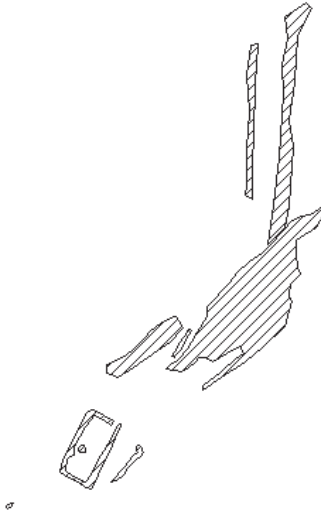


Abb. 7b (A06154 no) Maßstab 1:1600 (Legende Abb. 75)

Aachen - Kreis Aachen (Abb. 7 a b)

Unmittelbar an der niederländischen Grenze nordwestlich des Paulinenhofes kommen Flecken und rechteckige Mauerverläufe auf einer Fläche von mindestens 300 x 200 m zutage. Im Zentrum liegt eine Trümmerstelle mit Scherben und Ziegeln sowie die Fundstelle von etwa 600 römischen Münzen des 2. und 3. Jahrhunderts. Nordöstlich davon sind zwei parallele, nord-südgerichtete Mauern und ein rechteckiges Gebäude von etwa 30 x 12 m als negative Bewuchsmerkmale zu erkennen. Es ist schwierig, die sehr großformatigen Spuren zu interpretieren.

Lufbildarchäologischer Befund **A06154** (letzter Befund vom 10. 6. 86); Ortsakten 821/001. - Bonner Jahrb. 195, 1995, 502 (Luftbild).

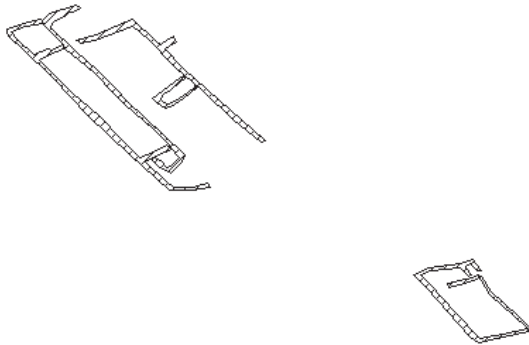


Abb. 8 (A062052) Maßstab 1:800 (Legende Abb. 75)

Broichweiden - Würselen, Kreis Aachen (Abb. 8)

Am Südostrand von Würselen bei Broichweiden liegen das Wohnhaus und ein Nebengebäude eines römischen Gehöftes. Das Wohnhaus ist bereits ausgegraben, es stimmt ziemlich gut mit dem Luftbild überein; durch die schräge Aufnahme sind die Maße leicht überlängt. Zudem kamen zahlreiche Pfostenlöcher parallel zu den Längsmauern und in der Mitte zutage, die J. Slofstra als zweischiffiges Wohnstallhaus interpretierte, das als Vorläufer des Steingebäudes gelten kann.

Das rechteckige Nebengebäude im Südosten ist nicht ergraben; an der nördlichen Schmalseite sind zwei Räume abgetrennt.

Luftbildarchäologischer Befund **A062052** (letzter Befund vom 21. 4. 60); Ortsakten 826/001. - U. Heimberg, Römische Ausgrabungen - Eine Villa bei Würselen. Bonner Jahrb. 177, 1977, 577 ff. - Heimberg, Villen Abb. 10. 23. - J. Slofstra, Changing settlement systems in the Meuse-Demer-Scheldt area during the early roman period. In: N. Roymans, F. Theuws (Hrsg.), Images of the Past. Studies Pre- and Protohist. 7 (Amsterdam 1991) 131 ff.

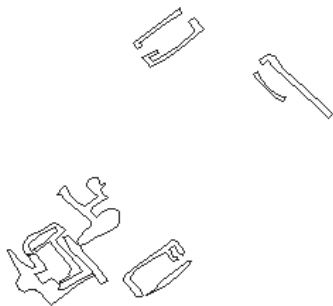


Abb. 9 (A06390) Maßstab 1:1600 (Legende Abb. 75)

Erberich - Eschweiler, Kreis Aachen (WW 80) (Abb. 9)

Anhand von hellen Bodenverfärbungen sind am Nordrand von Erberich ein quadratisches Gebäude von gut 25 m Seitenlänge mit Innengliederung und weiteren Maueransätzen dokumentiert worden; dicht dabei ist ein noch 25 x 10 m großes langrechteckiges Gebäude mit einem kleinen Eckraum zu sehen, etwas entfernt im Nordosten ein entsprechender Grundriss und ein langschmales 35 x 10 m messendes Gebäude. Nach dem Luftbild angesetzte Grabungen hatten allerdings keine Ergebnisse, Baubefunde waren nicht mehr vorhanden. Nur die Untersuchung eines Brunnens brachte reiche archäologische, botanische und zoologische Ergebnisse.

Luftbildarchäologischer Befund **A06390** (letzter Befund vom 4. 2. 85); Ortsakten 1004/028. - Bonner Jahrb. 188, 1988, 410 (Mauern, Pfeiler/Säulenfundamente). - W. Gaitzsch u.a., Archäologische und naturwissenschaftliche Beiträge zu einem römischen Brunnensediment aus der rheinischen Lößbörde. Bonner Jahrb. 189, 1989, 225-283; 232 ff. Abb. 5 (Prospektionsfunde, Besiedlung Mitte 1. – 4. Jahrhundert).



Abb. 10 (A061112a) Maßstab 1:800 (Legende Abb. 75)

Weisweiler Friedhof - Eschweiler, Kreis Aachen (Abb. 10)

Nordwestlich von Haus Paland zeichnen sich zwei kleine rechteckige Baukomplexe mit schmalen Raumeinteilungen ab, deren römische Zeitstellung eine Prospektion im Bereich der Friedhofserweiterung bestätigt hat. Die Fragmente sind nicht zu interpretieren.

Luftbildarchäologischer Befund **A061112a** (letzter Befund vom 13. 6. 82); Ortsakten 891/002; 004. - Bonner Jahrb. 167, 1967, 458 (römische Mauern, Ziegel mit Mörtel); 189, 1989, 395 f. (Keramik 2./3. Jh.).

Kreis Düren (Dü)



Abb. 11 (A03444) Maßstab 1:800 (Legende Abb. 75)

Altdorf (1) - Inden, Kreis Düren (Abb. 11)

Nordwestlich von Altdorf kommen als helle Flecken und Linien negativer Bewuchsmerkmale Fragmente eines etwa 35 m breiten Gebäudes zum Vorschein, allerdings etwas unscharf. An der Südwestecke könnte sich eine Portikus oder ein schmaler Nebenraum abzeichnen. Eine andere Mauer weiter nördlich müsste eine Innenwand sein, die beiden Flecken könnten Fußbodenestriche andeuten oder den Schutt über einem Keller. Das Fragment wäre einem kleinen Wohnhaus zuzuordnen oder auch einem Wirtschaftsbau.

Luftbildarchäologischer Befund **A03444** (letzter Befund vom 2. 8. 84); Ortsakten 1057/011. - R. Zantopp, Römische Siedlungsstellen - durch Luftbildarchäologie gefunden. Arch. Rheinland 1988, 61 ff. Abb 27.

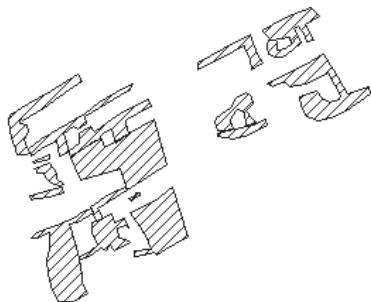


Abb. 12 (A06145) Maßstab 1:800 (Legende Abb. 75)

Altdorf (2) - Inden, Kreis Düren (WW 118) (Abb. 12)

Nordwestlich von Altdorf auf dem westlichen Hochufer der Inde sind auf einer Fläche von etwa 70 x 40 m die Reste eines Villenwohnhauses zu erkennen. Die negativen Bewuchsmerkmale zeichnen vor allem an der Westseite große Schuttflächen nach. Prospektionsfunde ergeben eine Datierung vom späteren 1. bis ins 4. Jahrhundert. Schon früher ist dort die Schuppensäule eines Jupiterdenkmals entdeckt worden. Das Wohnhaus und einige Wirtschaftsgebäude sind inzwischen ausgegraben, aber noch nicht publiziert.

Das Wohnhaus ist 65 m breit und fast 40 m tief. Im westlichen Teil befinden sich die Wohnräume, die Raumfluchten in der östliche Hälfte scheinen um einen Innenhof angeordnet zu sein. Vorspringende Eckräume und Portiken auf allen Seiten ergeben eine stattliche Anlage. Zwei schräge Linien im Norden könnten Wasserkanäle sein.

Der Luftbildbefund ist auch hier mit dem wesentlich differenzierteren Grabungsbefund kaum in Übereinstimmung zu bringen, zumal die Mauerverläufe im Winkel etwas verschoben sind.

Das Luftbild erfasst nur das Hauptgebäude; ein rechteckiges, 23 x 15 m großes Nebengebäude mit Innenstützen an der Ostseite und ein etwa 15 x 15 m messender Pfostenbau daneben und im Westen sowie mehrere verschieden große Gruben und eine achteckige Spur hinter der Nordwestecke des Wohnhauses sind nicht angedeutet.

Luftbildarchäologischer Befund **A06145** (letzter Befund vom 2. 8. 19984); Ortsakten 1057/018. - R. Zantopp, Römische Siedlungsstellen - durch Luftbildarchäologie gefunden. Arch. Rheinland 1988, 61 ff. - S. Jenter, J.J.M. Wipern, Prospektionsergebnisse von einem römischen Landgut bei Inden. Arch. Rheinland 1998 166 ff. - M. Dodt, B.Päffgen, Das Bad der *villa rustica* bei Inden-Altendorf. Arch. Rheinland 2004, 98 ff. Abb.74. - W. Haberey, BJB 149, 1949, 333 (Trümmerstelle mit Ziegeln, Mörtel, Scherben und dem Fragment einer Schuppensäule).



Abb. 13 (88011) Maßstab 1:800 (Legende Abb. 75)

Arnoldswweiler (1)- Düren, Kreis Düren (Abb. 13)

Zwischen Arnoldswweiler und Hoven zeichnet sich ein annähernd quadratisches 20 x 20 m messendes Gebäude mit Mittelgang und einem schmalen geteilten Seitenraum ab, dessen westliche Hälfte in einer Grabung erfasst wurde; es ist parallel zu einem Bach orientiert, der heute unter der Otto-Brenner-Strasse verläuft. Unmittelbar westlich sind weitere Mauerfragmente zu erkennen.

Luftbildarchäologischer Befund **88011** (letzter Befund vom 4. 5. 90); Ortsakten 896/001. - Bonner Jahrb. 194, 1994, 417 (Kurzbericht der teilweisen Ausgrabung, römische Keramik und Keramik in eisenzeitlicher Tradition).

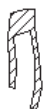


Abb. 14 (85104) Maßstab 1:800 (Legende Abb. 75)

Arnoldswweiler (2) - Düren, Kreis Düren³⁵ (Abb. 14)

Etwa 100 m nordöstlich der vorigen Fundstelle liegt ein langschmaler Bau, der durch eine noch unpublizierte Grabung als ein etwa 20 x 5 m großes Nebengebäude identifiziert wurde. Luftbildarchäologischer Befund **85104** (letzter Befund vom 4. 5. 90); Ortsakten 896/018. - Bonner Jahrb. 190, 1990, 463 (röm. Gebäude im Luftbild, Ziegel, Scherben).

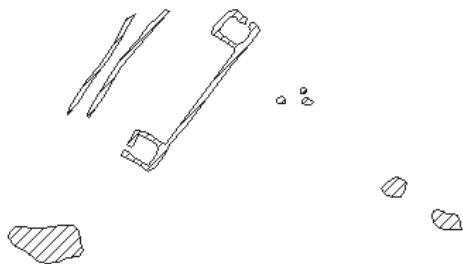


Abb. 15 (A062064) Maßstab 1:800 (Legende Abb. 75)

Echtz - Düren, Kreis Düren (Abb. 15)

Nördlich des Ortes kommen innerhalb einer römischen Trümmerstelle drei parallele Mauerzüge eines 35 x 20 m großen Gebäudes zutage, die Reste eines Hallenhauses. An den östlichen Ecken sind quadratische Räume von 5 m Seitenlänge abgetrennt; der nördliche hat anscheinend einen Eingang von außen, der südliche von innen. Schuttflecken im Süden und Osten deuten weitere Strukturen an.

Luftbildarchäologischer Befund **A062064** (letzter Befund vom 12. 6. 84); Ortsakten 984/004. - Bonner Jahrb. 150, 1950, 152 (Baureste, Scherben); 164, 1964, 526 (Trümmerstelle 80 x 80 m).

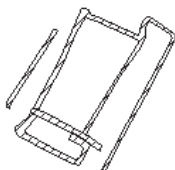


Abb.16 (A062060) Maßstab 1:800 (Legende Abb. 75)

Engelsdorf (1) - Aldenhoven, Kreis Düren (Abb. 16)

Südlich von Engelsdorf liegt im Bereich einer römischen Trümmerstelle ein 33 x 23 m großes Gebäude des Hallentyps mit schmalen Seitenräumen und portikusartigen Gängen an den Langseiten - entweder ein einfaches Wohnhaus oder ein dreischiffiges Wirtschaftsgebäude.

Luftbildarchäologischer Befund **A062060** (letzter Befund vom 30. 6. 84); Ortsakten 1106/024; 027; 033. - Bonner Jahrb. 107, 1910, 290 f. (Mauern, Ziegel, Kanal mit Wasserputz); 193, 1993, 310 (Luftbild).

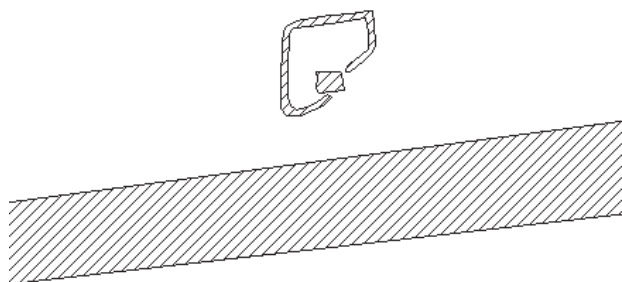


Abb. 17 (A06648) Maßstab 1:800 (Legende Abb. 75)

Engelsdorf (2) – Aldenhoven, Kreis Düren (Abb. 17)

Nordwestlich von Engelsdorf sind anhand negativer Bewuchsmerkmale eine breite Strassen-trasse - wohl ein Stück der römischen Fernstrasse Köln-Heerlen - dokumentiert worden und ein schmaler, diagonal dazu verlaufender neuzeitlicher Weg, der in der Tranchotkarte (Blatt 77) von 1805 erscheint. Im Bereich einer römischen Trümmerstelle ist ein 20 m breites Mau-erquadrat zu erkennen, dessen Südostecke diagonal abgeschnitten erscheint; eine 3,5 x 5 m grosse Fläche liegt in der Maueröffnung. So nah an der Strasse gelegen handelt es sich mög-licherweise um eine kleine Tempelanlage oder um einen Grabbezirk.

Luftbildarchäologischer Befund **A06648** (letzter Befund vom 21. 8. 84); Ortsakten 1159/013.

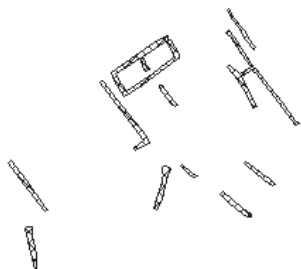


Abb. 18a (A062053) Maßstab 1:800 (Legende Abb. 75)

Froitzheim (1) - Vettweiß, Kreis Düren (Abb. 18a)

Bei einer römischen Trümmerstelle kommen auf einer Fläche von gut 150 x 150 m Mauern und Raumteile mehrerer Gebäude zutage. Im Nordwesten könnten sich die Reste eines groß-formatigen Wohnhauses von 130 m Länge abzeichnen. Im Westteil erscheinen größere und kleinere Räume und an der Seite vielleicht ein mit Wandelgängen eingefasster Hof oder Gar-ten, auf dessen Ostecke möglicherweise von Südosten ein Graben, eine Wasserzu- oder Ab-leitung trifft.

Luftbildarchäologischer Befund **A062053** (letzter Befund vom 2. 7. 68); Ortsakten 562/006. - Vgl. L.H. Barfield, Ein Burgus in Froitzheim, Kreis Düren. Rhein. Ausgr. 3 (Düsseldorf 1968) 9 Abb. 1.

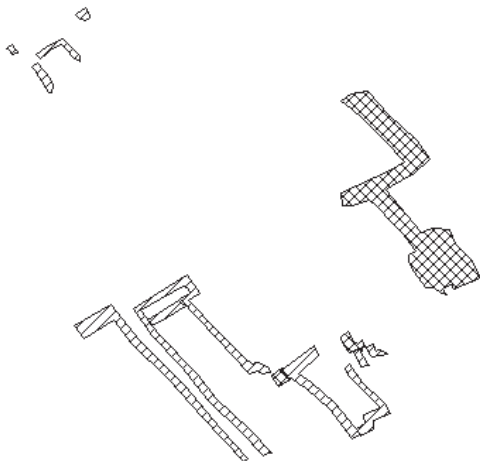


Abb. 18b (A062080) Maßstab 1:800 (Legende Abb. 75)

Froitzheim (2) - Vettweiß, Kreis Düren (Abb. 18b)

Das Gebäudefragment hat dieselbe Orientierung wie (1), es könnte sich um die Ostseite des Wohnhauses mit mehreren Räumen verschiedener Größe handeln. Zwischen beiden Gebäudefragmenten klafft eine Lücke von rund 40 m.

Luftbildarchäologischer Befund **A062080** (letzter Befund vom 5. 7. 67); Ortsakten 562/006.

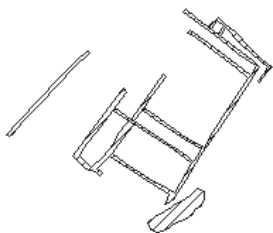


Abb. 19 (85091) Maßstab 1:800 (Legende Abb. 75)

Froitzheim (3) - Vettweiß, Kreis Düren (Abb. 19)

Im Südosten des mutmaßlichen Wohnhauses erscheint ein Wirtschaftsgebäude von 40 x 20 m, ein Rechteck mit vorgelagertem Gang und drei schmalen Querräumen.

Luftbildarchäologischer Befund **85091** (letzter Befund vom 26.5.85); Ortsakten 562/018.

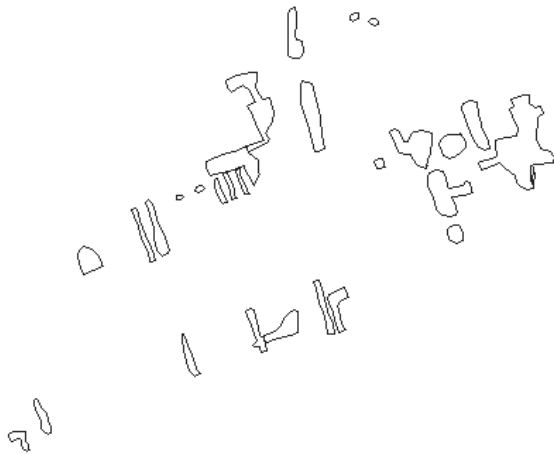


Abb. 20 (90212) Maßstab 1:1600 (Legende Abb. 75)

Bolzheim - Merzenich, Kr. Düren (Abb. 20)

Nördlich von Golzheim erscheinen zu beiden Seiten einer großen hellen Fläche auf einer Länge von gut 220 m viele parallele Mauerzüge und verschiedene breitere Mauerwinkel, die jedoch kein klares, architektonisch strukturiertes Gefüge erkennen lassen. Die Ausrichtung entspricht der heutigen Feldvermessung. Wenn eine antike Datierung infrage kommt, wäre am ehesten an einen achsialen Hof zu denken.

Luftbildarchäologischer Befund **90212** (letzter Befund vom 10. 10. 190); Ortsakten 960; in der

Nähe liegt die römische Trümmerstelle 969/008; vgl. Hinz, Kreis Bergheim 222 Buir Nr. 26.

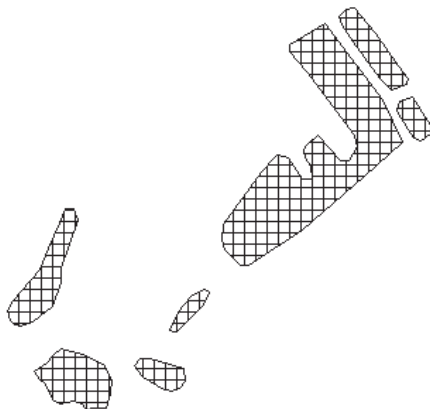


Abb. 21a (A061613a) Maßstab 1:800 (Legende Abb. 75)

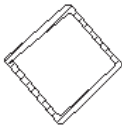
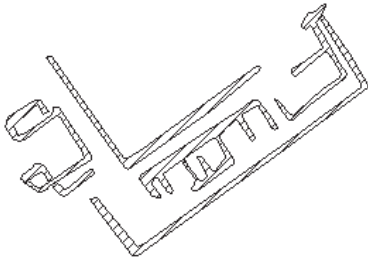


Abb. 21b (A061613b) Maßstab 1:800 (Legende Abb. 75)

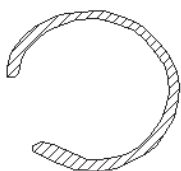
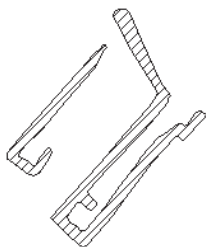


Abb. 21c (A061614) Maßstab 1:800 (Legende Abb. 75)

Kelz (1) - Vettweiss, Kreis Düren (Abb. 21 a,b,c)

Östlich der Ortschaft zeichnen sich zu beiden Seiten eines neuzeitlichen, aber in der Tranchotkarte vermerkten Weges verschiedene Baustrukturen ab.

Im Norden erscheint ein etwa 55 m breites Villenwohnhaus, eine rings mit Portiken eingefasste Reihe verschieden großer Räume; davon zweigt ein etwa 25 m langer Westflügel nach Norden ab mit weiteren Räumen, zu dem ein östliches Pendant sich allerdings nicht abzeichnet. Es ist das repräsentative Herrenhaus eines größeren Gutes.

Ein quadratischer und gleich orientierter Bau von etwa 17 m Seitenlänge vor der Südwestecke ist wohl ein Nebengebäude. Andere Wirtschaftsbauten sind nicht zu sehen.

Südöstlich davon in 300 m Entfernung und nicht ganz parallel dazu liegt ein knapp 40 m breites und 25 m tiefes Wohnhaus, eine einfache Halle mit zwei kleinen Seitenräumen, einer Portikus und Eckrisaliten. Es könnte das Wohnhaus eines kleineren Gehöftes sein, vielleicht das eines Pächters, der einen Teil des zur großen Villa gehörenden Gutes bearbeitet - eine für das Rheinland bisher einmalige Konstellation.

In gut 400 m Abstand von der großen Villa und fast in seiner Flucht zeichnet sich eine kreisrunde Anlage von 35 m Durchmesser ab, eine Mauer, die vielleicht einen Grabhügel einfasste - auch das eine im Rheinland seltene Grabform.

Luftbildarchäologischer Befund **A061613 A. B** und **A061614** (letzte Befunde: 9. 7. 73 bzw. 16. 7. 92); Ortsakten 665/047; 666/010. - Tranchotkarte von 1807/08 Blatt 90. - Bonner Jahrb. 168, 1968, 466 (Trümmerstelle 80 x 80 m, Keramik 2./3. Jh.); 200, 2000, 560 (Luftbild); 201, 2001, 434 (Luftbild).

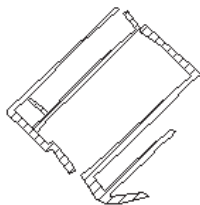


Abb. 22 (A062071a) Maßstab 1:800 (Legende Abb. 75)

Kelz (2) - Vettweiß, Kreis Düren (Abb. 22)

Nördlich von Kelz kommt im Bereich einer dichten Ziegel- und Scherbenstreuung ein etwa 30 x 25 m messendes Gebäude zutage, wahrscheinlich ein einfaches Wohnhaus ohne Risalite, vielleicht auch ein größeres Wirtschaftsgebäude; an die rechteckige Halle sind an beiden Langseiten Gänge oder Galerien angebaut, an der Westecke ist ein kleiner Raum abgetrennt; die schräge Linie zur Südecke könnte eine Wasserleitung sein.

Luftbildarchäologischer Befund **A062071a** (letzter Befund vom 8. 5. 68); Ortsakten 722/020. - Bonner Jahrb. 138, 1933, 170 (Mauern, Hypokausten, Wandputz mit Pflanzendekor, Keramik, Torso einer stehenden Gewandfigur); 176, 1976, 415f. (Trümmerstelle, Dachziegel, Tubuli, Keramik, Glas, Schlacken, Eisen-, Bronze-, Bleiteile, Spinnwirtel, Webgewicht, Mühlstein).

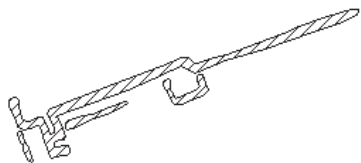


Abb. 23 (A062071b) Maßstab 1:800 (Legende Abb. 75)

Kelz (3) - Vettweis, Kreis Düren (Abb. 23)

Innerhalb einer dichten römischen Ziegel- und Scherbenstreuung zeichnen sich einige Mauerzüge ab: in der Mitte ein etwa 35 m breites Gebäude, anscheinend eine in Längsrichtung zweigeteilte Portikus mit einem schmalen Gang an der Westseite, möglicherweise eine Kellertreppe; außerdem sind normale Räume an den Seiten und ein schmaler langer Raum nördlich der Portikus erhalten. Die 20 bis 30 m langen Mauern auf beiden Seiten könnten eine Hofbegrenzung gewesen sein kann - eventuell die Querteilung eines achsialen Gehöftes? Das Wohnhaus wäre in diesem Fall allerdings sehr klein.

Luftbildarchäologischer Befund **A062071b** (letzter Befund vom 8. 5. 68); Ortsakten 722/029. - Bonner Jahrb. 138, 1933, 169 (Mauern, Hypokausten, Wandputz mit Pflanzenmotiven, Keramik, Glas, Glocke); 169, 1969, 499 f. (Säulenfragment).

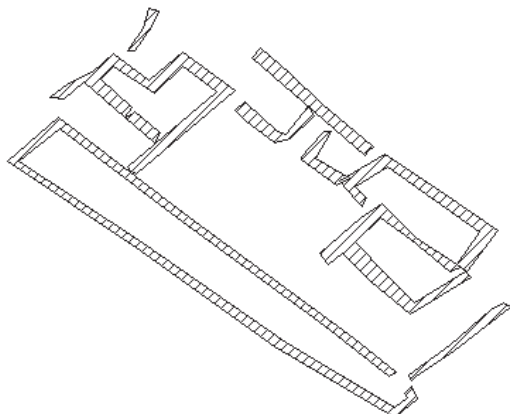


Abb.24 (A062070) Maßstab 1:800 (Legende Abb. 75)

Kelz (4) – Vettweiß, Kreis Düren (Abb. 24)

Östlich von Kelz liegt innerhalb einer römischen Trümmerstelle ein etwa 90 x 45 m großer Baukomplex, sicherlich das großformatige Wohnhaus eines repräsentativen Gutshofes: eine Portikus im Süden, in der Mitte vielleicht ein Hof, an den Rändern verschiedene rechteckige und abgewinkelte Räume.

Luftbildarchäologischer Befund **A062070** (letzter Befund vom 2. 7. 68); Ortsakten 666/009. Bonner Jahrb. 148, 1948, 392 (Dachziegel, Keramik)..

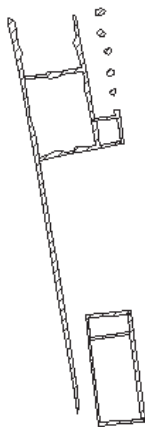


Abb. 25 (A03286) Maßstab 1:800 (Legende Abb. 75)

Kirchberg (1) - Jülich, Kreis Düren (WW 112) (Abb. 25)

Die sehr klare Luftaufnahme zeigt einen langrechteckigen, etwa 30 x 12 m messenden zweigeteilten Bau mit 5 m breitem, vorspringendem Eckraum im Südosten und der anschließenden Stützenreihe einer Galerie. Die Rückwand setzt sich als Gehöftgrenze nach Süden fort, wo ein weiteres langrechteckiges 20 x 8 m großes Nebengebäude mit abgetrenntem Raum an der nördlichen Schmalseite erscheint.

Magnetometrische und geoelektrische Messungen und zuletzt auch schon mehrjährige Ausgrabungen haben die Nordwestecke eines römischen Gehöftes erfasst. Das Objekt der Luftaufnahme hat sich als *horreum* erwiesen, als Getreidespeicher mit Schwebeboden auf Suspensurapfeilern, dem der östliche Säulengang wohl in einer späteren Bauphase angefügt wurde. Der Speicher ist im 4. Jahrhundert mit einem im Luftbild nicht erkennbaren Spitzgraben wie ein Burgus befestigt worden. Weitere Gebäude schließen sich im Nordosten an.

Ein historischer Straßenverlauf im Norden ist auch in der Tranchotkarte (Blatt 78) von 1806/7 verzeichnet.

Luftbildarchäologischer Befund **A03286** (letzter Befund vom 29. 6. 95); Ortsakten 1056/001.

- S. Jenter, J.J.M. Wippert, Prospektionsergebnisse von einer römischen *villa rustica* bei Kirchberg. Arch. Rheinland 1996, 177 ff. - Die Grabungen von B. Paffgen sind noch unpubliziert. - *Horreum*: Heimberg, Villen 121 Abb. 46.

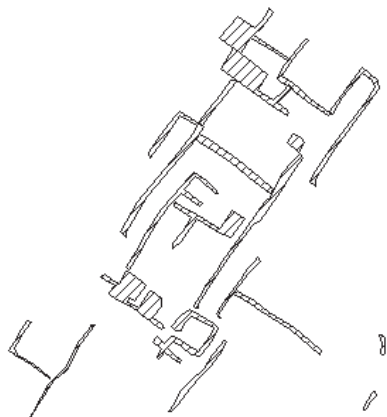


Abb. 26 (A061887) Maßstab 1:800 (Legende Abb. 75)

Kirchberg (2) - Jülich, Kreis Düren (Abb. 26)

Westlich von Kirchberg zeichnet sich sehr klare Spuren eines 90 x 35 m messendes Villenwohnhauses ab mit vielen größeren und kleineren Räumen und Galerien an den Langseiten; mehrere Schuttflecken könnten beheizte Räume andeuten.

Luftbildarchäologischer Befund **A061887** (letzter Befund vom 25. 5. 93); Ortsakten 1108/005. - Bonner Jahrb. 168, 1968, 467 (Trümmerstelle, Hypokaustenziegel); 170, 1970, 401 (Dachziegel, Bruchsteine, eisenzeitl. Napoleonshut).

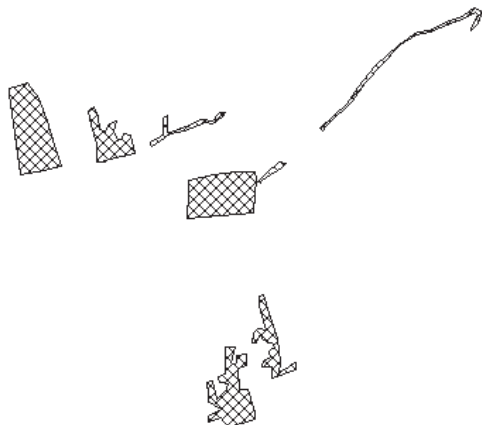


Abb. 27 (92107) Maßstab 1:800 (Legende Abb. 75)

Koslar - Jülich, Kreis Düren (Abb. 27)

Am südlichen Rand von Koslar erscheinen an Hand positiver Bewuchsmerkmale mehrere große, teils rechteckige (12 und 17 x 8 m), teils etwas ausgefranst wirkende Gruben sowie ein gut 50 m langer und ein kurzer Graben. 1989 wurden an dieser Stelle römische Baureste gefunden, die allerdings eine Interpretation der Gruben nicht ermöglichen.

Luftbildarchäologischer Befund **92107** (letzter Befund vom 16. 7. 92); Ortsakten 1160/014; 024.

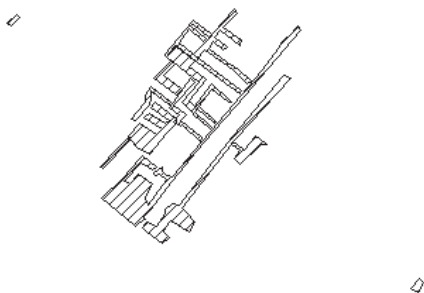


Abb. 28 (A062063) Maßstab 1:800 (Legende Abb. 75)

Luchem - Langerwehe, Kreis Düren (Abb. 28)

Westlich von Luchem sind auf einer Fläche von 50 x 25 m zahlreiche Mauerzüge und flächige Versturzspuren (Hypokausten oder Keller) eines in viele kleine Räume und schmale Gänge aufgeteilten Gebäudes zu erkennen, dessen Ostseite offenbar eine Portikus einnimmt. Es handelt sich deshalb sicher um das Wohnhaus eines römischen Gutes, dessen Fassade mehr als 50

m breit war. Die kleinteilige Innengliederung mag den spätantiken Zustand spiegeln, als man größere Hallen oft zur gewerblichen Nutzung aufteilte.

Luftbildarchäologischer Befund **A062063** (letzter Befund vom 14. 4. 68); Ortsakten 892/011. Bonner Jahrb. 209, 2009 301

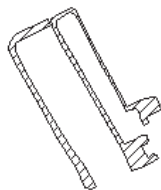


Abb. 29 (84220) Maßstab 1:800 (Legende Abb. 75)

Lüxheim - Vettweis, Kreis Düren (Abb. 29)

Zwischen Lüxheim und Kelz liegt ein langrechteckiges, noch 33 x 15 m messendes Gebäudefragment - die südliche Schmalseite zeichnet sich nicht ab - mit vorgelegtem Gang, der an der Südostecke in einer Schuttfläche endet. Davor knickt die Außenwand nach Osten ab. Es handelt sich wohl um ein Wirtschaftsgebäude.

Daneben zeichnet sich ein historischer Weg ab, den auch die Tranchotkarte wiedergibt. Luftbildarchäologischer Befund **84220** (letzter Befund vom 7. 8. 84); Ortsakten 666/021. - Tranchotkarte (1807/08) Blatt 90.

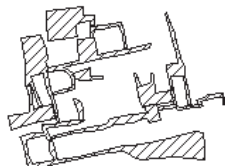


Abb. 30 (A062065) Maßstab 1:800 (Legende Abb. 75)

Merzenich - Kreis Düren (Abb. 30)

Südwestlich von Merzenich zeichnen sich die Spuren eines gut 40 m breiten und 30 m tiefen Villenwohnhauses ab, das zum Reihentypus gehörte. Der westliche Risalit ist ganz erhalten, vom östlichen nur die Nordwand, dazwischen liegt die Portikus. Der quadratische Hauptraum dahinter mit kleineren Nebenräumen wird von schmalen Seitengängen eingefasst. Anbauten an der Rückseite mit mehreren Versturzfällen deuten vielleicht ein Bad an.

Luftbildarchäologischer Befund **A062065** (letzter Befund vom 13. 5. 68); Ortsakten 838/002. - Bonner Jahrb. 148, 1948, 398 (Keramik, Bauschutt).

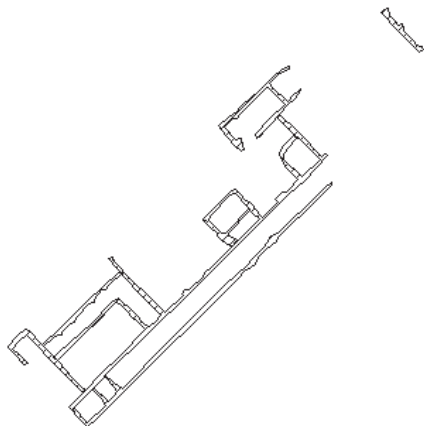


Abb. 31 (93RA031) Maßstab 1:800 (Legende Abb. 75

Pier - Inden, Kreis Düren (Abb. 31)

Nördlich von Pier liegt am Rand der westlichen Niederterrasse der Rur und im Bereich einer Trümmerstreuung mit Keramik des 2./3. Jahrhunderts ein langgestreckter Gebäudekomplex. Parallele Mauerzüge an der südöstlichen Langseite und der westlichen Schmalseite sehen aus wie die Galerien eines Villenwohnhauses. Die nordwestliche Außenmauer ist im Luftbild nicht erhalten. Das mit Wandpfeilern versehene Mauerfragment im Nordosten kann die Schmalseite des Hauses sein oder eine gegen das Flusstal (heller Streifen) verstärkte Grenzmauer des Gehöftes. Das Wohnhaus war 80 bis 100 m lang und mindestens 25 m breit und gehörte damit zu den größten Beispielen in Niedergermanien. Ob die Portikus die Fassade oder die Rückseite bezeichnet, ist ungewiss. Zwei Wandverstärkungen vor dem kleinen, zentral gelegenen und quergeteilten Raum akzentuierten vielleicht einen Eingang, der zum repräsentativen Mittelsaal führte. In der Südostecke könnte ein von dem abgewinkelten Korridor gerahmter Garten gewesen sein. Im Nordostteil ist ein größerer Raum von mehreren kleinen umgeben.

Lufbildarchäologischer Befund **93RA031** (letzter Befund vom 9. 6. 93); Ortsakten 1007/011. - Geologisches Landesamt NRW: Bodenkarte von NRW 1 : 50000. - J. Riederer, Konservieren und Restaurieren in Deutschland (Internationes Bonn 1993). - R. Zantopp, Methode und Möglichkeiten der Luftbildarchäologie im Rheinland. Forschungen zur Archäologie im Land Brandenburg 3, 1995, 155-164. - Bonner Jahrb. 195, 1995, 508 (Keramik).

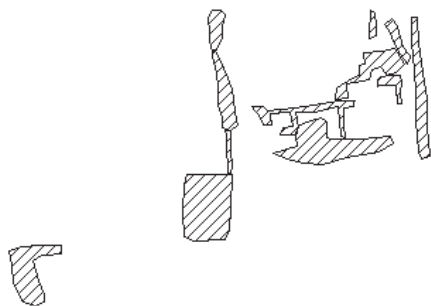


Abb. 32 (A061726) Maßstab 1:800 (Legende Abb. 75

Pingsheim, Nörvenich - Kreis Düren (Abb. 32)

Südlich von Pingsheim zeichnen sich Mauerzüge und Schuttflächen ab, die wegen der Innengliederung in verschieden große Räume sicherlich zu einem west-östlich orientierten, 50 x 45 m großen Wohnhaus gehörten; die südwestliche Schuttfläche könnte einen Risaliten mit Keller andeuten. Weiter westlich ist noch ein Mauerwinkel zu erkennen.

Luftbildarchäologischer Befund **A061726** (letzter Befund vom 21. 6. 65); Ortsakten 785/002; 003). - Bonner Jahrb. 170, 1970, 408 (dichte Scherbenstreuung 2./3. Jh., Ziegel, Estrich, Sandstein); 201, 2001, 427 (Luftbild).

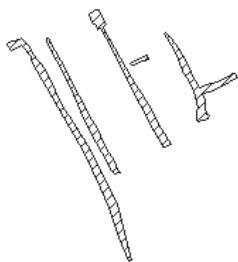


Abb.33 (97006a) Maßstab 1:800 (Legende Abb. 75

Poll - Nörvenich, Kreis Düren (Abb. 33)

Südlich von Poll dokumentieren negative Bewuchsmerkmale mehrere parallele Mauern zwischen 20 und 50 m Länge, dazwischen zwei kurze Mauern als Querteilungen. Sie könnten die Längsmauern eines mittelformatigen römischen Villenwohnhauses andeuten: eine schmale Portikus und mehrere Raumfluchten von je 10 m Tiefe.

Luftbildarchäologischer Befund **97006A** (letzter Befund vom 23. 4. 1997; Ortsakten 724/035. - Bonner Jahrb. 199, 1999, 452 (Luftbild).

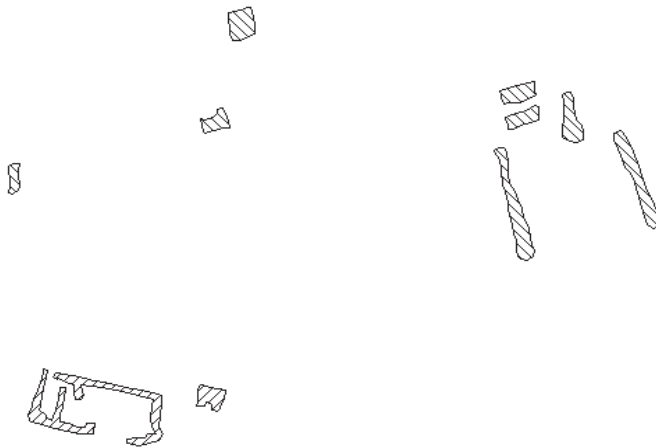


Abb. 34 (84173a) Maßstab 1:800 (Legende Abb. 75)

Rödingen - Titz, Kreis Düren (Abb. 34)

Nördlich von Rödingen dokumentiert das Luftbild einen länglichen, 25 x 10 m großen Bau mit schmalen Innenräumen an einer westlichen Schmalseite und anscheinend einer breiten Einfahrt in der südlichen Langseite, die eine Remise oder Scheune anzeigen könnte; östlich daneben erscheint eine kleine Schuttfläche von 5 x 5 m.

Luftbildarchäologischer Befund **84173a** (letzter Befund vom 30. 6. 84; Ortsakten 1327/003.

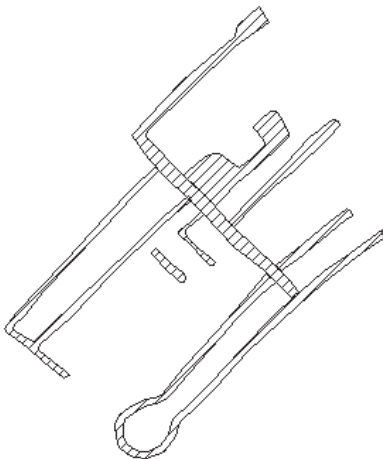


Abb. 35 (A06389) Maßstab 1:800

Schleiden - Aldenhoven, Kreis Düren (Abb. 35)

Nördlich von Schleiden liegt im Bereich einer umfangreichen römischen Trümmerstelle der Rest eines großen Gebäudekomplexes. Er ist schon länger bekannt und auch ergänzt worden. Die vorliegende Aufnahme unterscheidet sich von der älteren durch einen nach Westen vorspringenden Mittelteil, während der westliche Seitenflügel fehlt. Der ovale Raum der Südecke ist früher als Dreipass gesehen worden, der die spätantike Nutzung bestätigte. Auch die Innengliederung ist etwas anders. Das Gebäude mit Seitenflügeln gehört mit mindestens 100 m breiter Fassade zu den größten Villenwohnhäusern des Rheinlandes.

Luftbildarchäologischer Befund **A06389** (letzter Befund vom 2. 7. 68); Ortsakten 1053/002. - Bonner Jahrb. 174, 1974, 460 (Marmorplatten, Hypokaustenziegel). - Schleiden: L. Blum, Römische Alterthümer bei Schleiden. Bonner Jahrb. 16, 1851, 81 Taf. 3. - K.-H. Lenz, Siedlungen der römischen Kaiserzeit auf der Aldenhovener Platte. Rhein. Ausgr. 45 (Köln/Bonn 1999) 120 Nr. 15 Abb. 12. - Heimberg, Villen Abb. 31.

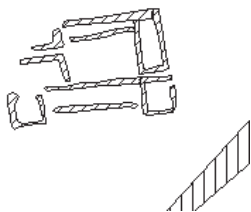


Abb. 36 (A061362a) Maßstab 1:800 (Legende Abb. 75)

Titz-Ameln - Kreis Düren (Abb. 36)

Östlich des Ortes Ameln kommen im Bereich einer römischen Trümmerstelle die klaren Spuren eines 33 m breiten und 20 m tiefen Villenwohnhauses mit Portikus und seitlich eingebundenen Risaliten zutage, das ursprünglich wohl zum Hallentypus gehörte und eventuell in ein Haus des Reihentyps umgebaut wurde. An beiden Seiten und an der Rückwand sind Räume abgeteilt.

Diagonal dazu ist ein neuzeitlicher Weg zu erkennen, der mit der Tranchotkarte von 1806/07 datiert werden kann.

Luftbildarchäologischer Befund **A061362a** (letzter Befund vom 28. 6. 65); Ortsakten 1383/004. - Bonner Jahrb. 199, 1999, 455 (Luftbild).



Abb.37 (88018) Maßstab 1:800 (Legende Abb. 75)

Wissersheim - Nörvenich, Kreis Düren (Abb. 37)

Zwischen Wissersheim und Pingshein machen helle Bodenverfärbungen einen langrechteckigen, schmalen Grundriss kenntlich, der etwa 70 x 15 m misst. Ein vergleichbares Format hat ein Gebäude in Frimmersdorf 42.

Luftbildarchäologischer Befund **88018** (letzter Befund vom 8. 11. 88); Ortsakten 845/005. - Bonner Jahrb. 200, 2000, 554 (Luftbild). - Heimberg, Villen Abb. 45.

Kreis Euskirchen (Eu)

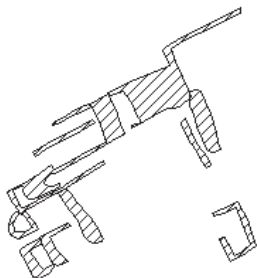


Abb. 38 (A062079) Maßstab 1:800 (Legende Abb. 75)

Arloff - Münstereifel, Kreis Euskirchen (Abb. 38)

Östlich von Arloff zeichnen sich bei einer römischen Trümmerstelle mit Estrichresten und farbigem Wandputz Mauerzüge und Räume eines mindestens 60 x 25 m großen Villenwohnhauses ab. Der westliche Flügel hat einen kleinen Apsidenraum, hier könnte das Bad gewesen sein. Die flächigen Spuren mögen Fußböden oder Hypokausten andeuten. Ein rechteckiger Raum vor der Südfront gehörte vielleicht zu einem Garten.

Luftbildarchäologischer Befund **A062079** (letzter Befund vom 29. 6. 75); Ortsakten 289/008. - Bonner Jahrb. 129, 1924, 263 (röm. Villa, Versuchsgrabung: Fundamentmauern, Estrich). 272 (bemalter Wandputz, Reste einer Figur); 148, 1948, 377 (Ziegel, Scherben).

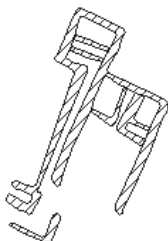


Abb. 39 (RP00201) Maßstab 1:800 (Legende Abb. 75)

Dom-Esch - Euskirchen, Kreis Euskirchen (Abb. 39)

Östlich des Ortes zeichnet sich das mindestens 45 m breite und 23 m tiefe Wohnhaus einer römischen Villa ab: eine Halle mit abgetrennten Eckräumen im Norden und eine nach Westen weisende schmale Portikus zwischen seitlich weit vorspringenden Risaliten mit Innengliederung. Lesefunde stammen aus dem 2./3. Jahrhundert.

Luftbildarchäologischer Befund **RP00201** (letzter Befund vom 11. 7. 67); Ortsakten 480/004. Bonner Jahrb. 209 2009 300

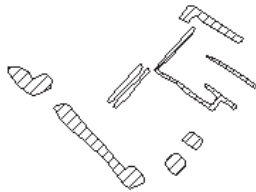


Abb. 40 (A062074) Maßstab 1:800 (Legende Abb. 75)

Gehn - Mechernich, Kreis Euskirchen (Abb. 40)

Östlich von Gehn sind auf einer Fläche von 35 x 35 m einige Mauern verschiedener Stärke zu sehen, wahrscheinlich das Grundrissfragment eines römischen Gebäudes. Eine schlüssige Ergänzung ist leider nicht möglich, ein zweigeteilter Wirtschaftsbaus ist wahrscheinlicher als ein Wohnhaus.

Luftbildarchäologischer Befund **A062074** (letzter Befund vom 31. 5. 96); Ortsakten 348/001. Bonner Jahrb. 209, 2009, 301

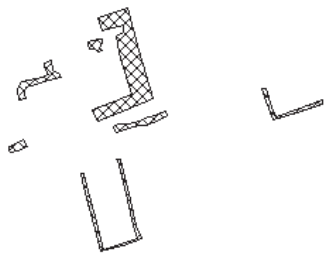


Abb.41 (A062075) Maßstab 1:800 (Legende Abb. 75)

Kleinbüllesheim - Euskirchen, Kreis Euskirchen (Abb. 41)

Nördlich des Ortes zeichnen sich als positive Bewuchsmerkmale, also als Ausbruchsraben, Fragmente von Mauern unterschiedlicher Breite ab, eventuell Reste mehrerer Räume oder Häuser, die jedoch keinen schlüssigen Grundriss ergeben.

Luftbildarchäologischer Befund **A062075** (letzter Befund vom 23. 4. 97); Ortsakten 479/008 Bonner Jahrb. 209, 2009, 300

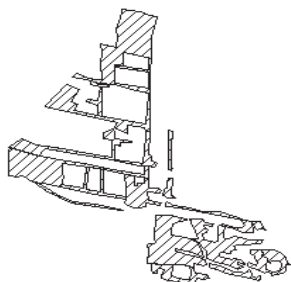


Abb. 42 (A062050) Maßstab 1:800 (Legende Abb. 75)

Kreuzweingarten - Euskirchen, Kreis Euskirchen (Abb. 42)

Westlich von Kreuzweingarten zeichnen sich Reste eines 60 x 50 m großen Gebäudes ab, das nord-südlich ausgerichtete Wohnhaus einer römischen Villa mit einem weit nach Osten vorspringenden Südflügel, vielleicht das Bad. Eine abgewinkelte Portikus verbindet beide.

Vom Wohnhaus ist wohl nur der südliche Teil zu sehen. Neben der Portikus im Osten liegt eine Reihe verschieden großer Räume. Der Wohntrakt besteht aus einer nach Westen weisenden Raumflucht in der Mitte und eine von Gängen gerahmte im Süden; die schmale äußere Portikus geht in den nördlichen Gang des Flügels über; dessen flächige Mauerverstürze zeigen vielleicht vertiefte Räume an, die zu einem Bad gehört haben könnten, während die Schuttflächen im Haupthaus vielleicht Heizräume oder Keller andeuten. Wenn ein entsprechender Nordflügel ergänzt würde, handelt es sich um ein großformatiges Herrenhaus mit mindestens 80 m breiter Front, ohne diesen wäre es ein Gebäude des Mittelformates.

Luftbildarchäologischer Befund **A062050** (letzter Befund vom 31. 7. 83); Ortsakten 317/008. - Bonner Jahrb. 146, 1941, 319 (Mauerzüge eines großen Gebäudes im Wiesengelände sichtbar). - R. Zantopp, Luftbildarchäologie - Neue Konzepte und Ergebnisse der Luftbildarchäologie im Rheinland. Das Rhein. Landesmuseum Bonn 87/1-2, 1-8; 3 Abb. 3.

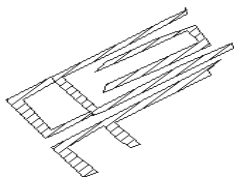


Abb. 43: (92026a) Maßstab 1:800 (Legende Abb. 75)

Mechernich - Kreis Euskirchen (Abb. 43)

Östlich der Achesmer Mühle kommen die Mauerzüge zweier durch einen schmalen Zwischenraum getrennter, langrechteckiger Gebäuden von gut 40 m Länge und zusammen 25 m Breite zutage; bei beiden sind an der westlichen Schmalseite quadratische Räume abgeteilt. Der nördliche Bau erhält mit zwei im Osten verbundenen Längsmauern eine dreischiffige Innengliederung. Im Süden erscheint ein fast quadratischer, 5 x 7 m großer Bau, vor der Westecke ist ein weiterer Mauerwinkel zu sehen. Römische Ziegelbrocken kamen dort schon früher zutage. Es handelt sich vermutlich um die Wirtschaftsgebäude eines römischen Gehöftes.

Luftbildarchäologischer Befund **92026a** (Befunddaten 13. 7. 82 - 9.7. 92); Ortsakten 384/016; 384/011. - Bonner Jahrb. 150, 1950, 152 (Scherben von Grabgefäßen).

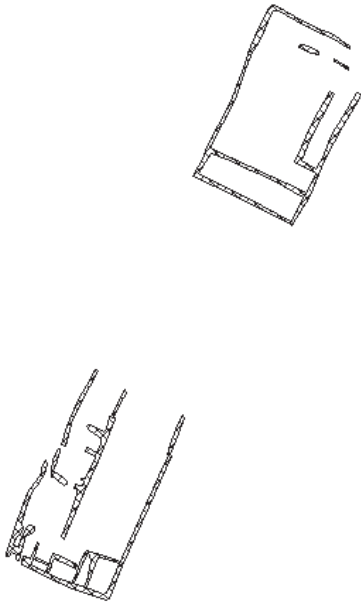


Abb. 44 (A061230) Maßstab 1:800 (Legende Abb. 75)

Obergartzem - Mechernich, Kreis Euskirchen (Abb. 44)

Nördlich von Obergartzem liegt am linken Hang des Bleibaches eine römische Villa des 1. - 4. Jahrhunderts, von der im Luftbild in positiven Bewuchsmerkmalen zwei Gebäude sichtbar werden. Das nördliche gibt sich mit vorspringendem Seitenflügel, einem abgetrennten Raum an der südlichen Schmalseite und einer Portikus als Wohnhaus zu erkennen, dessen südliche Schmalseite beim Bau einer Straße ausgegraben worden ist.

Luftaufnahme und Grabungsplan weichen indessen stark voneinander ab, nur die Außenmaße stimmen überein. Der Grabungsplan ist wesentlich differenzierter; die südliche Innenwand hat keine genaue Entsprechung, daneben erscheinen weitere Räume und an der Westecke ist ein Bad angebaut.

Das zweischiffige Nebengebäude im Süden fluchtet mit dem Wohnhaus; seine kleinteilige Innengliederung ist im Rheinland selten; vermutlich hatte sie spezifische Funktionen in der Landwirtschaft, war vielleicht teilweise auch zum Wohnen geeignet. Vergleiche findet man in der Villa von Nievenheim bei Dormagen.

Luftbildarchäologischer Befund **A061230** (letzter Befund vom 9. 8. 84); Ortsakten 387/007. - Bonner Jahrb. 178, 1978, 718 (Trümmerstelle 40 x 80 m, Ziegel, Keramik); 181, 1981, 540 (Hauptgebäude bei Straßenbau diagonal angeschnitten). - R. Zantopp, Die allmähliche Gefährdung eines Bodendenkmals bei Mechernich-Obergartzem. Arch. Rheinland 1988, 64 ff. - A. Jürgens/Th. Vogt, Eine römische Villa bei Mechernich-Obergartzem. Ausgrabungen im Rheinland '79. Das Rheinische Landesmuseum Bonn, Sonderheft (Köln/Bonn 1980)154 ff. Abb. 129-132. - Heimberg, Villen 119 Abb. 44.

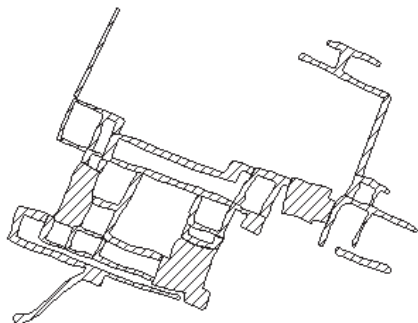


Abb. 45 (A06846) Maßstab 1:800 (Legende Abb. 75)

Stotzheim - Euskirchen, Kreis Euskirchen (Abb. 45)

Östlich der Kerpchesmühle zeichnet sich am südlichen Rand einer bekannten Trümmerstelle ein ungewöhnlich vollständiger Villenbefund ab: ein knapp 45 m breites und 30 m tiefes Wohnhaus mit u-förmiger Portikus und seitlich vorspringenden Risaliten; davor ein etwa 55 x 30 m messender Hof mit weiteren Gebäudespuren - eine im Rheinland bisher ungewöhnliche Disposition. Das Wohnhaus hat einen zentralen, quadratischen Empfangssaal, der an drei Seiten von mehreren Räumen umgeben ist. Die hellen Flecken könnten an der Westseite die Hypokausten eines beheizten Raumes andeuten, an der Ostseite die eines Bades und neben der Nordostecke einen Keller. Die schräge Mauer vor der Südseite könnte eine Wasserzu- oder -ableitung sein.

Weiter im Osten liegt der ebenfalls aus Luftbildern bekannte Burgus von Palmersheim, der sich an der Villa orientiert.

Luftbildarchäologischer Befund **A06846** (letzter Befund vom 15. 7. 94); Ortsakten 354/006; 015; 001. - Bonner Jahrb. 157, 1957, 425 (größere Siedlungsstelle mit Scherben, Ziegeln, Traiansmünze, Säulenfragment); 197, 1997, 310 (Luftbild); 201, 2001, 416 (Luftbild). - G. Gerlach, Ein geschütztes Bodendenkmal. Der spätrömische *burgus* von Palmersheim. Arch. Rheinland 1995, 90 ff.

Kreis Heinsberg (He)

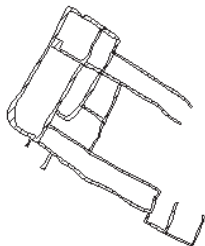


Abb.46 (A061491) Maßstab 1:800 (Legende Abb. 75)

Randerath (1) - Heinsberg, Kreis Heinsberg (Abb. 46)

Zwischen Honsdorf und Randerath wird im Bereich einer lange bekannten Trümmerstelle östlich der Wurm das 50 x 35 m messende Hauptgebäude einer römischen Villa sichtbar: ein fast quadratischer Empfangssaal mit schmalen Räumen vor dem Westflügel, mit Portiken an den Langseiten und zweiräumigen, seitlich bündigen Risaliten wohl an allen vier Ecken. Ein kleiner quadratischer Fleck in der unteren linken Ecke des großen Risalitraumes im Nordwesten könnte eine Herdstelle sein.

Im Norden und Westen zeigt die Luftaufnahme einen auch in der Tranchotkarte von 1805/7, Blatt 67 verzeichneten historischen Wegeverlauf.

Luftbildarchäologischer Befund **A061491** (letzter Befund vom 19. 8. 83); Ortsakten 1432/017; 011; 022. - Bonner Jahrb. 145, 1940, 332 (Mauern, Kiesweg, Ziegel, Tubuli, Scherben, Hypokaustenpfeiler, Mühlstein); 163, 1963, 550 (Scherben, Schlacke, Eisenhammer, weitere Gebäude, runde Struktur/Grab?); 165, 1965, 452 (Trümmerstelle 2./3. Jh.). - I. Scollar, Einige Ergebnisse der archäologischen Luftbildforschung während des Jahres 1962. Bonner Jahrb. 163, 1963, 305-310; Nr. 13.

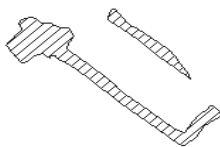


Abb. 47 (84212) Maßstab 1:800 (Legende Abb. 75)

Randerath (2) - Heinsberg, Kreis Heinsberg (Abb. 47)

Südlich von Randerath liegt eine lange bekannte römische Trümmerstelle, in deren Nähe die Luftaufnahme einige Mauern erfasst, einen langrechteckigen, 40 x 15 m messenden Raum mit einem kleinen Anbau an der Westecke.

Luftbildarchäologischer Befund **84212** (Letzter Befund vom 2. 8. 84); Ortsakten 1432/022; 011. - Bonner Jahrb. 145, 1940, 332 (Mauerwerk, Ziegel, Hypokausten, Keramik, Mühlstein, Hufeisen, Nägel); 163, 1963, 550 (Schlacken, Scherben, Steinmetzhämmer); 165, 1965, 452 (Keramik 2./3. Jahrh.).

Kreis Neuss (Ne)

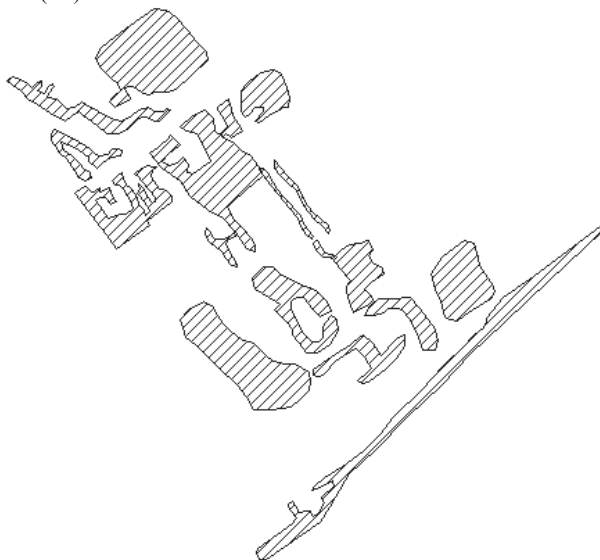


Abb. 48 (91108) Maßstab 1:800 (Legende Abb. 75)

Dormagen - Kreis Neuss (Abb. 48)

Negative Bewuchsmerkmale, vor allem große helle Flecken, bezeichnen westlich von Dormagen auf einer Fläche von gut 90 x 50 m zahlreiche rechtwinklige Mauerzüge eines großen Gebäudes. Ein schlüssiger Grundriss ergibt sich nicht, es könnte sich aber um das großformatige Wohnhaus einer römischen Villa handeln. Die hellen Flecken müssten Schuttflächen sein. 100 m östlich befindet sich eine weitere ausgedehnte Trümmerstelle.

Luftbildarchäologischer Befund **91108** (Befunddaten 2. 8. 91 - 7.8.98); Ortsakten 1756; 1756/003. - Bonner Jahrb. 182, 1982, 484 (Keramik).



Abb. 49 (A061723) Maßstab 1:800 (Legende Abb. 75)

Frixheim - Rommerskirchen, Kreis Neuss (Abb. 49)

Einige Flecken und dicke Linien deuten Mauerfragmente an und Lesefunde des 1. Jahrhunderts sprechen für eine römische Zeitstellung.

Luftbildarchäologischer Befund **A061723** (letzter Befund vom 24. 7. 84); Ortsakten 1632/007. - Bonner Jahrb. 201, 2001, 430 (Luftbild).

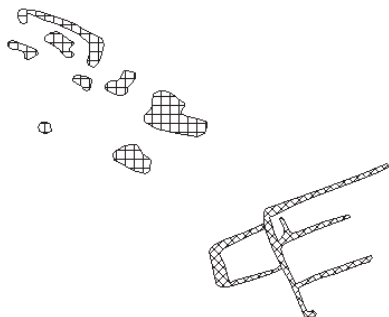


Abb. 50 (A061718) Maßstab 1:800 (Legende Abb. 75)

Korschenbroich - Kreis Neuss (Abb. 50)

Nördlich des Ortes zeichnet sich in positiven Bewuchsmerkmalen von Ausbruchgräben ein fast 30 m breiter und noch 30 m langer dreischiffiger Grundriss mit einem 11 x 15 m großen Anbau an der Westseite ab, wahrscheinlich das Wirtschaftsgebäude eines römischen Gehöftes. Im Norden erscheint ein neuzeitlicher Weg, den auch die Tranchotkarte von 1805/06 (Blatt 43) notiert.

Luftbildarchäologischer Befund **A061718** (letzter Befund vom 10.6.75); Ortsakten 1994/017. - Bonner Jahrb. 201, 2001, 420 (Luftbild). - Zum Gebäudetypus: Heimberg, Villen 114 Abb. 43.

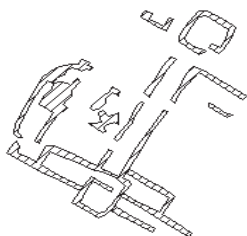


Abb. 51 (A06377) Maßstab 1:800 (Legende Abb. 75)

Nettesheim - Rommerskirchen, Kreis Neuss (Abb. 51)

Südlich von Nettesheim bei Butzbach erscheint sehr deutlich der Grundriss eines Villenwohnhauses von 50 x 35 m, ein Hallentyp mit schmalen Seitenräumen, wenig vorspringenden Risaliten und u-förmiger Portikus. Die Stelle ist inzwischen ausgegraben. Einerseits ergänzt der Grabungsplan die im Luftbild fehlende Nordseite, andererseits zeigt das Foto vor der Portikusfassade noch weitere Mauern und Räume, die möglicherweise einen Hof oder Garten eingrenzten, die von der Grabung aber nicht erfasst wurden.

Luftbildarchäologischer Befund **A06377** (letzter Befund vom 31. 7. 86); Ortsakten 1572/008. - R. Zantopp, Luftbildarchäologie. Rhein. Landesmus. Bonn 1987, 1-8 Abb. 8. - U. Maier-Weber, Ein römischer Gutshof in Nettesheim. Arch.Rheinland 1987 (Köln 1988), 80 Abb. 35. - Diess., Ein römischer Gutshof am Gillbach. Schriftenreihe Kr. Neuss 15 (Köln 1988). - Diess., Bonner Jahrb. 189, 1989, 398 ff. Abb. 19 ff. - Heimberg, Villen Abb. 22. 24.

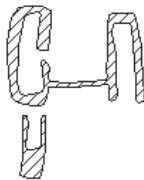


Abb. 52 (A061725) Maßstab 1:800 (Legende Abb. 75)

Rommerskirchen - Kreis Neuss (Abb. 52)

Neben einem neuzeitlichen, auf der Tranchotkarte verzeichneten Weg liegen zwei 20 x 8 m und 15 x 6 m messende schmalrechteckige Räume, die eine Mauer verbindet; der westliche hat einen Eingang an der Innenseite, vom östlichen fehlt der südliche Abschluss. Im Südwesten schließt ein kleinerer zweigeteilter Raum von 12 x 4 m an. Die beiden parallelen Bauten erinnern an das Turmfundament eines Burgus, sie sind aber doppelt so groß.

Luftbildarchäologischer Befund **A061725** (letzter Befund vom 30. 7. 84); Ortsakten 1509/035. Tranchotkarte von 1807/08 Blatt 60. - Bonner Jahrb. 140/1, 1934/35, 479 (Reste röm. Gebäude, Dachziegel, Steine, Glasscherben); 183, 1983, 655 ((Keramik 2./3. Jh., Tubuli, Basaltplatte).

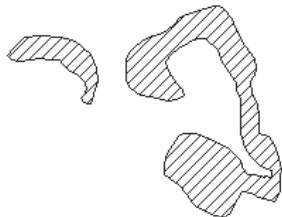


Abb. 53 (A061767) Maßstab 1:800 (Legende Abb. 75)

Vinkenpütz - Rommerskirchen, Kreis Neuss (Abb. 53)

Westlich des Ortes erkennt man undeutliche Mauerreste und große Schuttflächen, die wahrscheinlich zu einer anscheinend vor längerer Zeit angegrabenen römischen Villa des 2. Jahrh. n. Chr. gehören.

Luftbildarchäologischer Befund **A061767** (letzter Befund vom 8. 7. 82); Ortsakten 1573/015. - Bonner Jahrb. 171, 1971, 534 (...); 201, 2001, 433 (Rommerskirchen 21: Luftbild).

Rhein-Erftkreis (RhE)

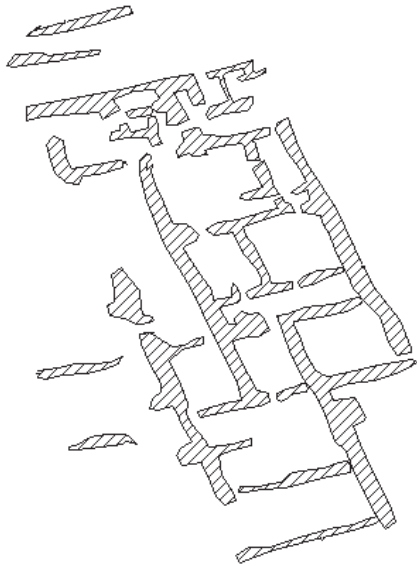


Abb. 54 (A062051) Maßstab 1:800 (Legende Abb. 75)

Blatzheim – Kerpen, Erftkreis (Abb. 54)

Südlich von Blatzheim erkennt man den 108 x 64 m großen Grundriss eines Villenwohnhauses, wahrscheinlich den mittleren Teil eines Gebäudes im Mittelformat, eingeteilt in mehrere Raumreihen und schmale Gänge; zwei nach Westen vorspringende kurze Mauerzüge könnten einen Seitenflügel andeuten. Funde des 2./3. Jahrhunderts datieren die Anlage.

Luftbildarchäologischer Befund **A062051** (letzter Befund vom 4. 6. 63); Ortsakten 962/017. - Hinz, Kreis Bergheim 214 Blatzheim Nr. 18



Abb. 55 (91031) Maßstab 1:1600 (Legende Abb. 75)

Buir - Hürth, Erftkreis (Abb. 55)

Westlich von Buir erscheinen auf einer Fläche von 180 x 160 m helle, meist quer zu den Ackerfurchen verlaufende Bodenverfärbungen, ohne freilich ein klares Bild zu ergeben. Der nordwestliche Teil sieht wie der Rest eines außen knapp 100 m breiten Hofes vom achsialen Typus aus. Gerade und abgewinkelte Mauerzüge im Südosten würden dazu allerdings nicht passen, weil bei einem derartigen Gehöft keine äußeren Gebäude üblich sind. In Bereich der Fundstelle kamen bereits früher römische Funde zutage, trotzdem ist die römische Zeitstellung der Spuren nicht absolut sicher.

Luftbildarchäologischer Befund **91031** (letzter Befund vom 13. 3. 91); Ortsakten 959; 959/002. - Hinz, Kreis Bergheim 222 Buir Nr. 14. - Heimberg, Villen 84-88.

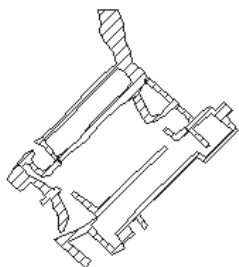


Abb.56 (A06127) Maßstab 1:800 (Legende Abb. 75)

Dirmerzheim - Erftstadt, Erftkreis (Abb. 56)

Zwischen Dirmerzheim und Gymnich zeichnet sich klar das 40 x 25 m große Wohnhaus einer römische Villa ab; es gehört zum Hallentyp, hat eine Portikus nach Südosten mit nur wenig vorspringenden Risaliten, eine weitere Galerie an der Rückseite und wohl je zwei seitliche Räume. Die diagonal zur Nordecke führende Linie könnte ein Wasserkanal zur Zu- oder Ableitung gewesen sein.

Im Luftbild erscheinen an der Ostseite helle kurvige Streifen, die vielleicht einen ehemals hier fließenden Bach andeuten. Magnetometermessungen ermittelten schon einen recht genauen

Grundriss und weitere Mauern vor der Front, vielleicht von einer Gartenanlage. Nach Prospektionsfunden entstand die Villa im letzten Drittel des 1. Jahrhunderts und war bis ins 4. Jahrhundert bewohnt.

Luftbildarchäologischer Befund **A06127** (letzter Befund vom 6. 8. 82); Ortsakten 906/001. – G. Gerlach, R. Zantopp, Ein römischer Bauernhof bei Dirmerzheim. Arch. Rheinland 1995, 62 ff. - J.J.M. Wippert, Magnetometermessungen auf dem Gelände einer *villa rustica* bei Dirmerzheim. Arch. Rheinland 1995, 159 ff. Abb. 42. - Heimberg, Villen Abb. 24.

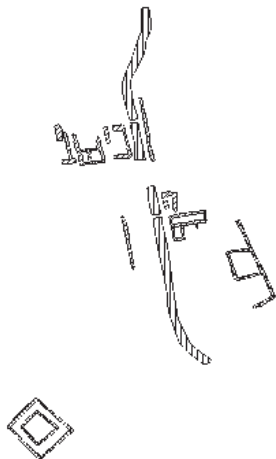


Abb. 57 (A06391_a,b,c) Maßstab 1:1550 (Legende Abb. 75)

Elsdorf (1) - Erftkreis (Abb. 57)

Südlich von Elsdorf verläuft parallel zur B 55 die hier in einer Nebenstraße erhaltene römische Fernstraße von Köln über Jülich nach Tongeren und zum Atlantik. An ihrer Nordseite zeichnen sich lange Mauerzüge mit rechtwinkligen Innenteilungen ab. Dies sind die typischen Strukturen von Streifenhäusern eines römischen *vicus*, hier etwa 25 m lang - auf einem früheren Luftbild zeichnen sich noch klarer mindestens 35 m lange und 6 bis 8 m breite, streifenförmige Grundstücke ab - mit Wohnhäusern, Werkstätten und Läden, deren schmale Giebelseiten der Straße zugewandt waren. Dahinter kann man sich Höfe, Gärten, Ställe, Schuppen vorstellen. Leseefunde und Bauschutt des 2. - 4. Jahrhunderts datieren den Ort. Zwischen den Mauern kreuzt ein auch noch in der Tranchotkarte (Blatt 69) von 1806/7 erhaltener Weg nach Norden und Süden die Fernstrasse. An seiner Fortsetzung nach Süden liegen eine weitere Raumgruppe im Osten und ein Mauerzug im Westen.

Während die Fundamentreste dieser Hausgrundrisse als negative Bewuchsmerkmale zutage treten, sind andere Spuren am positiven Bewuchs - über Ausbruchgräben - zu erkennen: an der Ostseite des Nord-Südweges eine 30 m lange, im Süden abgewinkelte Mauer mit quadratischem Innenraum eines nicht nach den Wegen ausgerichteten Baues sowie im Südwesten, etwa 750 m von der Hauptstrasse entfernt, ein fast quadratischer, übereck orientierter gallorömischer Umgangstempel mit 20 m Seitenlänge, das Heiligtum der Straßensiedlung.

Luftbildarchäologischer Befund **A 06391** (letzter Befund vom 18. 6. 84); **A 06391 C** (letzter Befund vom 2. 8. 94); Ortsakten 1221/022. - Bonner Jahrb. 183, 1983, 638 (Keramik 2.-4.Jh.); 184, 602 f. (TS). - H. Hinz, Kreis Bergheim. Archäologische Funde und Denkmäler des Rhein-

landes 2 (Düsseldorf 1968) 227 Elsdorf Nr. 13. – R. Zantopp, Römische Siedlungsstellen durch Luftbildarchäologie gefunden. Arch. Rheinland 1988, 61 f. - U. Heimberg, Siedlungsstrukturen in Niedergermanien. Jülicher Geschichtsblätter 67/68, 1999/2000, 189-240; 215 Abb. 15. Luftbildarchäologischer Befund A 06391C (letzter Befund vom 18. 6. 84); Ortsakten 1221/022. - A.-B. Follmann-Schulz, Die römischen Tempelanlagen in der Provinz Germania Inferior. ANRW II 18,1 (Berlin/New York 1986) 672-793; 721 Taf. III 2.

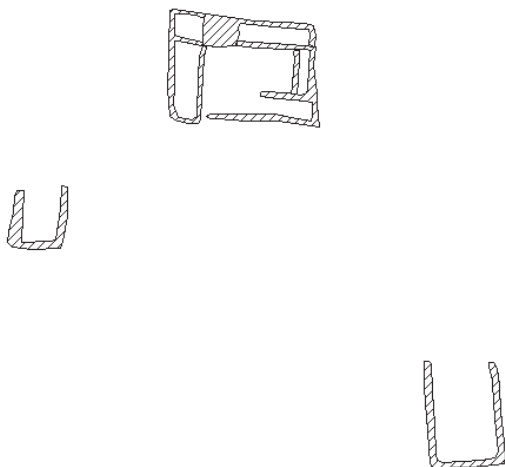


Abb. 58 (A061807a) Maßstab 1:800 (Legende Abb. 75)

Elsdorf (2) - Erftkreis (Abb. 58)

Am westlichen Ortsrand ist ein rechteckiges, etwa 35 x 25 m messendes Hallenhaus mit schmalen Nebenräumen an allen vier Seiten und vielleicht einem Keller an der Nordseite ab: wahrscheinlich ein einfaches Wohnhaus ohne Risalite.

Südlich davon liegt im Westen ein Gebäudefragment von 15 x 11 m und im Osten ein zweites von 25 x 17 m; bei beiden fehlen die Wände der nördlichen Schmalseiten. Die Häuser liegen offensichtlich am Rande eines mindestens 120 m breiten Hofes. Der ganze Komplex orientiert sich an der Fernstrasse Köln - Jülich – Tongeren, was zusammen mit römischen Funden die Datierung absichert.

Luftbildarchäologischer Befund **A061807a** (letzter Befund vom 11. 11. 70); Ortsakten 1220/008. - Hinz, Kreis Bergheim 190 Nr. 2.

Bonner Jahrb. 209, 2009, 300



Abb. 59 (A061809) Maßstab 1:800 (Legende Abb. 75)

Giesendorf - Elsdorf, Erftkreis (HA 125) (Abb. 59)

In einer bekannten Trümmerstelle zeichnet sich der südliche Teil eines noch 20 m langen und 15 m breiten langrechteckigen Wirtschaftsgebäudes ab. Grabungen haben inzwischen weitere Gebäude - unter einem Obstgarten - und mehrere Brunnen aufgedeckt.

Luftbildarchäologischer Befund **A061809** (letzter Befund vom 25. 6. 65; (Ortsakten 1168/014). - Hinz, Kr. Bergheim 243 Heppendorf 14. - W. Gaitzsch, Ein römischer Siedlungsplatz an der Tagebaugrenze Hambach. Arch. Rheinland 1996, 59 ff. - Bonner Jahrb. 198, 1998, 404 (4 Gebäude, 3 Brunnen, Scherben 2. - 4.Jh.). - W. Gaitzsch, Ein römischer Siedlungsplatz an der Tagebaugrenze Hambach. Ausgr. Rheinland 1996, 59 f. - Bonner Jahrb. 198, 1998, 404 f.

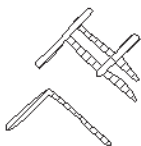


Abb. 60 (A061260) Maßstab 1:800 (Legende Abb. 75)

Glesch - Bergheim, Rhein-Erftkreis (Abb. 60)

Zwischen Glesch und Paffendorf kommen auf einer Fläche von insgesamt 35 x 25 m einige Mauerwinkel zutage, die mit einer römischen Trümmerstelle korrelieren. Eine genauere Zuordnung der Reste ist nicht möglich, vielleicht gehörten sie zu einem Wohnhaus.

Luftbildarchäologischer Befund **A061260** (letzter Befund vom 25. 6. 65); Ortsakten 1332/013. - Hinz, Kreis Bergheim 237 f. Glesch Nr. 14.

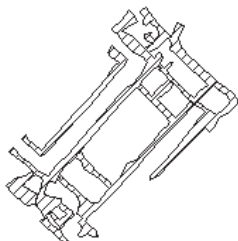


Abb. 61 (84187) Maßstab 1:800 (Legende Abb. 75)

Gymnich - Erfstadt, Rhein-Erftkreis (Abb. 61)

Nordwestlich von Gymnich kommt der Grundriss eines Villenwohnhauses von 45 x 25 m Größe zum Vorschein: in der Mitte ein rechteckiger Empfangssaal, seitlich schmale Neben- und Eckräume, seitlich eingebundene Risalite, eine u-förmige Portikus im Nordwesten, eine gerade im Südosten. Flächige Spuren an der südlichen Schmalseite deuten vielleicht beheizte Räume an.

Ein gebäudeparalleler Weg könnte römisch sein; einen zweiten, geschwungenen Wegeverlauf verzeichnet die Tranchotkarte.

Luftbildarchäologischer Befund **84187** (letzter Befund vom 23. 5. 93); Ortsakten 996/006. - Tranchotkarte (1807/08) Blatt 80.

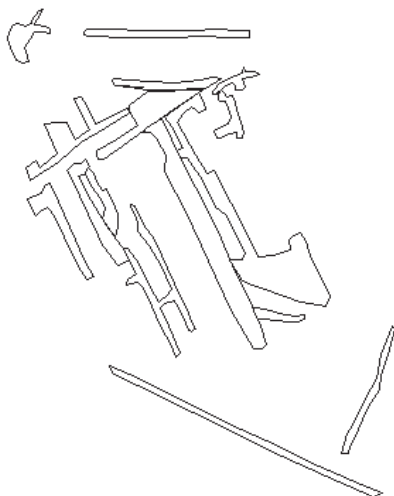


Abb. 62 (90209a) Maßstab 1:1600 (Legende Abb. 75)

Heppendorf - Elsdorf, Erftkreis (Abb. 62)

Südlich von Heppendorf sind im Bereich einer römischen Trümmerstelle an hellen Bodenverfärbungen auf 120 x 100 m von Nordwesten nach Südosten ausgerichtete Mauerzüge und Flecken zu erkennen, deren Richtung mit den heutigen Ackerfurchen übereinstimmt. Die Strukturen könnten zu einem großformatigen römischen Villenwohnhaus gehört haben. Im Süden schneidet eine schräg verlaufende Spur - ein Weg? - in das mutmaßliche Bauwerk ein; an der Nordseite sieht man zwei weitere, west-östlich orientierte Strukturen dicht neben der Nordecke des Hauses.

Der Weg und ein außerhalb des Bildfeldes liegender Graben erscheinen in der Deutschen Grundkarte 51, der Weg auch in der Topographischen Karte 25 von 1893-1938. Der Graben könnte zu einem Drainagesystem gehören.

Luftbildarchäologischer Befund **90209 a** (letzter Befund vom 9. 6. 1990); Ortsakten 1118; hier liegt die römische Trümmerstelle 1118/008, vgl. Hinz, Kreis Bergheim 246 Heppendorf Nr.68.

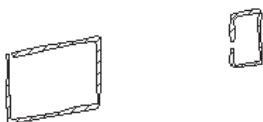


Abb. 63 (A06833) Maßstab 1:800 (Legende Abb. 75)

Kenten – Bergheim, Erftkreis (Abb. 63)

Bei Kenten zeichnen sich neben der römischen Fernstrasse von Köln über Jülich nach Heerlen zwei Gebäude ab, ein größeres von 17 x 13 m im Westen und ein kleineres von 10 x 6 m im

Osten. Die Fundstelle wurde bereits vor längerer Zeit ausgegraben - der östliche Grundriss ist nur ein Teil des Gebäudes - und wegen der Nähe zur Fernstrasse als Strassenstation interpretiert³⁶. Außer zwei Steinhäusern kamen noch zwei Pfostenbauten zutage und in einem Luftbild ein schräg nach Norden abzweigender Weg, an dem sich einer der Pfostenbauten orientiert.

Luftbildarchäologischer Befund **A06833** (letzter Befund vom 2. 5. 75); Ortsakten 1224/002. - U. Heimberg, Römische Ausgrabungen - Eine Straßenstation bei Bergheim (Erfkreis). Bonner Jahrb. 177, 1977, 569-577.



Abb. 64 (93050) Maßstab 1:800 (Legende Abb. 75)

Kerpen (1) - Erfkreis (Abb. 64)

Südlich von Kerpen liegt bei einer bekannten Trümmerstelle mit Ziegelstreuung ein 20 x 13 m großes rechteckiges Gebäude mit Korridor oder schmalem Innenraum an der südlichen Langseite und einer äußeren Wandvorlage im Norden, der westliche Abschluss fehlt. Es könnte ein einfaches Wohnhaus, eher jedoch ein Wirtschaftsgebäude sein. Im Westen zeichnen sich mehrere große Gruben ab. In der Nähe sollen zwei oder drei Sarkophage angeflügt, aber nicht ausgegraben worden sein

Luftbildarchäologischer Befund **93050** (letzter Befund vom 9. 6. 93); Ortsakten 1018/026. - Hinz, Kreis Bergheim 279 Kerpen Nr. 22. - Bonner Jahrb. 196, 1996, 589 (Luftbild).



Abb. 65 (91032) Maßstab 1:1600 (Legende Abb. 75)

Kerpen (2) - Erfkreis (Abb. 65)

Südwestlich des Ortes zeichnen sich auf einer Fläche von etwa 180 x 140 m helle Verfärbungen ab, teils rechtwinklig zueinander geordnete, aber verschieden orientierte Mauerzüge, teils unregelmäßige Flecken; es scheinen Fragmente mehrerer und verschieden orientierter Gebäude erfasst zu sein.

Luftbildarchäologischer Befund **91032** (letzter Befund vom 13. 3. 91); Ortsakten 963; SYA 456-459; MN 187-197, 197/551-559.

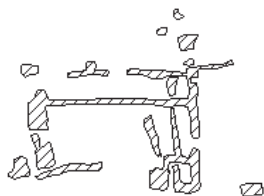


Abb. 66 (84159a) Maßstab 1:800 (Legende Abb. 75)

Langenich - Kerpen, Erftkreis (Abb. 66)

Zwischen Langenich und Kerpen liegen südlich des Neffelbaches die Reste eines etwa 40 x 25 m großen Villenwohnhauses mit Halle, schmalen Seitenräumen, einer Portikus an der Nordseite mit einem Eckraum, Spuren eines Risalites an der südöstlichen Ecke und spärliche Reste von Anbauten im Norden und Westen.

Luftbildarchäologischer Befund **84159a** (letzter Befund 29. 7. 84); Ortsakten 1017/028; 019. Hinz, Kreis Bergheim 279 Kerpen Nr. 27.

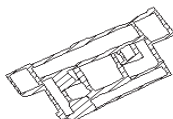


Abb. 67 (A0656) Maßstab 1:800 (Legende Abb. 75)

Liblar-Frauenthal - Erftstadt, Erftkreis (Abb. 67)

Südwestlich von Frauenthal zeichnet sich 120 m südöstlich der römischen Fernstraße Köln-Trier (B 265) in der Nähe ihrer Erftüberquerung sehr deutlich das 40 m breite und 20 m tiefe Wohnhaus des Reihentyps eines römischen Gehöftes ab: ein quadratischer Mittelsaal, mehrere Seitenräume und Galerien an beiden Langseiten; die Risalite sind seitlich angesetzt und bündig mit der Portikusfassade. An dieser zur Fernstraße hin orientierten Nordwestseite ist die Portikusmauer in der Mitte leicht verstärkt, hier war vermutlich einen Treppenaufgang oder ein hervorgehobenes Portal. Zwei Räume an der Westseite sind offenbar mit Schutt verfüllt: vorne vielleicht ein beheizter Raum und am Ende der rückwärtigen Galerie ein Keller oder beide zusammen die Hypokausten eines Bades. In einiger Entfernung kommt vor der Nordostecke des Wohnhauses der Mauerwinkel eines zweiten Gebäudes zum Vorschein.

Luftbildarchäologischer Befund **A0656** (letzter Befund vom 29. 6. 84); Ortsakten 849/007. - I. Scollar, Neue Methoden der archäologischen Prospektion (Düsseldorf 1970). - C. Weber/R. Zantopp, Die römische *villa rustica* bei Liblar-Frauenthal. Arch. Rheinland 1998, 65 ff. - I. Scollar, Einige Ergebnisse der archäologischen Luftbildforschung während des Jahres 1962. Bonner Jahrb. 163, 1963 309 Taf. 37. I. Scollar, Neue Methoden der archäologischen Prospektion (Düsseldorf 1970). - Bonner Jahrb. 191, 1991, 551 (TS, Zügelring); 194, 1994, 417 (Luftbild). - Heimberg, Villen Abb. 26.

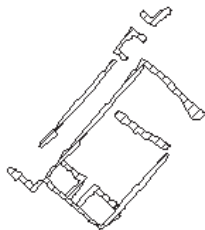


Abb. 68 (97027) Maßstab 1:800 (Legende Abb. 75)

Sindorf (1) - Kerpen, Erftkreis (Abb. 68)

Westlich von Haus Wiedenau ist die Trümmerstelle eines römischen Gehöftes mit Funden des 3. und 4. Jahrhunderts bekannt, dessen 35 x 22 m großes Wohnhaus im Luftbild zutage kommt: eine zweigeteilte Halle mit zwei kleinen Eckräumen an der südlichen Schmalseite. Nach Westen weist eine Portikus mit nur wenig vorspringenden Risaliten. Ein Mauerwinkel vor der Nordecke gehört zu einem Anbau oder einem weiteren Gebäude. Luftbildarchäologischer Befund **97027** (letzter Befund vom 2. 6. 97); Ortsakten 1172/012; 004. - Hinz, Kreis Bergheim (Anm. 1) 244 Heppendorf Nr. 32. - Bonner Jahrb. 199, 1999, 448 (Luftbild).

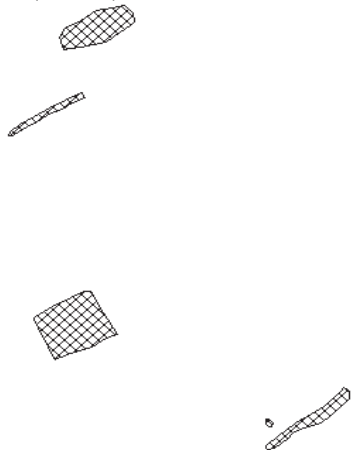


Abb. 69 (90062) Maßstab 1:800 (Legende Abb. 75)

Sindorf (2) - Kerpen, Erftkreis (Abb. 69)

Östlich von Sindorf zeigen sich quer zum Verlauf der Ackerfurchen zwei etwa 15 m lange Gräben als dunkle, positive Bewuchsmerkmale sowie zwei gleichgerichtete rechteckige und quadratische Flächen. Die Entfernung zwischen den Gräben beträgt 80 m; gehörten sie zu einer Hofbegrenzung? Da die Orientierung der Spuren den Ackerlinien entspricht, könnten sie auch neueren Datums sein.

Luftbildarchäologischer Befund **90062** (letzter Befund vom 6. 5. 1990); Ortsakten 1120/017; etwa 100 m entfernt liegt die römische Trümmerstelle 1120/001; vgl. Hinz, Kreis Bergheim 340 Sindorf Nr. 10. 11.

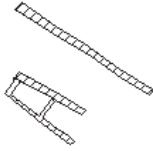


Abb. 70 (A0695A2) Maßstab 1:800 (Legende Abb. 75)

Widdendorf - Elsdorf, Erftkreis (Abb. 70)

Westlich von Widdendorf kommen innerhalb einer Trümmerstelle mit römischen Ziegeln einige Mauerzüge zutage, die sich zu einem 20 x 20 m großen Rechteckbau mit kleinen Seitenräumen ergänzen lassen. Es ist am ehesten das Wirtschaftsgebäude eines römischen Gehöftes. Luftbildarchäologischer Befund **A0695A2** (letzter Befund vom 23. 6. 65); Ortsakten 1170/017; 006.

Rhein-Sieckreis (RhS)

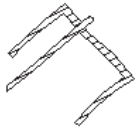


Abb. 71 (A062073) Maßstab 1:800 (Legende Abb. 75)

Bornheim - Rhein-Sieckreis (Abb. 71)

Im Bereich einer römischen Trümmerstelle erscheint die Hälfte eines 20 m breiten Nebengebäudes mit schmalen Gang an der nordwestlichen Langseite. Luftbildarchäologischer Befund **A062073** (letzter Befund vom 17.4.68); Ortsakten 794/006; 003.

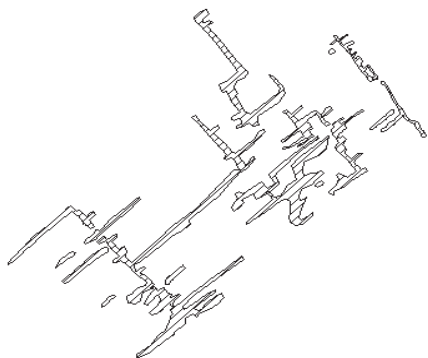


Abb.72 (RP01005) Maßstab 1:1600 (Legende Abb. 75)

Miel - Swisttal, Rhein-Siegkreis (Abb. 72)

Zwischen Mielsdorf und Morenhoven ist bei einer römischen Trümmerstelle mit dichter Ziegel- und Scherbenstreuung ein ungewöhnlich großer Baukomplex von gut 190 m Länge und 80 bis 100 m Breite zu erkennen, der wie das Wohnhaus einer römischen Villa aussieht: ein mittlerer Baukörper mit seitlichen Flügeln, aber mit einer ungewöhnlich breiten Fassade. Ob ein so großes Format existiert haben kann? Villen dieses Ausmaßes sind äußerst selten.

Luftbildarchäologischer Befund **RP01005** (letzter Befund vom 10. 4. 64); Ortsakten 483/003.

- R. Zantopp, Luftbildarchäologische Untersuchungen. Rhein. Ausgr. 62 (Mainz 2008) 159 (Mauern, Ziegel, Scherben).

Bonner Jahrb. 209, 2009, 301



Abb. 73 (RP01502) Maßstab 1:800 (Legende Abb. 75)

Odendorf - Swisttal, Rhein-Sieg-Kreis (Abb. 73)

Am östlichen Ortsrand von Odendorf kommt auf einer Fläche von etwa 15 x 15 m der fragmentierte Grundriss eines römischen Wirtschaftsgebäudes mit inneren Stützenreihen zutage, möglicherweise ein Getreidespeicher. Vor der südlichen Ecke ist ein kleiner, fast quadratischer Bau von 4 x 5 m zu sehen, vielleicht ein Turmspeicher. Noch etwas weiter südlich zeichnet sich schwach ein annähernd 20 m breites Mauerrechteck ab, ein weiteres Nebengebäude des hier zu erschließenden Gehöftes. Im Osten erkennt man noch zwei parallele, etwa 25 m lange Mauern in geringem Abstand von 3.5 m, vielleicht ein Stall?

Luftbildarchäologischer Befund **RP01502** (letzter Befund vom 27. 7. 98); Ortsakten 394/009.

- Bonner Jahrb. 197, 1997, 320 (Luftbild). - R. Zantopp, Luftbildarchäologische Untersuchungen. Rhein. Ausgr. 62 (Mainz 2008)159 (Trümmerstelle). - Zu Nebengebäuden mit Innenstützen und zu Turmspeichern vgl. Heimberg, Villen 116 Abb. 45 und 122.

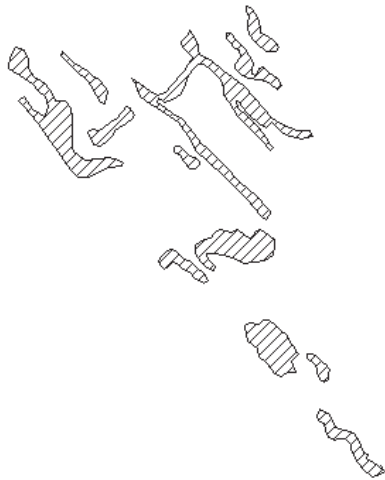


Abb. 74 (87004) Maßstab 1:800 (Legende Abb. 75)

Sechtem - Bornheim, Rhein-Siegkreis (Abb. 74)

Südlich von Sechtem zeigen unscharfe Mauerreste und helle Flecken im Bereich einer römischen Scherbenstreuung einen etwa 110 m langen und 50 m breiten Baukomplex mit zwei hintereinander liegenden Sälen an. Er könnte zu einem großformatigen Villenwohnhaus gehört haben.

Luftbildarchäologischer Befund **87004** (letzter Befund vom 28. 4. 87); Ortsakten 743/003

Legende :






-  negative Bewuchsmerkmale römischer Z.
-  Bodenverfärbungen hell römischer Z.
-  positive Bewuchsmerkmale römischer Z.
-  negative Bewuchsmerkmale neuzeitlicher Z.
-  negative Bewuchsmerkmale unbekannter Z.
- ◇ Nordrichtung blattrandparallel nach oben

Abb. 75 Legende für die Abb. 7a - 75

Automatische 3D-Objektrekonstruktion aus unstrukturierten digitalen Bilddaten für Anwendungen in Architektur, Denkmalpflege und Archäologie

THOMAS P. KERSTEN¹, MAREN LINDSTAEDT¹, KLAUS MECHELKE¹ & KAY ZOBEL¹

Zusammenfassung: Durch die stetig zunehmende Leistungsfähigkeit des Internets und der Computertechnologie sowie der raschen Weiterentwicklung von Computer Vision Algorithmen ist es heute möglich, die 3D-Geometrie von Objekten unterschiedlicher Größe mit handelsüblichen digitalen Kameras als Low-Cost Systeme für zahlreiche Anwendungen (Restaurierung, historische Denkmalpflege, Visualisierung, Analyse des Bauzustandes und der Beschädigung, etc.) effizient und flexibel in Bildsequenzen zu erfassen. Anhand von diversen Kulturobjekten (historische Gebäude, Statuen/Figuren, archäologische Fundstücke, etc.) wird in diesem Beitrag das Potential von Webservices und frei verfügbaren Softwarepaketen aufgezeigt, mit denen 3D-Punktwolken oder Oberflächenmodelle (als 3D-Polygone) mit foto-realistischer Textur automatisch aus Bilddaten erzeugt werden. Diese sogenannten Low-Cost Systeme stellen heute für die As-Built Dokumentation von 3D-Objekten in Architektur, Denkmalpflege und Archäologie eine effiziente Alternative zu teuren terrestrischen Laserscanningsystemen dar. Die Genauigkeit der automatisch erzeugten 3D-Modelle wird durch den Vergleich mit Ergebnissen des terrestrischen Laserscannings aufgezeigt.

1 Einleitung

Für die präzise 3D-Erfassung komplexer Objekte werden heute je nach Größe des Objekts geodätische Messmethoden, photogrammetrische Mehrbildverfahren und zunehmend auch terrestrisches Laserscanning allein oder in Kombination eingesetzt. Die Anforderungen an die Erstellung von 3D-Modellen sind je nach Objekt mit den Kriterien Detail, Vollständigkeit, Zuverlässigkeit, Genauigkeit (geometrische und visuelle Qualität), Effizienz, Datenmenge, Kosten und Handhabbarkeit oft sehr hoch, aber mit unterschiedlicher Priorität angesetzt.

Seit einigen Jahren gibt es jedoch auch eine große Anzahl von digitalen Kameras als passive Low-Cost Sensoren auf dem Markt, die mit entsprechenden Algorithmen wie Structure from Motion oder Dense Image Matching für verschiedene 3D-Anwendungen (Objektrekonstruktion, Navigation, Mapping, Tracking, Erkennung, Gaming etc.) effizient und erfolgreich eingesetzt werden und somit echte Alternativen zu klassischen Systemen und Methoden darstellen. Aufgrund der sehr geringen Kosten und der Open-Source Faszination erreichen heute solche Systeme mit den entsprechenden Algorithmen (Tools) große Aufmerksamkeit in vielen Anwendungsbereichen. Dennoch darf dabei der metrologische Aspekt nicht außer Acht gelassen werden, wenn man sie als seriöse Mess- und Modellierungsverfahren anerkennen will. Es müssen anhand von Zahlen klare Aussagen über das Genauigkeitspotential solcher Systeme getroffen werden, indem aktive und passive Low-Cost Sensoren und die dazugehörigen Open-Source und Low-Cost Bildverarbeitungssoftware als System auf ihre Leistungsfähigkeit untersucht werden. In diesem Zusammenhang müssen auch die Ergebnisse der 3D-Modellierung analysiert und ggf. mit Referenzdaten verglichen werden.

¹ HafenCity Universität Hamburg, Hebebrandstrasse 1, 22297 Hamburg, E-Mail: [Thomas.Kersten, Maren.Lindstaedt, Klaus.Mechelke, Kay.Zobel]@hcu-hamburg.de

Praktische Beispiele für bildbasierte Modellierung (REMONDINO & MENNA 2008) und Vergleiche zwischen bildbasierten und distanzbasierten Verfahren zeigen REMONDINO et al. (2008) für die Dokumentation von Kulturdenkmälern. BARAZZETTI et al. (2009) stellen den kombinierten Einsatz von photogrammetrischen und Computer Vision Verfahren für die automatische und genaue 3D-Modellierung von terrestrischen Objekten vor. Sie zeigen in ihrem Artikel, dass mit bildbasierten und distanzbasierten Aufnahmesystemen ähnliche Resultate erreicht werden können.

In diesem Beitrag wird das Potential von Webservices und frei verfügbaren Softwarepaketen anhand von praktischen Beispielen aufgezeigt, mit denen 3D-Punktwolken oder Oberflächenmodelle (als 3D-Polygone) mit foto-realistischer Textur automatisch aus Bilddaten erzeugt werden. Nach einer kurzen Vorstellung der eingesetzten Software in Kapitel 2 wird der gesamte Arbeitsablauf für das bildbasierte Low-Cost 3D-Rekonstruktionsverfahren (Kapitel 3) aufgezeigt. Die praktischen Ergebnisse und 3D-Vergleiche mit Referenzdaten werden in Kapitel 4 zusammengefasst.

2 Eingesetzte Software

Für die Untersuchungen zur automatischen Generierung von 3D-Punktwolken und 3D-Oberflächenmodellen aus Bilddaten wurden folgende Softwarepakete bzw. Webservices eingesetzt: Bundler/PMVS2 (Open-Source Software), Microsoft Photosynth (Webservice) und Autodesk Photofly bzw. 123D Catch Beta (Webservice).

2.1. Bundler/PMVS2

Bundler (SNAVELY et al. 2008) und PMVS2 (Patch-based Multi-view Stereo Software, FURUKAWA & PONCE 2010) wurden an der Universität von Washington in Seattle (USA) in C und C++ unter der GNU General Public License als frei verfügbare Software entwickelt. Bundler arbeitet als Structure-from-Motion (SfM) System für beliebig angeordnete Bilddaten und wurde für das Photo Tourism Project von Microsoft entwickelt (SNAVELY et al. 2006). Die Merkmalsextraktion in den Bildern erfolgt durch den SIFT-Algorithmus (Scale-Invariant Feature Transform - skaleninvariante Merkmalstransformation) von LOWE (2004). Die Software liefert für einen beliebigen Bilddatensatz die Kalibrierungsdaten der Kamera, die Bildorientierungen und eine dünn besetzte 3D-Punktwolke (Szenengeometrie) durch eine modifizierte Bündelblockausgleichung von LOURAKIS & ARGYROS (2004) als Ausgabe. Die Ergebnisse von Bundler werden in PMVS2 verwendet, um durch Dense Image Matching eine dichtere Punktwolke nicht-bewegter Objekte zu generieren. Dabei erhält jeder Punkt neben der 3D-Koordinate auch die Farbwerte des Objektes aus den Bildern. Für den Einsatz an der HCU Hamburg wurde eine Benutzeroberfläche (Abb. 1 links) erstellt, die den Arbeitsablauf der benötigten Softwareteile automatisiert, d.h. nach Eingabe der Bilder laufen Bundler und PMVS2 automatisch nacheinander ab und das Ergebnis wird in Meshlab dargestellt. Für den beschleunigten Ablauf von Bundler/PMVS2 wurde an der Universität von Washington eine graphische Benutzeroberfläche (siehe Abb. 1 rechts) entwickelt, bei dem die rechenintensiven Prozesse auf der GPU (Graphics Processing Unit) ablaufen (WU 2007, WU 2011).

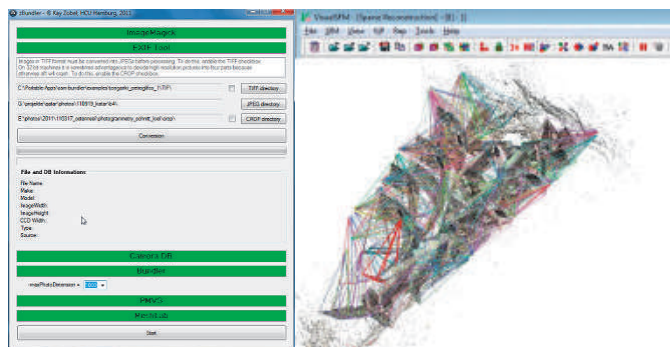


Abb. 1: HCU-Benutzeroberfläche für den automatischen Ablauf von Bundler/PMVS2 (links) und graphische Oberfläche für den beschleunigten Ablauf von Bundler/PMVS2 mit VisualSFM (rechts).

2.2. Microsoft Photosynth

Photosynth ist aus dem Photo Tourism Project in Zusammenarbeit zwischen Microsoft Live Labs und der Universität von Washington entstanden (SNAVELY et al. 2006). Die Grundlage für die automatische Erstellung von 3D-Punktwolken durch kostenlose Datenprozessierung mit dem externen Webservice ist die Software Bundler. Für die Nutzung von Microsoft Photosynth ist zunächst ein Programm für das Hochladen und die Übertragung der Bilder an einen Server und eine Windows Live ID (z.B. eMail-Adresse) erforderlich. Je nach Anzahl der Bilder kann ein Ergebnis einige Sekunden oder auch wenige Minuten später online in allen gängigen Browsern betrachtet werden, jedoch ist kein Zugriff auf die Daten vorhanden. Erst durch das externe Programm SynthExport (HAUSNER 2010) lassen sich die berechneten Punkte und die Kameraparameter exportieren, aber die Ergebnisse entsprechen denen von Bundler.

2.3. Autodesk Photofly/123D Catch Beta

Im Sommer 2010 stellte Autodesk das Projekt Photofly vor, bei dem es sich um einen freien Webservice handelt, mit man aus mindestens fünf sich überlappenden Bildern automatisch ein vermaschtes 3D-Modell des aufgenommenen Objektes ableiten kann (ABATE et al. 2011). Grundlage dieser Software ist die Software smart3Dcapture von der französischen Firma acute3D in Nizza, deren grundlegende Algorithmen durch COURCHAY et al. (2010) beschrieben werden. Photofly verwendet Algorithmen aus den Bereichen Computer Vision und Photogrammetrie als Grundlage und nutzt die Leistungsfähigkeit von Cloud Computing aus, um effizient 3D-Modelle aus 2D-Bilddaten zu erstellen.

Photofly nutzt den „Autodesk Photo Scene Editor“, der auf dem Anwender-Computer installiert werden muss, als Kommunikationsplattform zwischen Anwender und Server. Über die sehr übersichtliche Benutzeroberfläche dieser Software werden die ausgewählten Bilder auf den Server übertragen und das je nach Komplexität in kurzer Zeit (d.h. in einigen Minuten bis in wenigen Stunden) erstellte 3D-Modell kann dort auch bearbeitet werden. Wichtige Funktionen stellen das Auswählen von Teilen der Dreiecksvermaschung, Navigationsoptionen, das Auswählen von Punkten und das Festlegen einer Referenzstrecke für die Skalierung des Modells dar. Einzelne Bilder können noch nachträglich durch Messung von identischen Punkten (Verknüpfungspunkte) in das Modell eingefügt werden. Für die Generierung eines 3D-Modells stehen die drei Qualitätsstufen Mobile, Standard und Maximum (best-mögliches Ergebnis) zur Verfügung. Die Ergebnisse können in verschiedene Formate (z.B. OBJ oder

LAS) exportiert werden. Im November 2011 wurde Photofly durch 123D Catch Beta abgelöst, nachdem im Oktober 2011 die Firma acute3D ihre Software smart3Dcapture der Öffentlichkeit vorgestellt hatte. Die graphischen Benutzeroberflächen der beiden Softwarepakete sind in Abb. 2 dargestellt.

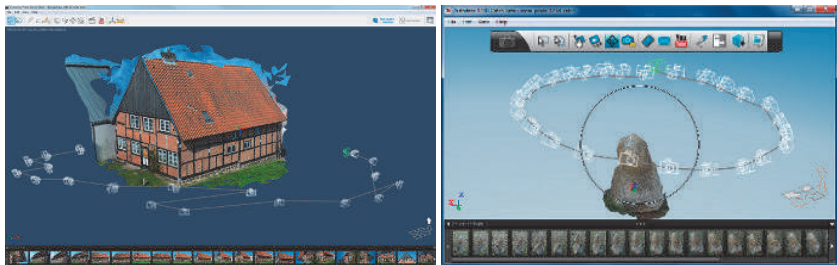


Abb. 2: Graphische Benutzeroberflächen für die Software Autodesk Photofly (links) und 123D Catch Beta (rechts) als Schnittstelle zum Webservice.

3 Arbeitsablauf

Der generelle Arbeitsablauf für das bildbasierte 3D-Rekonstruktionsverfahren mit Low-Cost Systemen ist in Abb. 3 veranschaulicht. Dabei ist der Automationsgrad der einzelnen Arbeitsschritte farblich gekennzeichnet (rot = manuell, gelb = interaktiv und grün = automatisch).

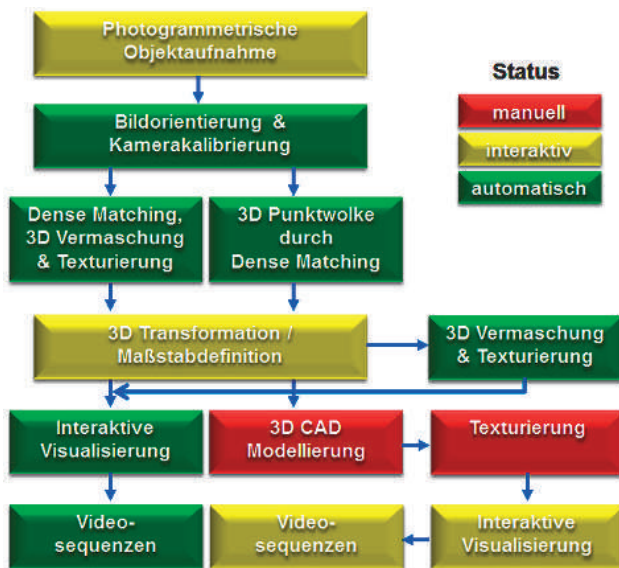


Abb. 3: Arbeitsablauf für das bildbasierte Low-Cost 3D-Rekonstruktionsverfahren.

Bei der photogrammetrischen Objektaufnahme werden viele Bilder vom Objekt von verschiedenen Standpunkten gemacht, wobei eine Abdeckung des jeweiligen Objektteils von

mindestens drei, jedoch besser von fünf Bildern aus unterschiedlichen Perspektiven erfolgen sollte. Nach Eingabe in die jeweilige Auswertesoftware werden die (äußeren) Bildorientierungen und die Parameter für die Kamerakalibrierung (innere Orientierung) automatisch berechnet. Die anschließende Erstellung von 3D-Punktwolken oder 3D-Oberflächenmodellen erfolgt in der Software auch vollautomatisch. Erst bei der 3D-Transformation der Punktwolke oder des vermaschten Modells in ein übergeordnetes Koordinatensystem greift der Anwender durch Messung von Passpunkten interaktiv ein. Das daraus dann abgeleitete 3D-Modell ist bereits durch die verwendeten Bilddaten automatisch foto-realistisch texturiert, so dass daraus automatisch Videosequenzen (z.B. in 123D Catch Beta) generiert werden können. Wenn aus einer transformierten und georeferenzierten, farbigen 3D-Punktwolke ein CAD-Modell konstruiert werden soll, erfolgt eine manuelle Weiterverarbeitung in einem CAD-Programm (z.B. AutoCAD) durch den Anwender. Das 3D-CAD-Modell kann anschließend in einer Visualisierungssoftware (z.B. 3D Studio, Cinema4D, Maya, etc.) mit den digitalen Bildern manuell texturiert werden, um daraus interaktiv Visualisierungen und/oder Videosequenzen abzuleiten. NEITZEL et al. (2011) stellen den Arbeitsablauf für ein Low-Cost-System, einen Genauigkeitsvergleich verschiedener Softwarepakete und mit der Erfassung einer Deponie ein praktisches Beispiel vor.

4 Ergebnisse & 3D-Vergleich

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der eingesetzten Software Microsoft Photosynth, Bundler/PMVS2 und Autodesk Photofly bzw. 123D Catch Beta für die Anwendungsbereiche Architektur, Denkmalpflege und Archäologie vorgestellt, wobei einzelne Datensätze auch mit Referenzdaten vom terrestrischen Laserscanner IMAGER 5006h von der Firma Zoller+Fröhlich verglichen wurden.

4.1. Architektur

In Abb. 4 sind die Ergebnisse von Photosynth, Bundler/PMVS2 und Photofly für die Frontfassade des Alt-Segeberger Bürgerhauses – eines der ältesten Gebäude in Schleswig-Holstein aus dem Jahr 1539 mit der Frontfassade von 1606 – dargestellt. Die verwendeten 19 Bilder wurden im Rahmen eines studentischen Projektes der HCU Hamburg mit einer Nikon D90



Abb. 4: Frontfassade des Bürgerhauses in Bad Segeberg (19 Bilder der Nikon D90 mit 20 mm Objektiv): Punktwolke aus Photosynth (links) und Bundler/PMVS2 (Mitte) sowie die Dreiecksvermaschung aus Photofly (rechts).

(Objektiv Nikkor 20mm) von verschiedenen Positionen aufgenommen. Das Ergebnis aus Photosynth ist mit 20.237 Punkten für eine Fassadenmodellierung nicht zu gebrauchen, während Photofly mit 272.350 Punkten und 515.442 Dreiecken das visuell ansprechendste Ergebnis lieferte. Jedoch wurden mit Photofly an den Fassadenseiten und an den Dachkanten sogenannte virtuelle Punkte vermascht, die nicht existieren (siehe dazu auch Abb. 2 links).

Mit Bundler/PMVS2 konnte eine dichte Punktwolke von 1.016.874 Punkten erzeugt werden. Die Dreiecksvermaschungen der Fassade erfolgten für die Daten von Bundler/PMVS2 mit Geomagic. Die vermaschten 3D-Fassaden von Bundler/PMVS2 und von Photofly sind im Vergleich zu den Referenzdaten des IMAGER 5006h in Abb. 5 visualisiert. Mit Bundler/PMVS2 konnten einige Stellen an den schwarzen Fachwerkbalken wie mit dem Scanner nicht gemessen werden, so dass kleine Lücken vorhanden sind (Abb. 5 links). Die Dreiecksvermaschung von Photofly zeigt eine verrauschte Fassade mit ausgeprägten Artefakten an den Rändern (Abb. 5 Mitte), bei der Lücken einfach geschlossen wurden.



Abb. 5: Dreiecksvermaschung der Frontfassade vom Bürgerhaus in Bad Segeberg: Bundler/PMVS2 (links), Photofly (Mitte) und IMAGER 5006h (rechts).



Abb. 6: Registrierung mit ICP von Bundler/PMVS2 zu IMAGER 5006h (links) und 3D-Vergleich mit IMAGER 5006h (grün < 3mm): Bundler/PMVS2 (Mitte) und Photofly (rechts).

Die Maßstabsanpassung der Daten von Bundler/PMVS2 und Photofly erfolgte für die Fassade durch Messung von zwei photogrammetrischen Passpunkten an der Fassade, über deren Strecke die beiden Datensätze skaliert wurden. Vor dem eigentlichen 3D-Vergleich wurden beide Datensätze mit einem Iterative Closest Point Algorithmus in Geomagic zu den Laserscanningdaten registriert. Beim 3D-Vergleich mit den Laserscanningdaten zeigt Bund-

ler/PMVS2 ein deutlich besseres Resultat als Photofly (Abb. 6 Mitte und rechts), denn die meisten Differenzen sind dort kleiner als 3 mm (grüne Flächen). Aufgrund der deutlich höheren Punktmenge konnte man das geometrisch bessere Resultat erwarten.

Um die Berechnungszeiten einschätzen zu können, wurde ein Rundum-Bildverband von 41 Bildern mit der Nikon D90 (Objektiv Nikkor 20 mm) vom Baumhaus im Alten Hafen von Wismar (Abb. 7) mit Bundler/PMVS2 und VisualSFM (= Bundler auf GPU) berechnet. Der verwendete Rechner hatte einen Intel Xeon CPU E5540 Prozessor mit 2.53 GHz, einen internen Speicher von 24 GB RAM und lief auf dem Betriebssystem Windows 7 Enterprise (64 Bit). Die Berechnung in Bundler/PMVS2 dauerte 11 Stunden und lieferte 1.641.871 Punkte, während die Rechenzeit von VisualSFM mit nur 27 Minuten um den Faktor 24 schneller war. Allerdings wurden ca. 270.000 Punkte weniger gemessen, was sich in einigen Lücken besonders in den Dachbereichen widerspiegelte (Abb. 7). Das Ergebnis von 123D Catch Beta war geometrisch nicht brauchbar, da einige Bereiche an den Hausfassaden verzerrt und die Dachbereiche sehr lückenhaft waren.



Abb. 7: Baumhaus im Alten Hafen von Wismar – Punktwolke der Frontansicht (links) und des Daches (rechts) mit VisualSFM (jeweils links) und Bundler/PMVS2 (je rechts).

4.2. Denkmalpflege

Exemplarisch für Anwendungen in der Denkmalpflege sind die Ergebnisse einer Figur aus dem Dresdner Zwinger in Abb. 8 dargestellt. Die Figur wurde in zwei unterschiedlichen Höhen mit einer Nikon D90 in 15 Bildern mit einem Nikkor Zoom-Objektiv (Brennweite 28 mm) aufgenommen. Photofly konnte aus 155.697 Punkten eine visuell ansprechende, fast lückenlose Vermaschung mit 285.669 Dreiecken rechnen (Abb. 8 links), während bei Bundler/PMVS2 trotz 917.965 Punkte leichte Lücken vorhanden waren (Abb. 8 Mitte) und in Photosynth mit nur 18.553 Punkten eine sehr geringe Punktdichte gemessen wurde. Leider lagen für diese Figur keine Referenzdaten vor, so dass eine geometrische Analyse nicht erfolgen konnte.

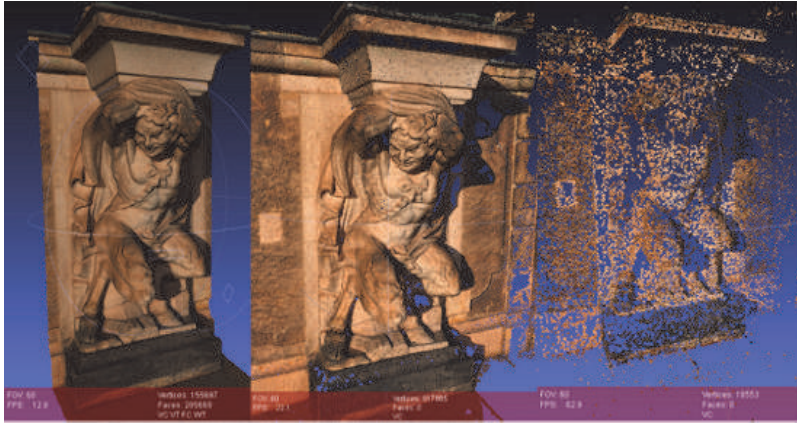


Abb. 8: Figur im Dresdner Zwinger – Photofly (links), Bundler/PMVS2 (Mitte) und Photosynth (rechts).

4.3. Archäologie

Es zeigte sich gerade bei archäologischen Objekten, dass Photofly bzw. 123D Catch Beta visuell recht ansprechende 3D-Modelle von kleineren und eher rundlichen Objekten liefern konnte. Ein Moai vom Krater Poike auf der Osterinsel (Chile) wurde mit einer Nikon D70 (Nikkor Zoom-Objektiv mit 35 mm) in 27 Bildern rundherum aufgenommen. Das Ergebnis der Berechnung mit 123D Catch lieferte ein nahezu lückenloses, texturiertes 3D-Modell (Abb. 9) mit 169.131 Dreiecken (aus 85.092 Punkten), während mit Bundler/PMVS2 trotz fast 630.000 Punkten einige Lücken am Hals und am Übergang Figur zu Boden vorhanden waren. Allerdings konnte eine geometrische Genauigkeitsanalyse wegen fehlender Referenzdaten noch nicht durchgeführt werden.

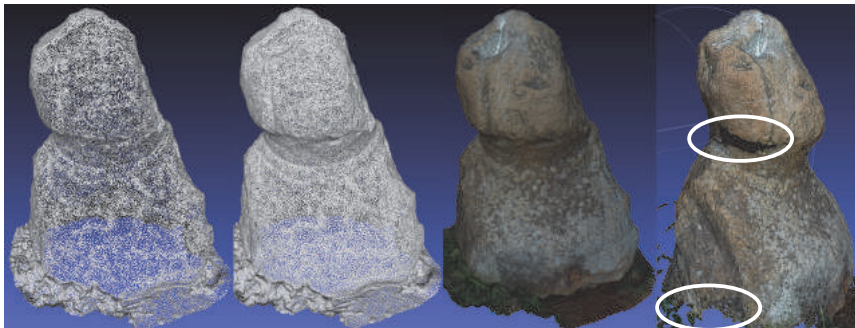


Abb. 9: Kleiner Moai (Höhe 0,7 m) von Poike auf der Osterinsel (Chile) – v.l.n.r. gemessene Punkte, Dreiecksvermaschung, texturiertes 3D-Modell jeweils aus 123D Catch Beta und als Vergleich die gemessenen Punkte aus Bundler/PMVS2 (rechts)

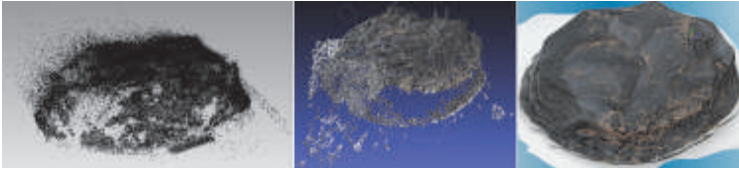


Abb. 10: Schwarzer Obsidian-Stein als Augenrückseite eines Moai auf der Osterinsel – Punktwolke vom IMAGER 5006i (links), aus Bundler/PMVS2 (Mitte) und vermaschtes 3D-Modell aus 123D Catch Beta (rechts)

Bei der Erstellung eines 3D-Modells von einer Moai-Augenrückseite aus Obsidian konnte nur 123D Catch Beta erfolgreich eingesetzt werden, denn sowohl mit dem Laserscanner IMAGER 5006i, als auch mit Bundler/PMVS2 konnten jeweils nur eine sehr verrauschte Punktwolke mit einigen Lücken generiert werden (Abb. 10). Für das Dense Matching mit 123D Catch Beta und Bundler/PMVS2 wurden die Bilddaten von folgenden Kameras zusammen verwendet: a) 27 Fotos der Pentax Optio X (2560 x 1920) mit 10 mm Brennweite, b) zehn Fotos einer Nikon D70 (3008 x 2000) mit einer Brennweite von ca. 40 mm und c) elf Fotos einer Nikon D80 (3872 x 2592) mit einer Brennweite von 50 mm. Das von 123D Catch Beta generierte texturierte 3D-Modell der Augenrückseite besteht aus 291.613 Dreiecken (Abb. 10 rechts), während mit Bundler/PMVS2 insgesamt nur 214.940 und mit dem IMAGER 5006i nur 95.820 Punkte gemessen wurden. Auch hier konnte kein 3D-Vergleich mit Referenzdaten zur Genauigkeitsbetrachtung gemacht werden, aber das erstellte 3D-Modell entsprach subjektiv betrachtet dem Original sehr gut. Eine Skalierung des Modells konnte aufgrund fehlender Informationen noch nicht vorgenommen werden.

Für die nächsten beiden Beispiele (Holzpfosten und Gefäß aus Yeha/Äthiopien) waren Referenzdaten vorhanden. Die verkohlten Reste eines ca. 2800 Jahre alten Holzpfostens wurden mit einer Nikon D200 (Nikkor Zoomobjektiv 35 mm) durch 43 Bilder aufgenommen. Die Bilddaten wurden sowohl mit Bundler/PMVS2 mit einer Bildauflösung von 2400 Pixeln, als auch mit Photofly mit maximaler Bildauflösung von 4288 Pixeln ausgewertet, d.h. eine Punktwolke (723.136 Punkte) und ein 3D-Modell (ca. 300.000 Dreiecke) wurden berechnet (Abb. 11). In den Objektraum wurde für die Aufnahme zusätzlich ein kleiner Maßstab gelegt, der die spätere Skalierung der beiden Datensätze ermöglichte.

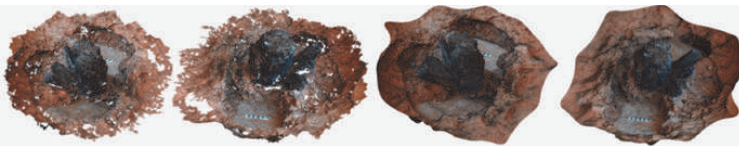


Abb. 11: Reste eines Holzpfostens (archäologisches Fundstück) in Yeha (Äthiopien) – jeweils zwei Ansichten der Punktwolke aus Bundler/PMVS2 (links) und des 3D-Modells aus Photofly (rechts)

Als Referenz wurde das Objekt auch mit dem IMAGER 5006h von vier Stationen aus gescannt. Die registrierten Punktwolken wurden in Geomagic auf einen regelmäßigen Punktabstand von 3 mm gefiltert, die resultierende Vermaschung ergab ca. 350.000 Dreiecke (Abb. 12 links). Vorab wurden die Scandaten durch einen Rauschfilter leicht geglättet. Nach einer ICP-Registrierung der jeweiligen Daten mit den Scandaten wurde in Geomagic ein 3D-Vergleich gerechnet. Die beiden Ergebnisse sind in Abb. 12 dargestellt. Differenzen vom jeweiligen Datensatz zur Referenz, die unter einem Millimeter liegen, sind grün gekennzeichnet. Bei diesem Vergleich zeigt es sich, dass das Differenzbild von Bundler/PMVS2

zum IMAGER 5006h weniger grüne Flächen als das von Photofly aufweist. Beide Datensätze sind jedoch mit dem Ergebnis des Laserscannings auf ± 3 mm weitgehend identisch. Da die Bilddaten in diesem Fall eine höhere Auflösung als die Scandaten lieferten, ging es hier in erster Linie um die Aufdeckung grober Fehler in den Modellen aus den Bilddaten, die hier nicht auftraten. Ein 3D-Vergleich zwischen der geringen und der maximalen Auflösung bei 123D Catch Beta zeigte keine signifikanten geometrischen Unterschiede.

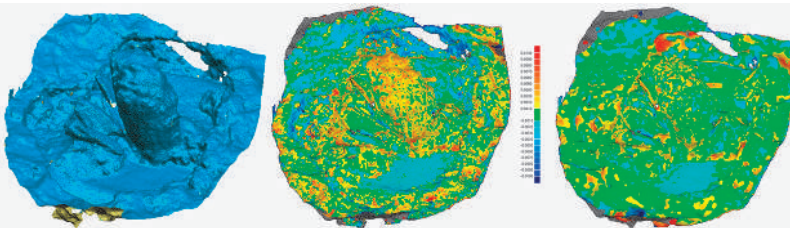


Abb. 12: Dreiecksvermaschung des Holzpfostenrests (Referenzdaten vom IMAGER 5006h, links) und 3D-Vergleich IMAGER 5006h / Bundler/PMVS2 (Mitte) und IMAGER 5006h / Photofly (rechts) (grün < 1 mm).

Als ein weiteres Objekt der archäologischen Fundstücke der Grabung in Yeha (Äthiopien) wurde ein Gefäß (Keramik) durch eine Kamera und durch einen Laserscanner aufgenommen, um die bildbasierte und distanzbasierte Objekterfassung miteinander zu vergleichen. Das Gefäß (Abb. 13) wurde im oberen Bereich mit 50 Bildern und im unteren Bereich mit 30 Bildern einer Nikon D40 (Nikkor Zoomobjektiv, Brennweite 34 mm) aufgenommen. Mit dem terrestrischen Laserscanner IMAGER 5006h wurden neun Scans für die vollständige Erfassung des Objektes durchgeführt. Aus den registrierten Scans wurde in Geomagic die Dreiecksvermaschung des Gefäßes (ca. 160.000 Dreiecke) berechnet. Die Bilddaten wurden mit Bundler/PMVS2 mit einer Bildauflösung von 2400 Pixeln ausgewertet, d.h. eine Punktwolke wurde für den oberen und unteren Objektteil getrennt generiert (Abb. 13). Über den zusätzlich für die Aufnahmen in den Objektraum gelegten Maßstab (10 cm) erfolgte die Skalierung der beiden Datensätze, die anschließend in Geomagic mit ICP zueinander registriert wurden. Nach ICP-Registrierung der beiden 3D-Modelle erfolgte der 3D-Vergleich in Geomagic, der nur an den Randbereichen und denen mit großer Krümmung eine größere Differenz als einen Millimeter zeigte (Abb. 13). Diese lassen sich durch die höhere Auflösung der Bilddaten im Vergleich zu den mehr geglätteten Scandaten erklären. Die durchschnittliche Abweichung liegt bei 0.4 mm.



Abb. 13: v.l.nr. Gefäß aus Yeha (Äthiopien) mit Maßstab zur Skalierung der Ergebnisse, oberes und unteres Objektteil sowie zusammengesetztes Objekt aus Bundler/PMVS2, vermaschtes und geglättetes 3D-Modell des Gefäßes vom IMAGER 5006h, Ergebnis des 3D-Vergleichs (grün < 1 mm).

5 Fazit und Ausblick

In diesem Beitrag wurden kostengünstige bildbasierte Aufnahmen und Modellierungsverfahren vorgestellt, mit denen detaillierte und genaue 3D-Oberflächenmodelle aus terrestrischen Bildern für Anwendungen in der Architektur, Denkmalpflege und Archäologie generiert werden können, die vergleichbar mit Ergebnissen von teuren terrestrischen Laserscannern sind. Die Objektaufnahme mit Kameras ist einfach, sehr schnell, sehr flexibel und sehr kostengünstig. Das gesamte Verfahren ist weitgehend automatisiert und funktioniert auch ohne Zielmarken als Passpunkte, wenn nur ein Maßstab zur Objektskalierung ausreicht. Die verwendete Software Bundler/PMVS2 und der Webservice Photofly bzw. 123D Catch Beta generieren je nach Objektgröße und -form gleichwertige 3D-Daten im Vergleich zu terrestrischen Laserscannern. Die Zuverlässigkeit der Systeme muss jedoch noch verbessert werden. In einigen Fällen waren die erreichten Ergebnisse geometrisch nicht verwertbar. Da die Resultate abhängig von der eingesetzten Software sehr unterschiedlich waren, konnte man diese Probleme nicht unbedingt auf die Aufnahmegeometrie zurückzuführen. Je nach Objektmaterial und Beleuchtung wurden mit Bundler/PMVS2 verrauschte Punktwolken erzeugt. Photofly/123D Catch Beta zeigte eher bei kleinen und runden Objekten visuell sehr ansprechende (geglättete) Resultate, wobei kleine Löcher automatisch geschlossen werden. Die Ergebnisse von Photosynth sind für die 3D-Modellierung nur zu gebrauchen, wenn sie mit PMVS2 weiterverarbeitet werden können, da ansonsten die Punktdichte zu gering ist. Dennoch sind weitere Untersuchungen mit anderen Aufnahmeverfahren wie Streifenprojektion oder Nahbereichsscannern bei kleinen Objekten erforderlich, um gesicherte Aussagen über die geometrische Qualität treffen zu können.

Bei den in diesem Beitrag vorgestellten Untersuchungen zeigte es sich, dass Bundler/PMVS2 bei größeren Objekten leistungsfähiger als Photofly/123D Catch Beta war, obwohl die Berechnungszeiten erheblich länger waren. Die deutlich kürzere Verarbeitungszeit beim Webservice lässt darauf schließen, dass Autodesk reichlich Rechen-Ressourcen für diesen Dienst zur Verfügung stellt. Durch den optionalen Einsatz von Webservices konnten nicht nur die eignen Rechenkapazitäten geschont werden, sondern es wird dadurch ein deutlicher Zeitgewinn gegenüber der Berechnung am eigenen PC erreicht. Doch die Voraussetzung einer schnellen Internetverbindung ist nicht immer gegeben, gerade beim Einsatz in der Archäologie muss oft auf die lokale Infrastruktur zurückgegriffen werden, so dass eine Nutzung der Software, die hinter den Webservices steckt, auf dem eigenen PC wünschenswert wäre. Außerdem sollten beim Einsatz von Webservices auch Aspekte des Datenschutzes nicht außer Acht gelassen werden,

Durch die sinnvolle Kombination von Computer Vision Algorithmen und photogrammetrischen Verfahren wird der Arbeitsablauf von der Objekterfassung, über die 3D-Modellierung bis zur Visualisierung automatisiert, ohne die geometrische Genauigkeit signifikant zu vernachlässigen. Die Verfahren stehen dabei in ihrer Entwicklung erst am Anfang, da die Geschwindigkeit solcher Algorithmen durch die zukünftige Implementierung der Software auf den Graphikprozessor (GPU) signifikant erhöht und die gegenseitige Integration beider Verfahren noch erheblich optimiert werden kann. Mittlerweile gibt es aus dem Bereich der Computer Vision eine große Anzahl von Algorithmen für das pixel-basierte Matching in Stereo- oder Multi-View Bildern mit unterschiedlichem Leistungspotential (SCHARSTEIN & SZELISKI 2009).

Nachdem das airborne und terrestrische Laserscanning seit mehr als 10 Jahren eine dominierende Stellung auf dem Markt bei der flächenhaften Datenerfassung erarbeitet hat, kommen photogrammetrische Verfahren mit Unterstützung der Computer Vision und der zunehmend leistungsfähigeren Computertechnologie durch ihre Effizienz vehement zurück – Photogrammetry Reloaded.

6 Literaturverzeichnis

- ABATE, D., FURINI, G., MIGLIORI, S. & PIERATTINI, S., 2011: Project Photofly: New 3D Modelling Online WEB Service. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 38(5/W16), http://www.isprs.org/proceedings/XXXVIII/5-W16/pdf/abate_et_al.pdf.
- BARAZZETTI, L., REMONDINO, F. & SCAIONI, M., 2009: Combined use of photogrammetric and computer vision techniques for fully automated and accurate 3D modeling of terrestrial objects. *Proc. of SPIE Optics+Photonics*, Vol. 7447, 2-3 August, San Diego, CA, USA.
- COURCHAY, J., PONS, J.-P., MONASSE, P. & KERIVEN, R., 2010: Dense and Accurate Spatio-temporal Multi-view Stereovision. *Computer Vision – ACCV 2009, Lecture Notes in Computer Science*, Volume 5995, 11-22.
- FURUKAWA, Y. & PONCE, J., 2010: Accurate, Dense, and Robust Multi-View Stereopsis. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 32(8): 1362-1376.
- HAUSNER, C., 2010: SynthExport. <http://synthexport.codeplex.com/>, besucht am 04.01.2012.
- LOURAKIS, M.I.A. & ARGYROS, A.A., 2004: Design and Implementation of a Generic Sparse Bundle Adjustment Software Package Based on the Levenberg-Marquardt Algorithm. *Institute of Computer Science, Heraklion, Crete, Greece - FORTH-ICS*, Tech. Rep. 340, <http://www.ics.forth.gr/~lourakis/sba>.
- LOWE, D.G., 2004: Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints. *International Journal of Computer Vision*, 60(2): 91-110.
- NEITZEL, F., KLONOWSKI, J., SIEBERT, S. & DASBACH, J.-P., 2011: Mobile 3D Mapping mit einem low-cost UAV-System am Beispiel der Deponievermessung. *AVN – Allgemeine Vermessungsnachrichten* 10: 336-347.
- REMONDINO, F. & MENNA, F., 2008: Image-based surface measurement for close-range heritage documentation. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 37(B5-1): 199-206.
- REMONDINO, F., EL-HAKIM, S.F., GRUEN, A. & ZHANG, L., 2008: Turning images into 3-D models. *IEEE Signal Processing Magazine*, 25(4): 55-65.
- SCHARSTEIN, D. & SZELISKI, R., 2009: Middlebury Stereo Vision Page. <http://vision.middlebury.edu/stereo/>, besucht am 7.1.2012.
- SNAVELY, N., SEITZ, S.M. & SZELISKI, R., 2006: Photo tourism: exploring photo collections in 3D. *ACM Trans. Graph.* 25(3): 835-846.
- SNAVELY, N., SEITZ, S.M. & SZELISKI, R., 2008: Modeling the World from Internet Photo Collections. *International Journal of Computer Vision* 80(2): 189-210.
- WU, C., 2007: SiftGPU: A GPU implementation of Scale Invariant Feature Transform (SIFT). <http://cs.unc.edu/~ccwu/siftgpu>.
- WU, C., 2011: VisualSFM: A Visual Structure from Motion System. <http://www.cs.washington.edu/homes/ccwu/vsfm/>.

Dense Image Matching in der Praxis

ALBERT WIEDEMANN¹ & ANDRA BECKMANN¹

Zusammenfassung: Dense Image Matching zur Erstellung dichter Punktwolken aus Luftbildern ist in aller Munde. Es wird gar von der Ablösung von Laserscannern gesprochen. Hochschulen und Softwareanbieter präsentieren beeindruckende Ergebnisse. Wie sich diese Ergebnisse mit kommerzieller Software in der Praxis eines Produktionsunternehmens darstellen ist Gegenstand dieses Aufsatzes. Nicht die Entwickler selbst, sondern Mitarbeiter aus der photogrammetrischen Produktion testen und bewerten hier die Ergebnisse unterschiedlicher Lösungsansätze. Untersucht werden auch unterschiedliche Auflösungen und Überdeckungen an einem Beispielgebiet in Potsdam. Für die Praxis der Photogrammetrie am Beispiel der BSF Swssphoto stehen die Fragestellungen nach der Nutzbarkeit der Punktwolken für die Herstellung von Digitalen Orthophotos und das Potential für die Ableitung von 3D Stadtmodellen im Vordergrund.

1 Einleitung

Immer häufiger werden eindrucksvolle Beispiele von Ergebnissen dichter Punkt-Matchings aus Luftbildern gezeigt (HAALA & WOLFF 2009, ROTHERMEL et al. 2011). Lange Zeit kamen die Beispiele weitgehend aus dem akademischen Bereich, seit kurzem sind auch kommerzielle Produkte, die dazu in der Lage sind, auf dem Markt.



Abb. 1a: Luftbild



Abb. 1b: Digitales Oberflächenmodell DSM

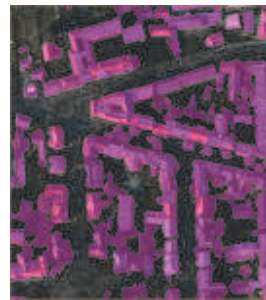


Abb. 1c: Klassifizierung

Bei BSF Swissphoto ist sowohl der Bedarf hochwertiger Digitaler Geländemodelle für die Erstellung von Orthophotos, als auch der Bedarf für vorklassifizierte Digitale Oberflächenmodelle zur Erstellung von Digitalen Stadtmodellen in LoD1 und LoD2 erkannt worden.

¹ BSF-Swissphoto GmbH, Mittelstr. 7, 12529 Schönefeld;
E-Mail: albert.wiedemann@bsf-swissphoto.com, sandra.beckmann@bsf-swissphoto.com

An den verschiedenen Standorten existiert Zugang zu verschiedenen kommerziellen Matching Systemen (Inpho Match-AT, SocetSet NGATE, sowie zu akademischen Programmen, z.B. SatPP, ETH Zürich).

Es wurde ein städtisches Testgebiet in Potsdam ausgewählt, von dem Bildflüge verschiedener Auflösungen und ALTM-Daten vorliegen. In diesem Testgebiet werden mit den verfügbaren Programmen bei verschiedenen Bodenaufösungen und Überdeckungen die Punktwolken geschaffen und klassifiziert, um sie hinsichtlich ihrer Eignung für die beiden oben genannten Anwendungen zu untersuchen. Neben den Kriterien Höhengenaugigkeit, Lagegenaugigkeit und Trennschärfe spielt auch die Trefferquote bei der Klassifizierung eine wesentliche Rolle. Die Qualität der erzielten Ergebnisse hängt neben dem verwendeten Programm vor allem von den gewählten Einstellungen ab.

Neben diesen Qualitätsmerkmalen spielen in einem gewerblichen Unternehmen, welches jährlich Hunderttausende Bilder erstellt, auch die Kosten, der rechnerische und personelle Aufwand eine existentielle Rolle.

Die Ergebnisse werden an den Beispielen visualisiert und durch Vergleich mit den ALTM-Daten evaluiert.

2 TestszENARIO

2.1 Testdaten Bilddaten

Die Analyse wurde an Hand verschiedener Bildflüge mit Vexcel Ultracam UCX (2008) und UCXp (2010), sowie dem Schrägbildsystem AOS in unterschiedlichen Flughöhen und Überlappungen durchgeführt. Es erfolgte jeweils eine Aerotriangulation (AT) mit Inpho Match-AT und eine anschließende Kontrolle mit Bingo.

Tabelle 1: Testdatensätze

Datensatz	Flughöhe MSL [m]	Boden- auflösung [cm]	Überlappung Längs / Quer [%]	Kamera	Bildflugdatum
01	5490	32	65 / 65	UCXp	25.03.2010
02	3050	18	70 / 70	UCXp	25.03.2010
03	915	5	65 / 65	UCXp	25.03.2010
04	2170	15	80 / 60	UCX	24.06.2008
04-1		15	60 / 60	UCX	Jedes 2te Bild innerhalb der Trasse entfernt
04-2		15	60 / 20	UCX	Jede 2te Trasse entfernt
05	730	10		AOS	21.05.2008

2.2 Testdaten Referenzdaten

Als Referenzdaten für die Evaluierung der Qualität der Digitalen Oberflächenmodelle kamen geodätische und photogrammetrische Messungen von Einzelpunkten (Abb. 2a), eine interaktive,

Stereoauswertung der Luftbilder des Datensatzes 03 (Abb. 3), sowie ALTM-Befliegungen vom 26.03.2010 mit einem Optech ALTM Gemini aus 500-1700 m Flughöhe und mit einer Rasterdichte von 1-10 Pkt/m² zum Einsatz (Abb. 2b).



Abb. 2a: Photogrammetrisch ermittelte Kontrollpunkte

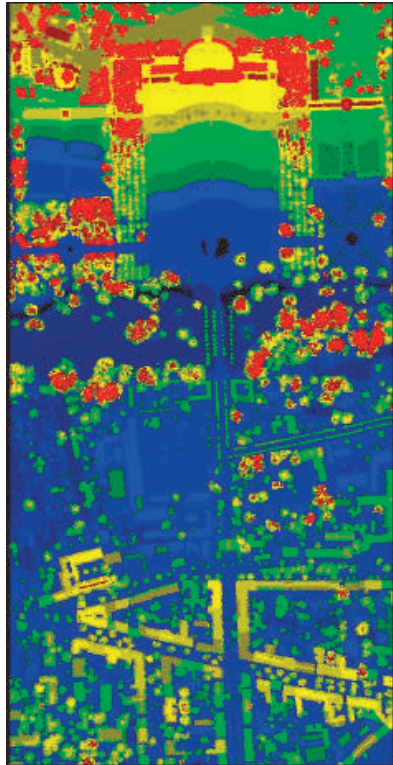


Abb 2b: Farbcodiertes Oberflächenmodell aus Laserdaten

2.3 Fragestellungen

Die Qualität von 3D Punktwolken hängt nicht nur von der Genauigkeit der Einzelpunkte ab, sondern auch von ihrer relativen Lage, Verteilung und Dichte. Auf Tagungen vorgestellte Ergebnisse (z.B. HIRSCHMÜLLER 2011) haben hier die Messlatte sehr hoch gelegt. Es gilt jedoch einige Fragen für die Praxis zu klären, um die optimalen Voraussetzungen und Strategien bei gegebenen Rahmenbedingungen zu finden:

- Wie ist die Höhengenaugigkeit der ermittelten Punkte?
- Wo sind Lücken in den Punktwolken?
- Wie groß ist die Zahl der Ausreißer?
- Wie genau werden Unstetigkeitsstellen ermittelt und wie scharf werden sie abgebildet?
- Welche Lagegenauigkeiten werden erzielt?
- Wie gut lassen sich die Punktwolken in Boden-Punkte, Gebäudepunkte, Vegetation und andere Punkte durch Klassifikation trennen?
- Wie viele Punkte konnten nicht oder nicht korrekt klassifiziert werden?

Nicht alle Antworten auf diese Fragen lassen sich gut durch numerische Werte quantifizieren. Auf diesen Ergebnissen basieren nun die für die Praxis entscheidenden Fragen:

- Wie gut ist die Qualität der sich auf die Bodenpunkte beschränkenden Daten zur Ermittlung eines Digitalen Geländemodells (DGM) für die Erstellung eines Digitalen Orthophotos (DOP) geeignet?
- Wie viel Nacharbeit ist erforderlich, damit das DGM den Erfordernissen eines hoch qualitativen DOP entspricht?
- Wie gut sind die Punktwolken für die Ableitung von 3D Stadtmodellen geeignet?
- Wie präzise können die Gebäudegrundrisse aus den Daten abgeleitet werden?
- Wie Präzise können die Dachformen und Dachaufbauten bestimmt werden?

Nicht alle diese Fragen können in dem Aufsatz untersucht und beantwortet werden. Dies ist ein laufender Prozess und erfordert noch sehr viel Arbeit.

2.4 Software

Im Rahmen des Projekts wurden die bei BSF Swissphoto im Einsatz befindlichen Programme Soccet Set NGATE und Inpho Match AT zur Erstellung der Punktwolken verwendet. Der Test mit SatPP (ETH Zürich) und mit Simactive ist noch nicht weit fortgeschritten. Zur Klassifizierung wurde Software von Terrasolid verwendet.

Es wurde vor allem mit Standard-Parametersätzen gearbeitet – entweder von Software-Hersteller vorgeschlagen oder aus den Erfahrungen bei BSF Swissphoto abgeleitet. Natürlich beinhaltet jedes Softwarepaket noch ein Steigerungspotential durch Anpassung der Parametersätze an die individuelle Situation. Dies widerspricht jedoch häufig der Praxis. Mit immer kürzer werdenden Produktionszeiten hat man selten die Zeit bei umfangreichen Projekten lange zu testen.

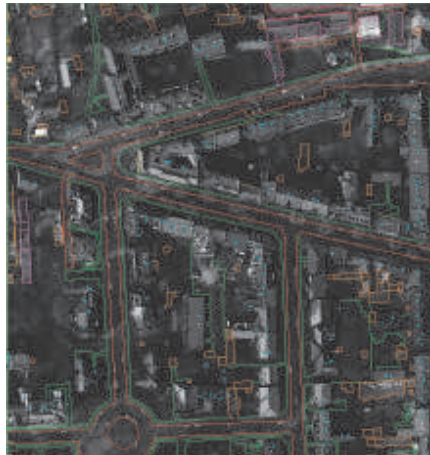


Abb. 3: Referenzdaten: Stereoauswertung

3 Ergebnisse

3.1 Matching

Die Dichte der Punkte und der Verlauf der Ergebnisse sind sehr unterschiedlich. Es verbleiben auch mit den modernsten Methoden immer noch schräge Wände, Lücken in den Daten und Fehlzuordnungen (Abb. 4). Diese unterscheiden sich naturgemäß beträchtlich in Abhängigkeit von der Bodenauflösung. Aber auch die unterschiedlichen Software liefert teils beträchtlich unterschiedliche Ergebnisse. Der Einfluss der Überlappung wurde noch nicht untersucht.

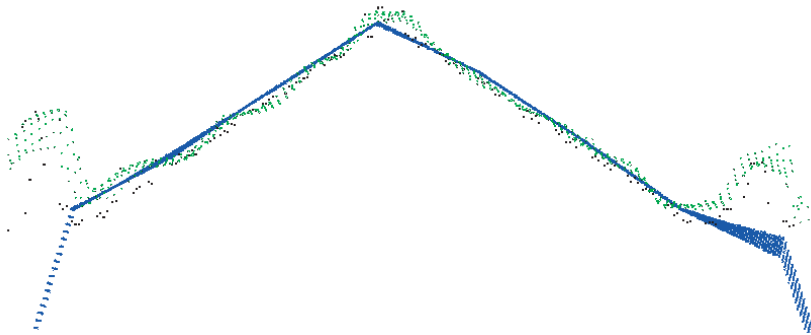


Abb. 4: Gebäudeprofil mit Laserpunkten (schwarz) und Ergebnisse aus Datensatz 03 mit Match-T (blau) und Datensatz 04 mit Match-T (grün)

3.2 Genauigkeiten

Es laufen umfangreiche Genauigkeitsuntersuchungen. Diese erfolgen mit einem virtuellen Netz von $10\text{m} \times 10\text{m}$ über dem Testgebiet. Die Punkte wurden dann einer der drei Klassen (Gebäude, Gelände, sonst.) zugeordnet. Dabei werden verglichen

- Unterschiedliche Objektflächen Gebäude vs. Gelände
- Unterschiedliche Software (z.B. Abb.5)
- Unterschiedliche Bodenauflösungen
- Unterschiedliche Überlappungen

Derzeit lässt sich keine Abschließende Genauigkeitsaussage machen. Für statistische Analyse verfälschen Punkte an Unstetigkeitsstellen das Ergebnis signifikant. Innerhalb ebener Flächen sehen die Ergebnisse sehr gut aus, aber es bleibt das Problem von Unstetigkeitsstellen in der Oberfläche. Aber genau diese Unstetigkeitsstellen sind es, die sowohl für die Erstellung von Geländemodellen für die differentielle Entzerrung zur Erstellung von Orthophotos, als auch für die Erstellung von 3D Stadtmodellen von entscheidender Bedeutung sind. Somit kann die Genauigkeit noch nicht als generell ausreichen bezeichnet werden.

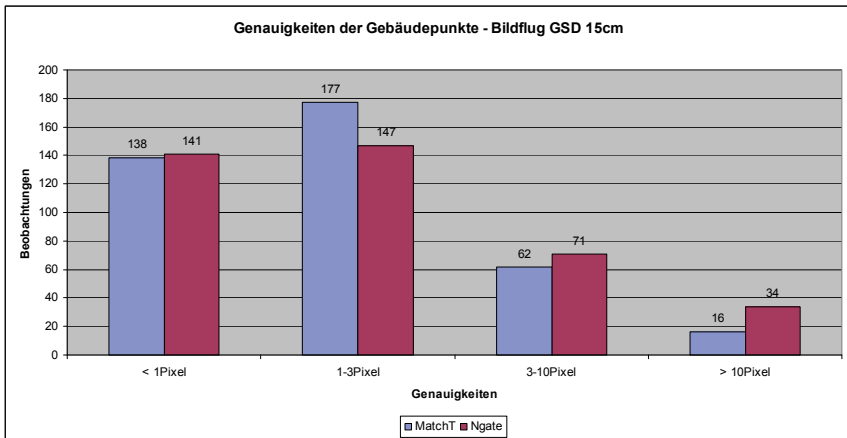


Abb. 5: Genauigkeitsverteilung mit unterschiedlicher Software: Match-T vs. NGATE, Datensatz 04, Abweichungen vom ALTM-Datensatz bei Gebäudepunkten

3.3 Klassifizierung

Die Klassifizierung der Punktwolken erwies sich als schwierig. Die teilweise sehr hohen Punktdichten (bis 400 Pkt/m² bei 5cm GSD und 1:1 Matching) überforderten teilweise die vorhandene Software von Terrasolid. Es wurden aus der ALTM-Bearbeitung bewährte Makros auf die Aufgabenstellung angepasst. Festgestellt wurde im Rahmen der Klassifizierung häufig eine große Anzahl von Fehlmessungen, z.B. in Form von zu tief gemessenen Punkten. Schwierig erweist sich die Unterscheidung von Vegetation und Gebäuden, besonders wenn die Gebäude als zusammenhängende und komplizierte Gebäudekomplexe vorliegen. Entweder werden nicht alle Gebäude erfasst, oder eine große Menge Vegetation wird irrtümlich der Klasse Gebäude zugeschlagen. Umfangreiche manuelle Nacharbeiten erwiesen trotz der guten Ausgangslage sich

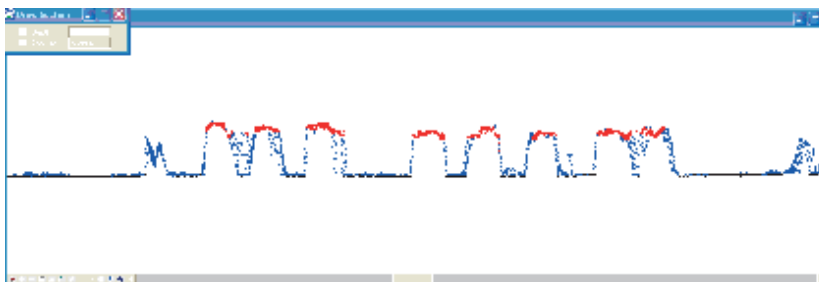


Abb. 6: Klassifizierungsergebnis mit drei Klassen (rot: Gebäude, schwarz: Gelände, sonst.) aus 5 cm GSD mit NGATE

als erforderlich.

Gegebenenfalls lässt sich die Klassifizierung durch Gebäudeumringe aus Bestandsdaten verbessern – da wir aber auch die Gebäudeumringe aus den Daten ableiten wollen, besteht hier ein unsauberer Zirkelschluss.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Es lässt sich zusammenfassend sagen, dass die Versprechungen der Softwarehersteller grundsätzlich eingehalten sind. Allerdings bemerkt man in der Praxis, dass die vorgestellten Beispiele in der Literatur natürlich immer die schönsten Ergebnisse zeigen. In der Praxis und in der Fläche wird diese Qualität nur selten zu erreichen sein. Die vorgestellten Arbeiten sind definitiv noch nicht abgeschlossen. Die Zahl möglicher Vergleiche und Analysen erfordert noch eine Menge Arbeit.

Von einem Ende des Laserscannings kann also in der Praxis noch keine Rede sein. Die Ergebnisse haben sich in den letzten Jahren deutlich verbessert. Jedoch sind beide genannten Aufgaben: Digitale Geländemodelle für die Erstellung von Orthophotos und Punktwolken zur Ableitung von 3D Stadtmodellen auch heute noch weit von einem voll automatischen Prozess entfernt. Bisher kommt man um intensive manuelle Nacharbeiten in beiden Fällen noch nicht herum.

Die Untersuchungen werden fortgesetzt um zumindest die optimale Konstellation und Einstellungen zu ermitteln. Weitere Arbeiten sind zur automatischen Qualitätsbewertung von Punktwolken und daraus abgeleiteten Produkten erforderlich.

5 Literaturverzeichnis

- HAALA, N. & WOLFF, K., 2009: Digitale photogrammetrische Luftbildkamerasysteme - Evaluation der automatischen Generierung von Höhenmodellen. Deutsche Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung, DGPF-Jahrestagung Jena 2009, Band 18
- HIRSCHMÜLLER, H., 2011: Semi Global Matching – Motivation, Developments and Applications. Photogrammetric Week 2011, Wichmann, 2011
- ROTHERMEL, M., HAALA, N. & WENZEL, K., 2011: Potential dichter Bildzuordnung für die Erzeugung von Höhenmodellen. Deutsche Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung, DGPF-Jahrestagung Mainz 2011, Band 20

6 Danksagung

Wir danken dem gesamten Team der BSF Swissphoto für die Unterstützung bei den Untersuchungen. Das gesamte Team hat an den Untersuchungen mitgearbeitet.

Einsatz von GML-Datenbanken in der 3D-Simulation

DR. CHRISTOPH AVERDUNG¹

Zusammenfassung: Die Veröffentlichung beschreibt die Übertragung der Verfahren einer standardisierten Verwaltung und Aufbereitung von Geobasisdaten in die Welt der Simulationssysteme. Insbesondere wird die „Durchlässigkeit“ von Daten und Methoden auf deren Weg von der Basis hin in diese hochspezialisierten Systeme vorgestellt. Darüber hinaus wird beispielhaft auf die gezielte Verwendung dieses methodischen Ansatzes in Simulationsanwendungen mit verteilt operierenden Systemen eingegangen.

1 Einleitung

Simulationssysteme bündeln eine Vielzahl unterschiedlicher und durchaus heterogen strukturierter Informationsquellen, um sie anschließend für den eigentlichen Simulationsprozess zu aggregieren und visuell aufzubereiten.

Diese Aufgabe fällt umso leichter, wenn sich die Datengrundlage und die darauf aufsetzenden Methoden insgesamt an internationalen Normen und Standards in der Modellierung, Speicherung und Visualisierung orientieren. Dabei hilft die rasante Weiterentwicklung der relationalen Datenbanktechnologien in Richtung objektrelationaler Datenbanksysteme, so dass nunmehr das Objektmodell und die Objektstruktur im Zentrum des Interesses stehen. Das aktuelle Leitmotiv ist hier die Umsetzung und verlustfreie persistente Speicherung der Realweltobjekte mit all ihren Eigenschaften und Beziehungen.

Dies führt im Idealfall zur Übereinstimmung von externem, konzeptuellem und internem Schema und ist damit seit einigen Jahren die Grundlage einer Vielzahl von Anwendungen im Zusammenhang mit der 3D-Stadt- und -Landschaftsmodellierung. So haben eine Vielzahl von Kommunen und Landesverwaltungen mit dem entsprechenden Aufbau ISO/OGC-konformer CityGML-Datenbanken bereits begonnen. Darüber hinaus finden sich auch in anderen Anwendungsgebieten ISO-konforme Standards (z.B. SEDRIS), die eine umfangreiche Modellierung einer kompletten Umwelt gestatten. Damit rücken diese Verfahren automatisch in das Blickfeld der angestrebten OGC-konformen Abbildung von virtuellen Realitäten.

In Ergänzung dazu sind ebenfalls Ansätze zu beobachten, die dynamischen Modelle einer Simulation mit ihren Eigenschaften in standardisierter Form in GML-Datenbanken abzulegen, um deren Veränderungen zur Laufzeit einer Simulation dort unter realzeitlichen Aspekten fortzuführen und diese Information gezielt an die übrigen Teilnehmer einer Simulation zu verteilen. Beispiele zu dieser Vorgehensweise finden sich in dem Projekt Virtueller Wald NRW, in dem Vorhaben zum Aufbau einer Verteilten Integrierten Erprobungslandschaft (VIntEL) der

¹ Dr. Christoph Averdung, CPA Systems GmbH, Am Seidenberg 3a, 53721 Siegburg; E-Mail: averdung@supportgis.de

Bundeswehr oder in dem BMBF-Forschungsprojekt FastMap für eine schnelle 3-D Kartengenerierung für planetare Lande- und Explorationsoperationen.

2 Mehrdimensionale GML-Geodatenbanken

Eine geringe Anzahl von Herstellern sogenannter Geoinformationssysteme ist zugleich auch der Produzent von Geodatenbanken. Nahezu alle diesbezüglich vorhandenen Datenbanksysteme sind jedoch eng mit den darauf aufbauenden Geoinformationssystemen verknüpft. Damit verbunden ist jedoch eine unmittelbare Abhängigkeit von dem jeweiligen Hersteller des Geoinformationssystems und seiner Geodatenverwaltung.

Seit einigen Jahren ist jedoch – bezogen auf den aktuellen Stand der Technik bei den Geodatenbanken – eine Trendwende zu beobachten. Maßgeblichen Einfluss haben die internationalen Bemühungen des Open Geospatial Consortiums (OGC) zur Normierung und zur Standardisierung der Beschreibung von und des Zugriffs auf Geodaten.

Üblicherweise wird seitdem die Strategie verfolgt, Geodatenbanken und Client-Systeme über webbasierte Services für die Speicherung und den Rückgriff auf mehrdimensionale Geodaten zu koppeln. Allgemeine Grundlagen bilden die Normierungen der ISO-Normenreihe 19100 (XML) und die Spezifikationen der OGC (GML).

GML – speziell GML3 – ist eine XML Syntax zur Beschreibung von vektorbasierten Geodaten. Sie besitzt in ihrer Grundform Konstrukte zur Modellierung von 2-3 dimensional Geometrien mit Bezug auf EPSG-basierte Koordinaten-Referenzsysteme, topologischen Beziehungen, objektorientierten Fachdatenmodellen mit beliebig komplexen Attributtypen, Relationen in Form von Aggregationen und Kompositionen sowie Verknüpfungen zwischen Geometrie und Sachdaten.

Die GML-Syntax bezieht ihre Grundtypen aus den Spezifikationen der ISO 19100er Familie. Die Modellierung einer Fachanwendung erfolgt durch die Definition von GML-basierten XML-Schemata. Damit können ISO-konforme Datenmodelle beschrieben werden. Verschiedene mittels GML beschriebene Anwendungen haben jeweils eigene Anwendungsschemata, welche durch eine XSD-Datei beschrieben werden.

Im Kern handelt es sich daher beim logischen Datenmodell um die modellhafte Abbildung der Eigenschaften von Modellobjekten mit dem Ziel einer für den Auftraggeber lesbaren Übertragung dieser Strukturen in die Tabellen einer objektrelationalen Datenbank.

Der Anwender „erwirbt“ mit diesem Ansatz eine produktneutrale Beschreibung seiner Geodaten sowie die weitgehende Unabhängigkeit seiner Anwendung von der verwendeten Geodatenverwaltung und den darunter liegenden kommerziellen, meist objektrelationalen Datenbanksystemen wie Oracle oder PostgreSQL.

Die wohl am weitesten fortgeschrittene Umsetzung einer ISO/OGC-konformen Geodatenverwaltung wird derzeit von der CPA Systems zur Verfügung gestellt. Die Grundlage dieser unter dem Namen SupportGIS-Technologie bekannten deklarativen Beschreibung von Geodatenmodellen in objektrelationalen Datenbanken bilden die sich aus der Modellbeschreibung UML ableiten lassenden XML Metadata Interchange (XMI)-Dateien. Deren Interpretation sorgt für eine generische SQL-Tabellenstruktur, die für den schreibenden und lesenden Zugriff über ebenfalls in der Datenbank gespeicherte Metadaten decodiert wird. Im

Kern verwaltet diese Geodatenverwaltung Vektor-, Raster- und sonstige Geländemodellaten, Satellitendaten und Luftbilder sowie Metadaten zu den Geodaten. Eine Besonderheit ist zudem die implizite Fähigkeit zur Abbildung temporaler Eigenschaften der Geodaten (mit einer Versionierung und Historisierung auf der Ebene von Objekten und Attributen) sowie die grundsätzliche Eignung zur Aufnahme dynamischer Modellaten während einer Simulation mit deren semantischen und geometrischen Eigenschaften.

Für die Abbildung dieser temporalen Eigenschaften wird in SupportGIS in Bezug auf die ISO 19108 Temporal Scheme eine Versionierung von Attributwerten ganz allgemein über n Zeitbegriffe betrachtet. Für jede Attributversion wird dazu ein Tupel von n Intervall-Anfängen gespeichert. Beim Schreiben eines Attributwertes muss daher – außer der Systemzeit – zu jedem ein Zeitwert angegeben sein, ab dem der Wert definiert sein soll.

Mithilfe dieser Strategie kann die Geodatenverwaltung auf unterschiedliche raumbezogene Geo- und Modellatenmodelle eingerichtet werden – und somit auch auf die individuellen Anforderungen unterschiedlicher Projekte reagieren. Für den webbasierten Zugriff auf diese Daten stellt die SupportGIS-Technologie zugleich diverse OGC-konforme Services zur Verfügung, z.B. Web Feature Service Transactional (WFS-T), Web 3D Service (W3DS), Web Map Service (WMS) und Web Coverage Service (WCS).

Dabei hilft es, dass sich die in einem Vorhaben konzipierten Datenmodelle in verschiedenen Datenbanksystemen abbilden und sich über den vorgenannten Software-Kernel wieder nach außen einheitlich zusammenführen lassen. Dieser Ansatz unterstützt auch die Speicherung der Geodaten auf unterschiedlichen physikalischen Devices, Datenbanksegmenten bzw. Cluster. So kann je nach Datentyp und Datenmenge die leistungsstärkste Form der zur Verfügung stehenden Hardware-Architektur gewählt werden. Dies schließt ebenso die reine Verwaltung von Daten im RAM des Computers mit ein.

Diese Technologie ist die Basis für eine Vielzahl von raumbezogenen Anwendungen (ALKIS, ATKIS, Kommunales GIS, Bodenordnung, Simulationssysteme, ...). Ein Software-Entwickler kommuniziert mit dieser Geodatenverwaltung grundsätzlich über eine einheitliche und seinem Realweltmodell entsprechende Zugriffsarchitektur. Dies geschieht über den objektorientierten JAVA-Software-Kernel der Geodatenverwaltung, die darauf aufsetzenden ISO/OGC-konformen Services oder unmittelbar per Standard-SQL auf dem Datenbanksystem. Dadurch kann der Entwickler die unterschiedlichen Datenbestände seines Vorhabens einheitlich in seiner Anwendung führen und somit den dauerhaften Bestandsschutz seiner Arbeit erreichen. Dabei ist er von der reinen physikalischen Datenverwaltung der Geodaten entkoppelt; seine Anwendung nimmt automatisch Anteil an der fortschreitenden Entwicklung der Computer- und Datenbanktechnologie.

Damit stellt die SupportGIS-Technologie eine flexible und leistungsstarke raumbezogene Geodatenverwaltung zur Verfügung. ISO/OGC-konforme Normen und Standards finden durchgängig auf den verschiedenen Ebenen dieser Technologie ihre Anwendung – bei der Datenmodellierung und dem daraus folgenden Ableiten der Datenbankstrukturen, beim Datenzugriff per Software-Kernel oder idealerweise per ISO/OGC-konformer Services.

Das Ergebnis ist ein offenes, herstellerunabhängiges Konzept, welches sich in seiner nunmehr mittels SupportGIS implementierten Form hervorragend als Datenbasis für Simulationssysteme eignet.

3 GML-Datenbanken in der Simulation

Ausgestattet mit der Fähigkeit, eine nahezu beliebige Realweltmodellierung in standardisierter Form als GML-Datenbank zur Verfügung zu stellen, war es naheliegend, die SupportGIS-Technologie nicht nur für die Umsetzung "klassischer" GIS-Themen einzusetzen, sondern sie darüber hinaus in der 3D-Simulation einzusetzen.

Ein typisches und mittlerweile in mehreren Fachprojekten evaluierten Einsatzszenario sieht vor, die SupportGIS-Technologie als zentrale Simulationsdatenbasis für statische (Gelände, Vegetation, Gebäude, etc.) und dynamische Modellobjekte (Fahr- und Flugzeuge, sonstige bewegliche Objekte) zu verwenden.

Dabei werden die Inhalte dieser Simulationsdatenbasis für die Initialisierung der angeschlossenen Simulationssysteme benutzt. Zusätzlich und unter Einbeziehung der temporalen Eigenschaften des SupportGIS-Kernels werden die sich während des Verlaufs der Simulation ändernden Attributwerte der Modellobjekte kontinuierlich und mit einem individuellen Zeitstempel versehen, in der Simulationsdatenbasis fortgeführt. Während die sich ändernden Attributwerte einer Versionierung unterliegen, erfolgt eine Historisierung der Modellobjekte bei deren Löschen.

Damit die an die Simulationsdatenbasis angeschlossenen Simulations- und Geoinformationssysteme Kenntnis von den jeweiligen Veränderungen während der Simulation erhalten, erfolgt eine kontinuierliche Weitergabe dieser Veränderungen in der Datenbasis in Form eines Notification-System (Push-Mode) an die angeschlossenen Systeme.

Durch das Mitschreiben aller Veränderungen an den statischen und dynamischen Modellobjekten wird zugleich ein Replay des gesamten Simulationsverlaufs möglich. Die Folge an Attribut- und Objektversionen in der Datenbasis entspricht hier dem tatsächlichen Simulationsverlauf. Bedeutung erhält diese Eigenschaft "zentrales Logbuch" insbesondere für die nachgelagerte Analyse des Systemverlaufs sowie grundsätzlich für dessen Dokumentation. Voraussetzung dafür ist, dass das Aufzeichnen der Veränderungen aus Sicht des Simulationsverlaufs (nahezu) in Echtzeit geschieht.

Konkret werden diese Eigenschaften der SupportGIS-Technologie als zentrale Simulationsdatenbasis in unterschiedlichen Projekten über eine Anbindung des Simulationssystems VEROSIM[®] abgerufen. Bei diesem System handelt es sich um eine Entwicklung der Dortmunder Initiative zur rechnerintegrierten Fertigung (RIF) e.V. zusammen mit dem Institut für Mensch-Maschine-Interaktion (MMI) der RWTH Aachen.

VEROSIM[®] bildet die in der Simulationsdatenbasis festgelegte Realweltmodellierung generisch in seinen Datenstrukturen ab und verbindet sich mit der Datenbank über ein C++-Interface, Feature-orientierte OGC-Services sowie den benannten Notification-Mode. Damit lassen sich mit VEROSIM[®] auf der Grundlage der zentralen Simulationsdatenbasis sowohl singular operierende Simulationssysteme als auch ein Verbund von mehreren untereinander für den Nachrichtenaustausch über die Datenbank vernetzten Simulationssystemen aufbauen. Die folgenden Beispiele verdeutlichen die Einsatzreife dieser Technologie.

3.1 Virtueller Wald NRW

Das im März 2010 gestartete aktuelle Forschungsprojekt Virtueller Wald NRW trägt den Titel "Entwicklung moderner Verfahren für ein integriertes Großraumwaldinformationssystem und die effiziente technische Produktion in der Waldwirtschaft zur zielgerichteten Rohstoff-Mobilisierung und -Bereitstellung für die Holzwirtschaft". Das Land NRW und die Europäische Union stellen für diese dritte Projektphase des Virtuellen Waldes die Mittel bereit. Die Entwicklungsaufgaben werden von RIF und dem Institut für Mensch-Maschine-Interaktion der RWTH Aachen (MMI) in enger Kooperation bearbeitet. Zudem werden, wie bei den Vorläuferprojekten, fachspezifische Fragestellungen in enger Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl für Forstliche Arbeitswissenschaften und Angewandte Informatik und dem Lehrstuhl für Waldwachstumskunde, beide TU München, dem Institut für Roboterforschung der TU Dortmund, der Pöyry Management Consulting (Deutschland) GmbH und der Firma CPA-Systems GmbH durchgeführt.

Grundlage all dieser Entwicklungen ist eine leistungsfähige IT-Infrastruktur im Sinne der Richtlinien der GDI-DE und der EU (Inspire), die auf der Grundlage der SupportGIS-Technologie der CPA realisiert wurde.

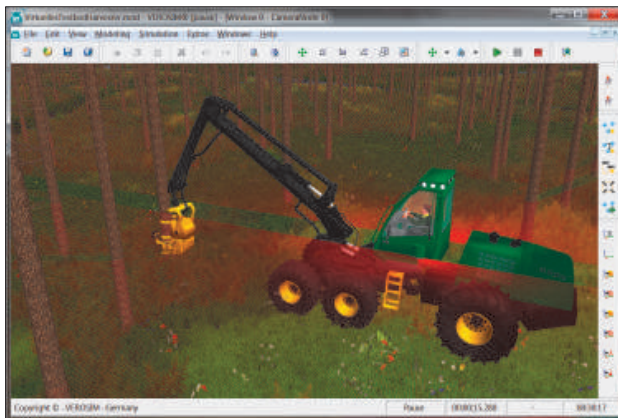


Abb. 1: Harvester mit simuliertem Laserscanner zur gezielten Orientierung im Wald (© 2012 MMI RWTH Aachen)

Aufgrund des ausschließlichen Einsatzes internationaler Normen und Standards (ISO-Normenreihe 19100 - XML, Open Geospatial Consortium - GML) bei der Datenmodellierung, -speicherung und -auslieferung werden in diesem Projekt sämtliche Daten und Werkzeuge flexibel in vielfältige Geschäftsprozesse integriert. Die Herausforderungen lagen hierbei nicht nur in den auftretenden Datenmengen (z. B. 240 Mio. Einzelbäume, landesweite Inventurdaten, etc.) sondern in der Konzeptionierung und Entwicklung neuer Methoden zur Versionierung und

Historisierung, der Integration leistungsfähiger Authentifizierungs- und Autorisierungsprozesse sowie zum Daten-Workflow in einem heterogenen und verteilten System.

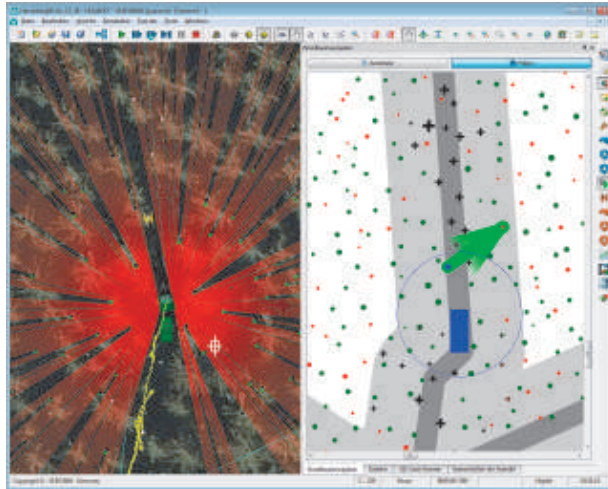


Abb. 2: Simulation der Einzelbaum-Lokalisation für Holzerntemaschinen (© 2012 MMI RWTH Aachen)

Im Ergebnis steht nunmehr ein 4D-ForstGIS zur Verfügung, dessen Modellierung per ForestGML die Daten auf unterschiedlichen Systemen vom Fahrzeugcomputer über TabletPC und Rechnercluster zur Sensordatenverarbeitung bis hin zur stereoskopischen Panorama-Projektion zur High-End-Visualisierung online- und offline visualisiert und bearbeitet oder in forstwirtschaftliche Simulationsanwendungen überführt.

3.2 VIntEL

Das Ziel des BWB-Vorhabens einer "Verteilten Integrierten Erprobungslandschaft (VIntEL)" ist die Durchführung eines gemeinsamen Simulationsverlaufs mit heterogenen Simulationssystemen unter sogenannten "Fair-Fight"-Bedingungen.

Im Rahmen dieses Projektes wird die SupportGIS-Technologie als Datenbank-Komponente für die initiale Versorgung der einzelnen Simulationssysteme eingesetzt. Dazu wurde die Umweltdatenmodellierung der "Synthetic Environment Data Representation and Interchange Specification (SEDRIS)" (ISO 18023ff.) in die Normenreihe ISO 19100 (XML/GML) übertragen. Sie steht seitdem (2011) als XSD-Datenschema zur Verfügung und dient hier dem Aufbau eines die Simulationssysteme mit Daten versorgenden "Synthetic Environmental Service (SES)".

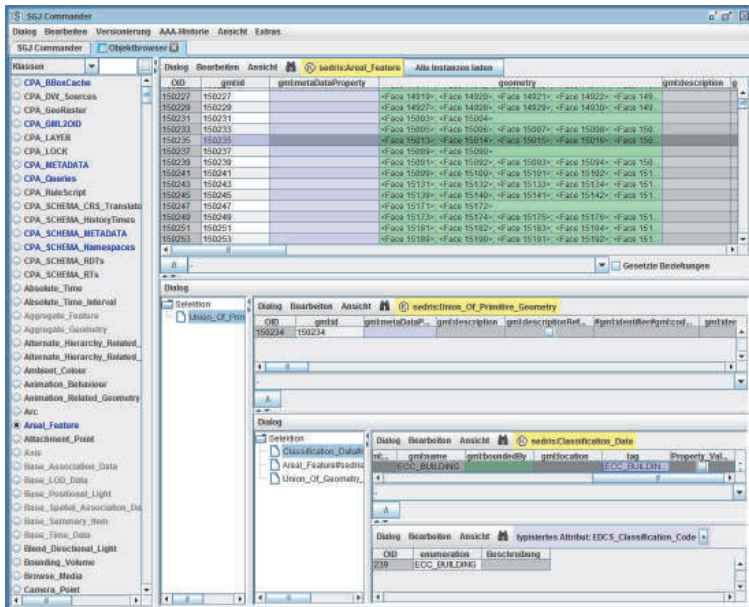


Abb. 3: SEDRIS als GML-Datenmodell in SupportGIS (© 2012 CPA Systems GmbH)

Dieser SES ist zugleich die Datenbasis für das Nachhalten aller zur Laufzeit stattfindenden dynamischen Veränderungen an den Simulationsdaten sowie für eine über einen "Synthetic Dynamic Service (SDS)" gesteuerte Versorgung der angebotenen Simulationssysteme mit Änderungsdaten und parametrisierten Informationen über Veränderungen an den Daten.

Partner in diesem Projekt sind neben der CPA Systems GmbH die Unternehmen Rheinmetall Defence Electronics (RDE), Industrieanlagen-Betriebsgesellschaft (IABG) mbH, Thales Defence Deutschland GmbH und EADS Deutschland GmbH, Division Cassidian. Für die Prototypenentwicklung wurde u.a. VEROSIM[®] als Simulationssystem angebunden.

3.3 FastMap

Das BMBF-Projekt FastMap erforscht die Methoden einer schnellen 3-D Kartengenerierung für planetare Lande- und Explorationsoperationen. Dies geschieht vor dem Hintergrund, dass der Einsatz von Robotern bei der Erforschung von Planeten und der Exploration unseres Sonnensystems unverzichtbar ist.

Dabei stellt die Fähigkeit zur „Selbstlokalisierung“ dieser Roboter eine unverzichtbare Schlüsselkomponente für robotische Planetenlandungen und -erkundungen dar. Die Selbstlokalisierung leistet in zwei entscheidenden Phasen einer z.B. robotischen Mondexplorationsmission

einen wichtigen Beitrag. Zum einen spielt die Selbstlokalisierung in der Phase der zielgenauen Durchführung der Landung auf einem Planeten eine entscheidende Rolle. Zum anderen ist die Selbstlokalisierung nach der Landung die essentielle Grundlage für die Navigation des Roboters auf dem Planeten selbst.

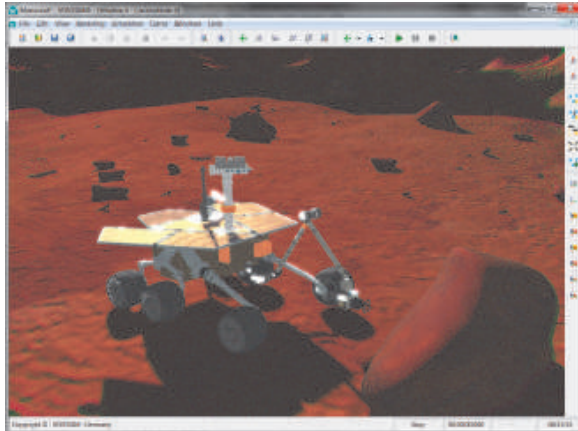


Abb. 4: Realisierung von Testsystemen für die planetare Exploration (© 2012 MMI RWTH Aachen)

Mithilfe der SupportGIS-Technologie wird den Partnern in diesem Forschungsprojekt eine GML-strukturierte Geo- und Modelldatenverwaltung zur Verfügung gestellt. Diese bildet die Grundlage für die geplante Entwicklung von Verfahren zur Erzeugung von 3-D Terrainmodellen mit Landmarkenbestimmung aus stereoskopischen Bildaufnahmen in der Anflugphase zur Durchführung des Landevorgangs und zur Vorbereitung der Selbstlokalisierung von mobilen Robotern auf planetaren Oberflächen im Rahmen von Explorationsmissionen. Die SupportGIS-Technologie ist hier die zentrale Drehscheibe für die Entgegennahme der Sensordaten sowie die Datenversorgung der Algorithmen und Simulationssysteme (VEROSIM[®]).

An dem Projekt sind neben der CPA Systems GmbH die Dortmunder Initiative zur rechnerintegrierten Fertigung (RIF) e.V., das Institut für Mensch-Maschine-Interaktion (MMI) der RWTH Aachen sowie das Unternehmen VCS Aktiengesellschaft aus Bochum beteiligt.

4 Zusammenfassung und Fazit

Die Übertragung der im Kontext der Geoinformationssysteme etablierten Verfahren zur standardisierten Modellierung und Strukturierung von Simulationsdaten erlaubt den schnellen und ständigen Datenfluss in einem Simulationsverlauf. Der Einsatz einer ebenso auf Standards basierender 3D-GML-Datenbanktechnologie erlaubt die kontinuierliche Speicherung aller

Zwischenergebnisse sowie deren Veröffentlichung in Richtung aller am Simulationsverlauf beteiligter Systeme.

Die Entsprechung der Datenschemata des Datenbanksystems und des Simulationssystems vermeidet dabei den Informationsverlust bei der Datenkonvertierung in „simulationsfreundliche“ Datenformate. Zugleich lassen sich die Konzepte für die Verwaltung großer Datenmengen, die Versionierung und Historisierung der Simulationsdaten, die Authentifizierung und Autorisierung und die Verfahren zur Datensicherung nahtlos in die Welt der Simulationssysteme übertragen.

Im Ergebnis steht mit der SupportGIS-Technologie und der VEROSIM[®]-Anwendung ein vielfältig einsetzbares Werkzeug für die Durchführung von Simulationsläufen in unterschiedlichen Fachgebieten mit und ohne Raumbezug zur Verfügung. Damit ist die Online-Steuerung einer verteilten Simulation über standardkonforme Datenbank-Technologien in der Realität angekommen.

5 Literaturverzeichnis

- OpenGIS Geography Markup Language (GML) Encoding Standard. v. 3.2.1. Open Geospatial Consortium. <http://www.opengeospatial.org/standards/gml>. 2007
- OpenGIS City Geography Markup Language (CityGML) Encoding Standard. v. 1.0.0. Open Geospatial Consortium. <http://www.opengeospatial.org/standards/citygml>. 2008
- OpenGIS Web Feature Service (WFS) Implementation Specification. v. 1.1.0. Open Geospatial Consortium. <http://www.opengeospatial.org/standards/wfs>. 2005
- INSPIRE Richtlinie der Europäischen Commission. <http://inspire.jrc.ec.europa.eu/>.
- ISO 19108-2002. Geographic Information - Temporal schema. <http://www.iso.org/iso/>. Catalogue Number 26013. TC211. 2008.
- SEDRIS Specification. <http://standards.sedris.org>.
- Virtueller Wald. Projektbeschreibung. <http://www.mmi.rwth-aachen.de/?virtuellerwald0>.

Immersive Visualisierung von virtuellen 3D-Stadtmodellen und ihr Einsatz in der Stadtplanung

JURI ENGEL¹ & JÜRGEN DÖLLNER²

Zusammenfassung: Virtuelle 3D-Stadtmodelle ermöglichen die effektive Kommunikation komplexer stadträumlicher Informationen. Immersive Visualisierung von virtuellen 3D-Stadtmodellen bietet einen intuitiven Zugang zu diesen Informationen und eröffnet neue Anwendungsfelder in der Stadtplanung, z. B. bei der Entscheidungsfindung, dem Marketing und der Öffentlichkeitspräsentation von Projekten, Vorgängen oder Konzepten. Immersive Visualisierung impliziert zahlreiche Anforderungen an das Softwaresystem. In diesem Beitrag untersuchen wir die softwaretechnischen Herausforderungen bei der Entwicklung eines solchen Systems und zeigen anhand eines Prototyps zur immersiven Visualisierung von virtuellen 3D-Stadtmodellen wie man diese Herausforderungen bewältigen kann.

1 Einleitung

Stadtplanungsprojekte erstrecken sich über lange Zeiträume, involvieren eine große Anzahl an betroffenen Entscheidungsträgern und erfordern komplexe Entscheidungsfindung (HUNT et al. 2008). Viele der Entscheidungen müssen in einer frühen Projektphase getroffen werden und dabei die topologischen und geometrischen Gegebenheiten wie auch ökonomische, soziale und kulturelle Faktoren berücksichtigen (HAMILTON 2005). Dies erfordert einen schnellen Zugang zu stadträumlichen Informationen und insbesondere deren effektive Kommunikation. Die etablierten GIS (Geoinformationssysteme) sind jedoch einerseits als Experten-Werkzeuge konzipiert und basieren andererseits auf 2D-Konzepten, während die zugrundeliegenden Daten bei der Stadtplanung drei- oder vierdimensional sind (ISAACS et al. 2011).

Virtuelle 3D-Stadtmodelle ermöglichen die effektive Kommunikation komplexer dreidimensionaler stadträumlicher Informationen. Eine Vielzahl von Werkzeugen stellt Funktionen zur Visualisierung, Editierung und Analyse virtueller 3D-Stadtmodelle bereit (z. B. Autodesk Infrastructure Modeler, CityGRID und CityServer3D). Diese Systeme sind jedoch im Allgemeinen auch als Experten-Werkzeuge konzipiert und unterstützen die Visualisierung auf klassischen Ausgabemedien. Dadurch ist ihr Einsatz in Situationen die Kollaboration erfordern nur eingeschränkt möglich, da nur eine sehr beschränkte Anzahl an Personen an einem Desktop-System gleichzeitig arbeiten kann oder räumlich verteilt gearbeitet werden muss. Des Weiteren ist eine hohe Vorstellungskraft erforderlich, um sich in die virtuelle 3D-Umgebung hineinversetzen zu können. Stadtplanung ist jedoch ein kollaborativer Prozess, in dem viele Nichtexperten involviert sind. Entscheidungen müssen von Nichtexperten ebenso verstanden, diskutiert und getroffen werden wie von Experten.

Immersive Umgebungen bieten dagegen einen komplementären, intuitiven Zugang zu komplexen virtuellen 3D-Stadtmodellen. Immersion beschreibt dabei das Gefühl sich räumlich in der virtuellen Umgebung zu befinden und erhöht somit deren Virtualität (MACEACHREN et al., 1999). LUTZ (2004) unterscheidet drei Arten von immersiven Umgebungen anhand des

¹ Juri Engel, Hasso-Plattner-Institut, Universität Potsdam; juri.engel@hpi.uni-potsdam.de

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



Abb. 1: Immersive Visualisierung eines virtuellen 3D-Stadtmodells im Elbe Dom

Sichtfeldes: immersive Desktop-Umgebungen, semi-immersive Umgebungen (z. B. Powerwalls) und voll-immersive Umgebungen (z. B. CAVEs) die das komplette Sichtfeld abdecken.

Gegenstand der hier vorgestellten Untersuchungen bildet die voll-immersive Umgebung "Elbe Dom" des Fraunhofer IFF in Magdeburg, die in Abschnitt 2 näher erläutert wird. Diese voll-immersive Umgebung stellt ein herausragendes Kommunikationsmedium auf Basis virtueller 3D-Stadtmodelle, z. B. für die Entscheidungsfindung, das Marketing und die Öffentlichkeitspräsentation von Projekten, Vorgängen oder Konzepten, dar. Immersion ermöglicht dabei besseres räumliches Verständnis von komplexen 3D-Strukturen (SCHUHARDT & BOWMAN, 2007), beschleunigt die Erstellung von kognitiven Karten (PAUSCH et al., 1997) und erhöht somit die Effektivität bei der Bewältigung von räumlichen Aufgaben (TAN et al., 2004).

Immersive Visualisierung von 3D-Stadtmodellen impliziert zahlreiche Anforderungen an das Visualisierungssystem. In Abschnitt 3 untersuchen wir die sich daraus entwickelnden Herausforderungen und zeigen anhand eines Prototyps (Abb. 1) wie man diese bewältigen kann. In Abschnitt 4 werden die Anwendungsmöglichkeiten von immersiver Visualisierung in der Stadtplanung aufgezeigt. Den Abschluss bildet die Zusammenfassung in Abschnitt 5.

2 Elbe Dom

Der *Elbe Dom* am Fraunhofer IFF in Magdeburg ist ein 360° zylindrisches Projektionssystem für großflächige interaktive Visualisierung (Abb. 2). Die zylindrische Projektionsfläche ist 6,5 m hoch und hat einen Durchmesser von 16 m. Durch seine Abmessungen ist der Elbe Dom besonders geeignet zur Visualisierung von großen Modellen, z. B. virtuellen 3D-Stadtmodellen, im 1:1 Maßstab. Andere Einsatzgebiete sind bisher z. B. Fabrik- und Anlagendesign, Simulation und Training von technischem Personal, und Marketing (BELARDINELLI et al., 2008).

Das 360°-Panorama wird mit Hilfe von sechs Laserprojektoren mit jeweils einem Bildwinkel von 68° und einer Auflösung von 1600×1200 Pixel erzeugt. Diese Auflösung entspricht 43 % der Maximalauflösung des menschlichen Auges (SCHOOR et al., 2008). Die Projektoren sind nicht Stereoskopie-fähig.

Die Bildsynthese wird von einem Render-Cluster mit einem Computer pro Projektor durchgeführt. Ein zusätzlicher Computer ist für die Synchronisation des Clusters und die

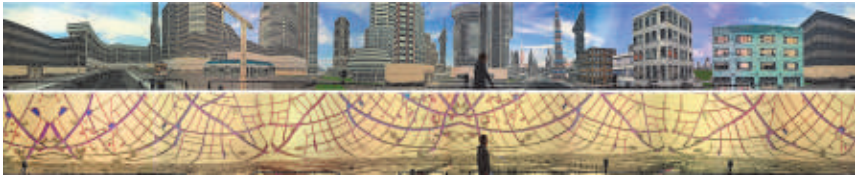


Abb. 2: Der Nutzer ist komplett umgeben von der 360° Visualisierung des 3D-Stadtmodells. Oberes Bild: realistische Visualisierung unter Verwendung der Zentralperspektive. Unteres Bild: Multiperspektive Visualisierung eines generalisierten 3D-Stadtmodells zur Erhöhung des visuellen.

Verarbeitung von Nutzereingaben zuständig. Ein Trackingsystem mit 12 Infrarot (IR) Kameras ermöglicht Positions- und Orientierungsbestimmung von Objekten in Echtzeit mit einer Genauigkeit von 2 mm. Tracking von Händen und Fingern ermöglicht beispielsweise kabellose Interaktion mittels Gesten.

Das Sound-System, bestehend aus 11 Lautsprechern, kann konfiguriert werden, um einen Raumklang innerhalb eines Bereichs mit 4 m Durchmesser zu erzeugen. Dies ermöglicht mehreren Nutzern gleichzeitig die räumliche Ortung von virtuellen Schallquellen.

3 Herausforderungen für immersive Visualisierungssysteme

Bei der Entwicklung eines Prototyps zur immersiven Visualisierung von virtuellen 3D-Stadtmodellen sind wir auf zahlreiche softwaretechnische Herausforderungen gestoßen. Im folgenden Kapitel werden diese Herausforderungen sowie Möglichkeiten diese zu bewältigen diskutiert.

3.1 Architektur und Synchronisation

Die Bildsynthese für hochauflösende Mehrfach-Projektor-Systeme muss in einem *Render Cluster* verteilt werden, weil ein einzelner Computer in der Regel nicht in der Lage ist in Echtzeit für alle Projektoren gleichzeitig Bilder zu erzeugen. Ein Render Cluster ist eine Gruppe vernetzter Computer (*Render Nodes*) zur parallelen Bildsynthese. Ni et al. (2006) und SOARES et al. (2008) geben einen Überblick über Algorithmen, Architekturen und Technologien für hochauflösende Displays und parallele Bildsynthese.

In unserem Prototyp haben wir den *Sort-First* Algorithmus implementiert (MOLNAR et al., 1994). Dabei wird das zu synthetisierende Bild segmentiert und die Segmente an die Render Nodes verteilt. Da im Elbe-Dom ein Render Node pro Projektor zur Verfügung steht, ist die Segmentierung und Verteilung trivial. Jeder Render Node synthetisiert die Bilder für den angeschlossenen Projektor. Die Synchronisation beschränkt sich dabei auf ein Minimum. Im Gegensatz zu *Sort-Middle* und *Sort-Last* Algorithmen müssen weder Bilder noch Geometrie zwischen den Nodes übertragen werden. Es existieren zahlreiche Frameworks, die einen oder mehrere dieser Algorithmen implementieren, z. B. VR Juggler, FlowVR und Equalizer.

Die Aufgabe der Synchronisation in einem Mehrfach-Projektor-System ist es sicherzustellen, dass die Bilder der unterschiedlichen Projektoren als ein kohärentes hochauflösendes Bild erscheinen. Dies wird erreicht durch *Gen-Lock*, *Data-Lock* und *Frame-Lock* (SOARES et al., 2008). *Gen-Lock* ist die Synchronisation der Videosignale, z. B. für Stereoskopie, ist meistens in Hardware implementiert und bedarf softwareseitig lediglich einer Konfiguration. *Data-Lock* ist

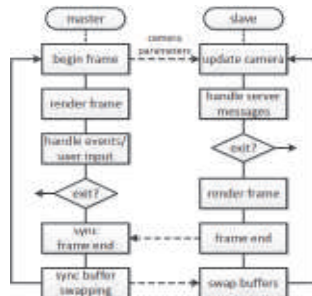


Abb. 3: Synchronisation des Clusters zur Bildsynthese. Am Anfang und Ende jedes Frames synchronisiert der Master-PC die Kamerakonfiguration und den Puffertausch der Slave-PCs.

die Synchronisation der für die Bildsynthese erforderlichen Daten, darunter auch die Position und Orientierung der virtuellen Kamera. Data-Lock ist anwendungsspezifisch und muss in Software implementiert werden. Abbildung 3 verdeutlicht das Synchronisationskonzept unserer Implementierung. Am Anfang jedes Frames überträgt der für die Synchronisation verantwortliche Computer, der sogenannte *Master*, die Parameter der virtuellen Kamera an alle zu synchronisierenden Computer, die *Slaves*, die ihre lokale Kamera entsprechend aktualisieren. Frame-Lock stellt sicher, dass alle Projektoren das nächste Bild gleichzeitig anzeigen. Fehlendes Frame-Lock führt zu *Tearing*-Artefakten, d.h. die Einzelbilder wirken verschoben zueinander. Dies wird durch Synchronisation am Ende jedes Frames erreicht. Die Slaves benachrichtigen den Master, dass die Bildsynthese abgeschlossen ist und warten (*frame end*). Wenn alle Slaves bereit sind, sendet der Master eine entsprechende Nachricht (*synch buffer swapping*), woraufhin alle Slaves die Bildpuffer tauschen und somit das synthetisierte Bild darstellen.

3.2 Herausforderungen bei der Bildsynthese

Eine wichtige Aufgabe der Bildsynthese ist die Bereitstellung von Tiefeninformationen, *Depth Cues*, die eine Wahrnehmung der Tiefe ermöglichen (PFAUTZ, 2000, CUTTING & VISHTON, 1995). Tiefenwahrnehmung ist die Fähigkeit, den Abstand zu und zwischen den Objekten einzuschätzen und die Welt damit dreidimensional wahrzunehmen. Eine starke Wahrnehmung der Tiefe erhöht das Gefühl der Immersion (BIGOIN et al., 2007).

Depth Cues können in monokulare, die mit einem Auge wahrnehmbar sind, und binokulare, die beide Augen zur Wahrnehmung benötigen, unterschieden werden. Binokulare Depth Cues, z. B. Stereoskopie, sind wichtig für nahe Objekte, spielen aber nur eine geringe Rolle bei Objekten, die weiter als 10 m entfernt sind (CUTTING & VISHTON, 1995, NAGATA, 1993) und damit bei der Visualisierung von virtuellen 3D-Stadtmodellen im 1:1 Maßstab.

Wir haben zahlreiche monokulare Depth Cues mit Hilfe der Real-Time Rendering Pipeline (AKENINE-MÖLLER et al., 2008) implementiert, z. B. lineare Perspektive, relative Größe, Texturgradient, Verdeckung und Bewegungsparallaxe. Schatten und Schattierung sind auch wichtige Depth Cues zur Kommunikation von Formen und Abständen von Objekten. Um diese zu erzeugen nutzen wir, neben lokaler Beleuchtung, *Ambient Occlusion* (AKENINE-MÖLLER et al., 2008) zur Simulation von globaler Beleuchtung.

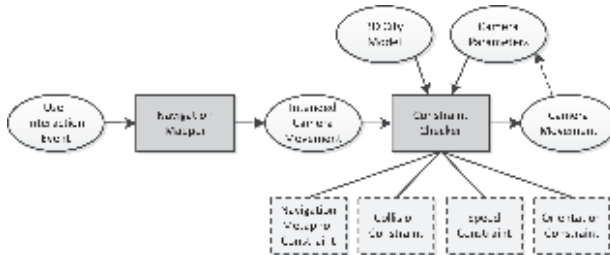


Abb. 4: Navigation mittels intelligenter Interaktionstechniken. Nutzereingaben werden indirekt auf Kamerabewegungen abgebildet und zusätzlich auf Einschränkungen geprüft um unerwünschte Kameraparameter auszuschließen.

Um mit Tiefenunschärfe einen weiteren Depth Cue zu erzeugen, stellen wir die Objekte im Hintergrund unscharf dar. Auch MATHER (1996) stellt fest, dass „der Realismus von computergenerierten Bildern durch das Hinzufügen von selektiver Unschärfe in Hintergrundbereichen erhöht werden kann“. Ein weiterer Depth Cue ist die Luft- und Farbperspektive. Dieser wird in der Computergraphik oft durch Nebel approximiert.

Die fotorealistische Darstellung, die bei der Exploration von virtuellen 3D-Stadtmodellen oft gewünscht ist, stellt zusätzliche Anforderungen an die Bildsynthese. Erst durch eine glaubhafte visuelle Darstellung ist eine volle Immersion möglich, denn visuelle Fehler und zu geringe Auflösung von Geometrie und Texturen fallen dem Nutzer auf, lenken ihn ab und verringern somit die Immersion. Besondere Aufmerksamkeit muss dabei der Beleuchtung, der Vegetation und den atmosphärischen Effekten wie Himmel und Wolken gewidmet werden, da der Mensch mit diesen Objekten und Phänomenen eine hohe natürliche Seherfahrung hat.

3.3 Interaktion und Navigation

Interaktivität ist eins der Hauptfaktoren, die zur Virtualität einer künstlichen Umgebung beitragen (MACEACHREN et al., 1999), und ist somit essentiell für immersive Visualisierungssysteme. Bei der Interaktion dürfen die Eingabegeräte den Nutzer nicht von der virtuellen 3D-Umgebung ablenken, da die Immersion sonst reduziert wird. So sollte die Bewegung des Nutzers nicht eingeschränkt werden und die Eingabegeräte dürfen den Nutzerfokus nicht auf sich ziehen, um bedient werden zu können. In unserem Prototypen kommt eine 3D-Maus zum Einsatz, andere Möglichkeiten sind z. B. Flight Stick oder Gestensteuerung durch Handtracking.

Eine zusätzliche Anforderung an immersive Visualisierung ist die intuitive Navigation. Eine vom Nutzer nicht erwartete Reaktion der virtuellen Umgebung auf Eingaben reduziert die Akzeptanz der Anwendung und somit die Immersion. Um eine natürliche Navigation zu unterstützen, wird der Nutzer durch intelligente Interaktionstechniken assistiert (BUCHHOLZ et al., 2005).

Intelligente Interaktionstechniken nutzen Navigationsmetaphern, z. B. Fußgänger- oder Hub-schraubermetapher, um Nutzereingaben indirekt auf Kamerabewegungen abzubilden (Abb. 4). Des Weiteren werden Beschränkungen (*Constraints*) definiert, um Kollisionen und Orientierungslosigkeit des Nutzers zu vermeiden. Bei immersiver Visualisierung kann es durch die Diskrepanz zwischen dem Gleichgewichts- und dem visuellen Sinn zu Simulatorübelkeit kommen. Um dies zu vermeiden werden durch Constraints abrupte Änderungen von Position

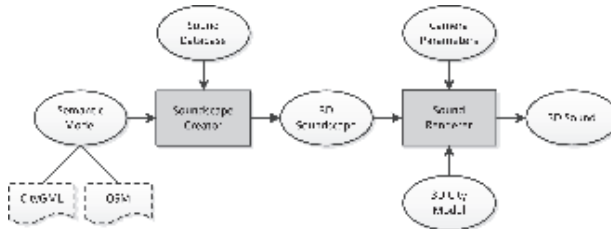


Abb. 5: Erzeugung einer realistischen 3D-Soundlandschaft. Die Geräusche werden anhand von semantischen Informationen aus einem Katalog ausgewählt und im 3D-Stadtmodell verortet. Zur Laufzeit werden die Einzelgeräusche zu einer 3D-Soundlandschaft synthetisiert.

und Orientierung der virtuellen Kamera unterbunden, sowie ihre maximale Geschwindigkeit und Neigung eingeschränkt (KOLASINSKI, 1995).

3.4 Immersive 3D-Soundlandschaft

Eine glaubhafte 3D-Soundlandschaft, die der konkreten natürlichen gezeigten Situation entspricht, erzeugt eine akustische Immersion und trägt so maßgeblich zur Gesamtimmersion bei. PATERSON et al. (2010) zeigt, dass eine semantikbasierte und standortbezogene 3D-Soundlandschaft das emotionale Engagement und somit die Immersion erhöht.

LACEY et al. (2011) erzeugt eine realistische 3D-Soundlandschaft für ein virtuelles 3D-Stadtmodell durch Aufnahme von tatsächlichen lokalen Geräuschen und ihre Verortung im virtuellen 3D-Stadtmodell. Dieser Prozess erfordert ein hohes Maß an manueller Arbeit. Ein generischer Ansatz ist es, einen Katalog von repräsentativen urbanen Geräuschen zu nutzen und diese anhand von semantischen Informationen, z. B. aus einem CityGML Modell (KOLBE, 2009), in der virtuellen 3D-Umgebung zu platzieren (Abb. 5). Zur Laufzeit wird aus den einzelnen Geräuschen eine 3D-Soundlandschaft unter Berücksichtigung von Verdeckungen, virtueller Kameraposition und Bewegung synthetisiert.

4 Anwendungen in der Stadtplanung

Immersive Visualisierung von virtuellen 3D-Stadtmodellen beispielsweise im Elbe Dom bietet zahlreiche Anwendungsmöglichkeiten in der Stadtplanung z. B. bei der Entscheidungsfindung, dem Marketing und der Öffentlichkeitspräsentation von Projekten, Vorgängen oder Konzepten.

Mehrere Entscheidungsträger können das 3D-Stadtmodell zur Entscheidungsunterstützung gemeinsam erleben und erkunden. Die Nutzer können dabei das Modell über die Kamerasteuerung frei begehen und unterschiedliche Alternativen aus allen Blickwinkeln betrachten, z. B. sowohl aus der Fußgänger- als auch aus der Vogelperspektive. Neben dem allgemeinen Erscheinungsbild können beispielsweise Sichtachsen kontrolliert und verglichen werden. Durch die Immersion werden dabei die räumlichen Zusammenhänge besser verstanden. Dadurch können die Auswirkungen des Planvorhabens besser eingeschätzt werden und Entscheidungen können schneller und effektiver getroffen werden.

Bei der Öffentlichkeitspräsentation kann durch die Größe des Elbe Doms eine relativ große Gruppe von Bürgern (ca. 30-40) das virtuelle 3D-Stadtmodell gleichzeitig erleben. Durch die

Visualisierung im 1:1 Maßstab und durch Immersion wird das virtuelle 3D-Stadtmodell insbesondere aus der alltäglichen Perspektive anschaulich kommuniziert. Dadurch können sich die Bürger leichter in Planvorhaben hineinversetzen und es wird ein besseres Verständnis von Entscheidungen und ihren Konsequenzen erreicht, was zu einer höheren Akzeptanz führen kann. Auch im Kontext des Standortmarketings bietet die Größe der Anlage die Möglichkeit die Standorte „in situ“ zu betrachten. Zusätzlich wird durch die Immersion eine hohe Einprägsamkeit und hoher Wiedererkennungswert erreicht.

5 Zusammenfassung

In diesem Beitrag wurde die Anwendung von immersiven 3D-Umgebungen am Beispiel des Elbe Doms, einem 360° Projektionssystem, in der Stadtplanung vorgestellt. Die Anwendungsfelder reichen von der Unterstützung bei Entscheidungsfindungsprozessen, über Öffentlichkeitspräsentation, bis zum Standortmarketing.

Bei der Entwicklung eines Prototyps zur Visualisierung von virtuellen 3D-Stadtmodellen in immersiven 3D-Umgebungen haben wir zahlreiche softwaretechnische Herausforderungen identifiziert. In diesem Paper haben wir diese Herausforderungen diskutiert und Möglichkeiten zu deren Bewältigung aufgezeigt.

Der Hauptfokus des vorgestellten Prototyps ist auf immersiver Visualisierung von virtuellen 3D-Stadtmodellen mit semi-automatischen 3D-Interaktionskonzepten. In Zukunft planen wir die Navigation um die vorgestellten Constraints zu erweitern um Simulatorübelkeit weiter zu reduzieren. Des Weiteren werden wir eine semantische 3D-Soundlandschaft integrieren um das Gefühl der Immersion zu intensivieren.

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 dem Fraunhofer IFF in Magdeburg (www.vdct.de) für die freundliche Unterstützung und den Zugang zum Elbe Dom.

Literaturverzeichnis

- AKENINE-MÖLLER, T., HAINES, E. & HOFFMAN, N., 2008: Real-Time Rendering 3rd Edition, Natick, MA, USA: A. K. Peters, Ltd.
- BELARDINELLI, C., BLÜMEL, E., MÜLLER, G. & SCHENK, M., 2008: Making the virtual more real: research at the Fraunhofer IFF virtual development and training centre, *Cognitive processing*, **9**, S. 217–224.
- BIGOIN, N., PORTE, J., KARTIKO, I. & KAVAKLI, M., 2007: Effects of depth cues on simulator sickness, *ICST IMMERSCOM 2007*, **17**, S. 1-4.
- BUCHHOLZ, H., BOHNET, J. & DÖLLNER, J., 2005: Smart navigation strategies for virtual landscapes, in *Trends in Real-time Visualization and Participation*, S. 124–131.

- CUTTING, J. E. & VISHTON, P. M., 1995: Perceiving layout and knowing distances: The integration, relative potency, and contextual use of different information about depth, in Perception of space and motion. Academic Press, S. 69–117.
- HAMILTON, A., WANG, H., TANYER, A. M., ARAYICI, Y., ZHANG, X. & SONG, Y., 2005: Urban information model for city planning, *ITcon* Vol. 10, S. 55-67.
- HUNT, D.V.L., LOMBARDI, D.R., ROGERS, C.D.F. & JEFFERSON, I., 2008: Application of sustainability indicators in decision-making processes for urban regeneration projects, *Engineering Sustainability*, **161**(1), S. 77-91.
- ISAACS, J., GILMOUR, D., BLACKWOOD, D. & FALCONER, R., 2011: Immersive and non immersive 3d virtual city: decision support tool for urban sustainability, *ITcon*, **16**, S. 115–162.
- KOLASINSKI, E. M., 1995: Simulator Sickness in Virtual Environments: Executive Summary, U.S. Army Research Institute, Tech. Rep.
- KOLBE, T. H., 2009: Representing and Exchanging 3D City Models with CityGML, *3D Geo-Information Sciences*, Springer Berlin Heidelberg, S. 15–31.
- LACEY, J. & HARVEY, L., 2011: Sound Cartography Approaches to Urban Soundcape Research : CitySounds and Sites-of-Respite in the CBD of Melbourne, Mapping Environmental Issues in the City, ser. Lecture Notes in Geoinformation and Cartography, S. 246–265.
- LUTZ, B., 2004: Konzepte für den Einsatz von Virtueller und Erweiterter Realität zur interaktiven Wissensvermittlung, Ph.D. dissertation, Technischen Universität Darmstadt.
- MACÉACHREN, A. M., EDSALL, R., HAUG, D., BAXTER, R., OTTO, G., MASTERS, R., FUHRMANN, S. & QIAN, L., 1999: Virtual environments for geographic visualization: potential and challenges, *NPIVM '99*, S. 35–40.
- MATHER, G., 1996: Image blur as a pictorial depth cue, *Proc Biol Sci*, **263** (1367), S. 169–172.
- MOLNAR, S., COX, M., ELLSWORTH, D. & FUCHS, H., 1994: A Sorting Classification of Parallel Rendering, *IEEE Computer Graphics and Applications*, **14** (4), S. 23–32.
- NAGATA, S., 1993: How to reinforce perception of depth in single two-dimensional pictures, Taylor & Francis, Inc., S. 527–545.
- NI, T., SCHMIDT, G. S., STAADT, O. G., LIVINGSTON, M. A., BALL, R. & MAY, R., 2006: A survey of large high-resolution display technologies, techniques, and applications, *Virtual Reality Conference, IEEE*, S. 223–236.
- PATERSON, N., NALIUKA, K., JENSEN, S. K., CARRIGY, T., HAAHR, M., & CONWAY, F., 2010: Design, implementation and evaluation of audio for a location aware augmented reality game, *Proc. of the 3rd International Conference on Fun and Games*.
- PAUSCH, R., PROFFITT, D. & WILLIAMS, G., 1997: Quantifying immersion in virtual reality, *SIGGRAPH'97*.
- PFAUTZ, J. D., 2000: Depth perception in computer graphics, Ph.D. dissertation, University of Cambridge.
- SCHOOR, W., MASIK, S., MECKE, R., SEIFFERT, U. & SCHENK, M., 2008: VR Based Visualization and Exploration of Barley Grain Models with the Immersive Laser Projection System - Elbe Dom, 10th Virtual Reality International Conference, S. 217–224.
- SCHUCHARDT, P. & BOWMAN, D. A., 2007: The benefits of immersion for spatial understanding of complex underground cave systems, *VRST '07*.
- SOARES, L. P., RAFFIN, B. & JORGE, J. A., 2008: PC Clusters for Virtual Reality, *International Journal of Virtual Reality*, **7** (1), S. 67–80.
- TAN, D. S., GERGLE, D., SCUPELLI, P. G. & PAUSCH, R., 2004: Physically large displays improve path integration in 3D virtual navigation tasks, *CHI 2004*, **6**(1), S. 439-446.

Integratives Entscheidungswerkzeug für die ganzheitliche Planung in Städten auf der Basis von semantischen 3D-Stadtmodellen am Beispiel des Energieatlasses Berlin

ROBERT KADEN, ANDREAS KRÜGER & THOMAS H. KOLBE

In diesem Beitrag wird die Entwicklung eines integrativen Entscheidungswerkzeuges für die strategische Energieplanung in Städten am Beispiel des Energieatlasses Berlin vorgestellt. Der Energieatlas Berlin ist ein ganzheitliches Entscheidungs- und Planungswerkzeug für energetische Fragestellungen auf der Basis des semantischen 3D-Stadtmodells von Berlin, welches konform zum CityGML-Standard modelliert ist. CityGML dient als semantisches Datenmodell und anwendungsunabhängiges Beschreibungs- und Austauschformat und umfasst Objektklassen, Attribute und Beziehungen zur Beschreibung geometrischer, topologischer, semantischer und visueller Eigenschaften, im Sinne einer Ontologie von Städten. Für die Betrachtung von energetischen Fragestellungen wird der Energieatlas durch energierelevante Objekte und Eigenschaften verschiedener Anwendungsfelder erweitert und integriert. Dies beinhaltet z.B. energetische Gebäudeparameter, Sanierungszustände, Energie- und Sanierungspotentiale von Maßnahmen sowie Ver- und Entsorgungsinfrastrukturen, welche auf diese Weise in einen Zusammenhang gebracht werden können, z.B. der Energiebedarf eines Gebäudes mit der Netzinfrastruktur oder die Abhängigkeit von Elektrizität und Wasserversorgung. Es werden energetisch relevante Indikatoren und Daten vorgestellt sowie Konzepte und Anwendungen des Energieatlasses erläutert.

1 Einführung

Aktuelle Umwelt- und Energieplanungen setzen in einem immer stärkeren Maß eine ganzheitliche, interdisziplinäre Betrachtung der bestehenden Situation, der potentiellen Maßnahmen und deren Auswirkungen voraus. Durch die Berücksichtigung der Interdependenzen von Maßnahmen der verschiedenen Disziplinen und der Situation vor Ort wird eine Optimierung in Bezug auf die Gesamtbilanz aller Maßnahmen ermöglicht. Diese Abhängigkeiten sind bislang u.a. aufgrund von wirtschaftlichen Interessen sowie eines fehlenden gemeinsamen Datenrahmens für Planer und Entscheidungsträger in der Wirtschaft, der Verwaltung und der Politik häufig nicht oder nur wenig berücksichtigt worden. Die getrennte Betrachtung der einzelnen Anwendungsfelder führte in einer Vielzahl von Fachdisziplinen zu einer unterschiedlichen Klassifizierung und Strukturierung von Fachwissen und häufig zu individuellen IT-Lösungen, basierend auf einer jeweiligen Fachontologie. Die Ontologie stellt dabei einen Konsens über das Wissen einer Domäne dar und ermöglicht die Kommunikation zwischen Mensch und Maschine, um Fachinformationen für Maschinen interpretierbar und verarbeitbar zu machen. GRUBER [1993] betrachtet die Ontologie im Sinne der Informatik als eine explizite Spezifikation einer Konzeptualisierung. Die Konzeptualisierung wiederum umfasst die abstrakte Darstellung von Phänomenen der realen Welt. Eine Ontologie eignet sich demnach um komplexe Strukturen spezieller Fachdomänen abzubilden und daraus ein Modell des Wissensbereiches abzuleiten. Die einem Modell zugrunde liegende Ontologie beinhaltet die Definition der Begriffe und Beziehungen, mit welchen das Wissensgebiet modelliert wird.

Im Bereich des Geodatenmanagements existieren räumliche Datenmodelle, basierend auf einer Ontologie der Topographie der realen Welt, wie z.B. das etablierte Datenmodell von CityGML. CityGML versteht sich als ein semantisches Datenmodell zur applikationsübergreifenden Repräsentation und zum Austausch von 3D-Stadtmodellen. CityGML ist ein XML-basiertes Speicherformat und ist als Anwendungsschema der *Geography Markup Language 3 (GML3)* implementiert. CityGML umfasst eine gemeinsame Definition von grundlegenden Objektklassen, Attributen und Relationen im Sinne einer Ontologie von 3D-Stadtmodellen in Bezug auf geometrische, topologische, semantische und visuelle Eigenschaften [OPEN GEOSPATIAL CONSORTIUM, 2008; KOLBE, 2008].

In der Vergangenheit wurde u.a. im Bereich der Planung, dem Management und Monitoring von Energie und Umwelt sowie Verkehr, Architektur und Bau eine Vielzahl von fachbezogenen Ontologien entwickelt. LUTZ et al. [2002] präsentieren eine Ontologie zur Spezifikation von Informationssystemen für Verkehrsplaner. Diese soll dem Anwender ermöglichen, heterogene Datenbestände zu integrieren und zu visualisieren, Analysen durchzuführen und durch die Integration mit Verkehrs- und Umweltmodellen neues Wissen zu erzeugen. Dies dient beispielsweise der Bewertung von Eingriffen im Straßenbau und deren einheitliche Kompensation durch Ausgleich. Für die Spezifikation wird eine Ontologie bezüglich der Maßnahmen des Naturschutzes und der Landschaftspflege entwickelt. MÉTRAL et al. [2010] beschreiben die Eignung von Ontologien zur Formalisierung von verschiedenen anwendungsbezogenen Informationen am Beispiel von Planungen im Bereich *Soft Mobility*. Es wird beispielhaft gezeigt, dass für eine Vielzahl von Anwendungen innerhalb der Prozesskette von Planungen in Städten sowie der Entscheidungsebenen virtuelle 3D-Stadtmodelle hilfreich sind, jedoch das zugrunde liegende CityGML-Datenmodell nicht ausreichend detailliert ist. Es wird ein Ausschnitt einer Ontologie zur Beschreibung von Routen für Fußgänger und Radfahrer einschließlich Eigenschaften wie z.B. Fußgängerzone, Promenade, Fahrradspur, Geschwindigkeit und Einbahnstraße gezeigt. FUCHS [2008] präsentiert eine ontologiebasierte Formalisierung der Semantik von Kontextinformationen und Zuständen in Infrastrukturnetzen wie z.B. Eisenbahnnetzen und Energienetzen.

Ziel des Energieatlasses Berlin ist es, einen gemeinsamen Rahmen für die Integration von umwelt- und energieplanerischen Aspekten der unterschiedlichen Ontologien zu schaffen. Dies beinhaltet die räumlich-semantische Repräsentation der relevanten Geoinformationen wie z.B. der Modellierung der Stadt und ihrer Bestandteile einschließlich umwelt- und energierelevanter Parameter sowie der Energiequellen, Verbraucher und Ver- und Entsorgungnetzen in verschiedenen, diskrete Skalenebenen, z.B. Gebäude, Quartier, Bezirk, Stadt. Die Integration aller Informationen und deren Visualisierung bilden einen komplexen Atlas der Energieversorgung und der Zusammenhänge aller Komponenten

2 Klima- und Umweltschutz vs. Energiewende

Die Klima- und Umweltschutzpolitik ist ein maßgeblicher Motor für die umfangreichen Veränderungen bei der Energieversorgung und ist aufgrund des besonders großen Anteils der weltweit

verursachten Treibhausgase vor allem ein Thema der Städte. Ein bedeutendes klimapolitisches Ziel in Berlin ist u.a. die Senkung der CO₂-Emissionen um 40 Prozent bis zum Jahr 2020 was vor allem durch die Einbringung erneuerbarer Energien und durch die Steigerung der Energieeffizienz erreicht werden soll. Im Fokus der Berliner Klimaschutzpolitik stehen die Gebäude, wobei der Energiebedarf von Gebäuden zu über 80 Prozent aus dem Wärmebedarf resultiert und sich auf zwei Drittel bis drei Viertel des gesamten städtischen Energiebedarfs summiert. Ein Schwerpunkt des Berliner Umweltentlastungsprogramms (UEP) ist dabei die energetische Gebäudesanierung [SenGUV, 2011]. Eine weittragende Maßnahme zum Umweltschutz ist der vereinbarte Ausstieg aus der Kernenergie, aber auch die Verpflichtung zur Reduktion der Feinstaubemissionen und der Lärmbelastung in Städten [BImSchG, 2011].

Die klima- und umweltschutzpolitischen Bemühungen führen zu maßgeblichen Veränderungen auf der Seite der Energieversorger, welche aktuell vor neuen Herausforderungen in Bezug auf die Planung und den Umbau von Anlagen und Infrastrukturen stehen. Die so genannte „Energiewende“ auf der Versorgerseite, aber auch der demographische (und industrielle) Wandel auf der Verbraucherseite erfordern umfassende Veränderungen der Energieversorgung, beispielsweise durch die verstärkte Einbringung erneuerbarer Energien, die Abschaltung von Kernenergieanlagen, die Versorgung durch so genannte „Brückentechnologien“ und die Dezentralisierung der Energieversorgung, was darüber hinaus Auswirkungen auf die bestehenden Netzinfrastrukturen der Betreiber hat. Die Steigerung der Energieeffizienz von Gebäuden und Anlagen durch die energetische Gebäudesanierung, ein bewussteres Verbraucherverhalten und der demografische Wandel in Deutschland führen darüber hinaus zu veränderten Energiebedarfen. Die breite Einführung von e-Mobilitätslösungen bringt zudem neue Anforderungen durch den benötigten Aufbau eines Netzes von Stromtankstellen mit sich.

Die Veränderungen aufgrund der Umsetzung der Klima- und Umweltschutzziele sowie der Energiewende setzen umfangreiche Planungen voraus, beispielsweise in Bezug auf großräumige energetische Gebäudesanierungen, die Standortwahl von neuen energieerzeugenden Anlagen wie z.B. Photovoltaik, Geothermie und Blockheizkraftwerke, den erforderlichen Netzausbau oder mögliche Stilllegungen bestehender Anlagen und Infrastrukturen. Nicht selten widersprechen sich jedoch die möglichen Maßnahmen der Energiewende und die klima- und umweltschutzpolitischen Ziele, z.B. führen die Einbringung von Brückentechnologien wie Kohlekraftwerke aber auch Blockheizkraftwerke auf der Basis von Gasturbinen zu einem Anstieg der CO₂- und Feinstaubemissionen und die Verbreitung von e-Mobilität führt zu einem Anstieg des Strombedarfes in Städten und Innenstädten. Durch die Einbringung erneuerbarer Energien, z.B. Photovoltaikanlagen auf den Gebäudedächern kann dem steigenden Strombedarf in Innenstädten, und somit der steigenden CO₂-Belastung, entgegen gewirkt werden. Diese Beispiele machen deutlich, dass die Planungen aufgrund des Klima- und Umweltschutzes sowie der Energiewende ganzheitlich erfolgen müssen, um ein Optimum aller Maßnahmen in Bezug auf die Gesamtbilanz von Energieproduktion und Schadstoffreduktion zu ermöglichen. Darüber hinaus müssen weitere Aspekte wie z.B. Sicherheit der Energieversorgung, stadtplanerische Vorgaben, Bauvorschriften, Akzeptanz durch die Bürger, Prognosen über die Stadtentwicklung sowie das Verhältnis zwischen Kosten und Nutzen (Potentiale) in die Betrachtung und Planung einfließen.

3 Informationsfusion im Energieatlas Berlin

Die in den letzten Dekaden stark fortgeschrittene Digitalisierung von energie- und umweltrelevanten Daten und die Vernetzung von Systemen erlauben es immer mehr, Informationen der verschiedenen Anwendungsfelder auszutauschen und zusammenzuführen sowie die ganzheitliche Betrachtung der Umwelt- und Energieplanungen zu ermöglichen. Dabei besteht jedoch häufig die Schwierigkeit, die unterschiedlichen Datenmodelle der verschiedenen Energieversorger, Netzbetreiber, Stadt- und Umwelplaner, aufgrund der unterschiedlichen Klassifizierung und Aggregation von Entitäten, miteinander zu verknüpfen. Die Untersuchungen im Rahmen des Energieatlases Berlin haben jedoch gezeigt, dass die fachbezogenen Ontologien aufgrund der geographischen Beziehungen der einzelnen Entitäten häufig eine hohe Kohärenz mit der räumlichen Aggregation von Geodaten aufweisen. Kern des Energieatlases Berlin ist es daher, planungsrelevante fachbezogenen Ontologien in dem räumlich-semantischen Datenmodell von CityGML zusammen zu führen. Im Unterschied zu dem Ansatz von MÉTRAL et al. [2010], in dem die Interoperabilität zwischen Modellen durch die Verknüpfung einer themenbasierten Ontologie mit einem CityGML basierten Stadtmodell erfolgte, werden in diesem Ansatz Konzepte des Ontologie-Mappings genutzt.

Zahlreiche Arbeiten beschreiben Methoden des Ontologie-Mappings¹, wobei drei Kategorien unterschieden werden; 1) die Abbildung einzelner Domänen-Ontologien auf eine integrative gemeinsame Ontologie, 2) die Abbildung einer Domänen-Ontologie auf eine andere Domänen-Ontologie und 3) die Verschmelzung von zwei Domänen-Ontologien [CHOI et al., 2006]. Der Energieatlas Berlin nutzt dabei zwei dieser Konzepte; die Abbildung der einzelnen fachbezogenen Ontologien auf eine integrative gemeinsame Ontologie und die Verschmelzung von zwei Ontologien. Der Energieatlas Berlin stellt die integrative gemeinsame Ontologie zur Verfügung, welche auf dem Datenmodell von CityGML basiert. Entitäten einer fachbezogenen Ontologie welche mit einer räumlichen Aggregation in CityGML kohärent sind, werden durch die entsprechenden CityGML-Klassen im Energieatlas abgebildet. Entitäten welche nicht durch entsprechende CityGML-Klassen repräsentiert werden, werden durch einen Erweiterungsmechanismus mit dem CityGML-Datenmodell verschmolzen. Das Konzept der *Application Domain Extension* (ADE) sowie die generischen Objekte und Attribute in CityGML ermöglicht es, beliebige Entitäten mit einem räumlichen Bezug in den Energieatlas zu integrieren.

Abbildung 1 zeigt beispielhaft die Informationsfusion im Energieatlas. In der Mitte der Abbildung ist eine schematische Darstellung eines Auszuges aus dem CityGML Datenmodell dargestellt sowie links mögliche Entitäten bei der Solarpotentialanalyse und rechts eine vereinfachte Aggregation von Entitäten der Versorgungsinfrastruktur. Durch die hohe Kohärenz der Modellstruktur der Fachdomänen mit der räumlichen Aggregation im semantischen Stadtmodell lassen sich die Entitäten im Energieatlas direkt einander zuordnen. Das Beispiel zeigt, dass durch die Integration eine Verbindung der beiden Fachdomänen entstanden ist, wobei die ermittelten

¹ Zusammenfassung zu Ontologie-Mapping in Choi et al. [2006]

Solarpotentiale in Zusammenhang mit der Energiebilanz eines bestimmten Versorgungsgebietes gebracht wurden.

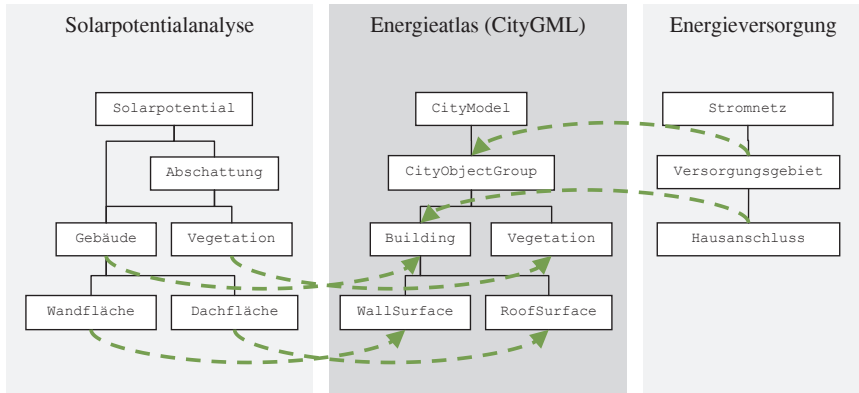


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Integration sich entsprechender Entitäten verschiedener fachbezogener Ontologien in den Energieatlas Berlin

Als Basis des Energieatlas Berlin dient das virtuelle 3D-Stadtmodell von Berlin², welches CityGML-konform modelliert ist. Es enthält ein Digitales Geländemodell (DGM) einschließlich einer Texturierung durch Luftbilder sowie mehr als 550.000 volltexturierte Gebäude, welche flächendeckend in der Detaillierungsstufe *Level of Detail* (LOD) 2 vorliegen. Darüber hinaus existieren circa 100 Gebäude, vornehmlich Sehenswürdigkeiten, in der Detaillierungsstufe LOD 3 sowie vier Gebäude in LOD 4. Neben den Informationen, welche bereits im virtuellen 3D-Stadtmodell vorhandenen sind, werden weitere umwelt- und energierelevante Parameter benötigt. Informationen, welche nicht durch das CityGML-Datenmodell abgebildet sind, werden innerhalb einer Fachschale „Energie“ (ADE) dem Modell hinzugefügt. Diese Fachschale umfasst die Modellierung und Speicherung von energetischen Gebäudeparametern, Versorgungsstrukturen, Verkehrs- und Energieflüssen sowie Potentiale von Maßnahmen und Handlungsoptionen. Um eine ganzheitliche strategische Energieplanung zu ermöglichen, ist es erforderlich, allen Ebenen der Entscheidungsfindung innerhalb einer Stadt zu entsprechen. Diese umfassen die sogenannte „Ingenieursebene“ über die „Entwurfs- und Planungsebene“ bis hin zur „politischen Entscheidungsebene“, wobei sich die Anforderungen an das Planungswerkzeug stark unterscheiden. Während bei der Ingenieursebene der Fokus auf der Effizienz und Bilanzierung von Komponenten und Maßnahmen für einzelne Gebäude oder Quartiere liegt, benötigen die übergeordneten Entscheidungsebenen eine generellere Sicht auf den Planungsbereich.(a)

(b)

² Informationen zum Berliner Stadtmodell: www.3d-stadtmodell-berlin.de (letzter Zugriff: 19.01.2012)

Abbildung 2 zeigt die verschiedenen Entscheidungs- und Aggregationsebenen, von einzelnen Gebäuden über Quartiere/Blöcke und Stadtteile bis hin zur Stadtebene.

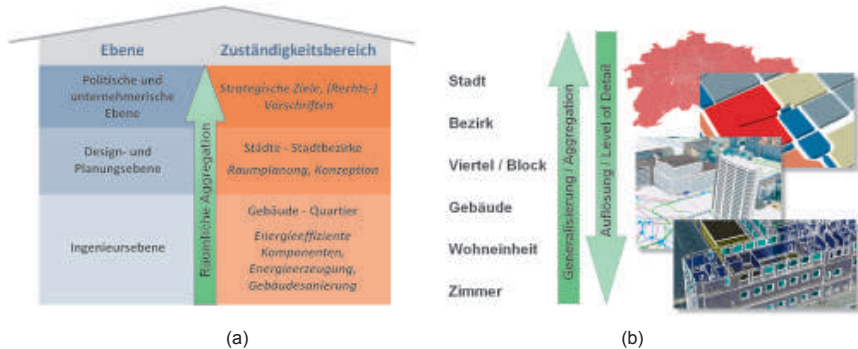


Abbildung 2: a) Darstellung der Entscheidungsebenen in Verbindung mit den Zuständigkeitsbereichen und b) die Skalenebenen des Energieatlasses

Die Integration aller umwelt- und energieplanerisch relevanten Informationen in einem Modell generiert neues Wissen und ermöglicht eine integrative, fachübergreifende Betrachtung der Situation. Das semantische Datenmodell ermöglicht analytische und simulierende Anwendungen, z.B. im Bereich des Katastrophenmanagements, der Stadt- und Landschaftsplanung und – im Beispiel des Energieatlasses Berlin – der strategischen Umwelt- und Energieplanung, welche dadurch disziplinübergreifend und unter Einbeziehung unterschiedlicher, thematisch relevanter Objekte und Parameter des Betrachtungsraumes durchgeführt werden können.

4 Potentiale und Entwicklung des Energieatlasses Berlin

Ziel des Energieatlasses Berlin ist die Schaffung eines strategischen Entscheidungswerkzeuges, welches eine transparente Planung zwischen verschiedenen Nutzergruppen aus der Industrie, z.B. Energieversorgungs- und Energietechnologieunternehmen, aus der Verwaltung und Politik sowie für Endverbraucher und Bürger ermöglicht. Dies beinhaltet zum einen die Repräsentation des Ist-Zustandes der umwelt- und energierelevanten Aspekte im Sinne einer Inventur und zum anderen die Darstellung von Handlungsoptionen einschließlich ihrer ökonomischen Aspekte wie die Gegenüberstellung von Potentialen versus Kosten von Maßnahmen. Durch das angereicherte 3D-Stadtmodell von Berlin wird der Energieatlas die Datengrundlage für ganzheitliche umwelt- und energiebezogene Untersuchungen und Planungen in der Stadt Berlin besitzen, z.B. für die Auswahl von Stadtgebieten für Investitionen in die energetische Gebäudesanierung, für den Umbau von Versorgungsinfrastrukturen und für die Einbringung von regenerativer Energieversorgung. Diese Untersuchungen und Planungen basieren auf Analysen und Simulationen sowie der kartographischen Visualisierung von Energieverbräuchen und -produktion, Energiebedarfen, Ertrags- bzw. Einsparpotentialen, energetischen Gebäudeklassen und -zuständen, Energie- und Verkehrsströmen, Versorgungsinfrastrukturen und anteiligen CO₂-Emissionen.

Im Rahmen des Energieatlases Berlin werden am Institut für Geodäsie und Geoinformationstechnik derzeit zwei Projekte durch das *European Institute of Innovation and Technology* (EIT), angesiedelt im *Knowledge and Innovation Center for Climate Change and Mitigation* (Climate-KIC), gefördert; die Projekte „*Energy Atlas*“ und „*Neighbourhood Demonstrator*“, welche in Kooperation mit weiteren Instituten der Technischen Universität Berlin, dem Geoforschungszentrum Potsdam, den Energieversorgern Vattenfall und GASAG, der Senatsverwaltung für Wirtschaft, Technologie und Forschung sowie dem *Imperial College* und dem *Institute for Sustainability London* durchgeführt werden. Innerhalb dieser Projekte stehen zunächst die Datenintegration sowie die Entwicklung und Implementierung von Analyse- und Visualisierungswerkzeugen in Bezug auf die Themenbereiche Energie- und Verkehrsflüsse, Abschätzung von Energiebedarfen und energetische Gebäudeeigenschaften sowie die Entwicklung innovativer Geschäftsmodelle im Vordergrund. Die kartographische Aufbereitung der Analyseergebnisse erfolgt in Verbindung mit dem 3D-Stadtmodell Berlin und ermöglicht somit die visuelle Inspektion in Beziehung zur Stadtstruktur. Durch die Verwendung des standardisierten Datenmodells von CityGML ist es möglich, die entwickelten Konzepte und Systeme auf andere Städte zu übertragen, welche über ein CityGML-basiertes 3D-Stadtmodell verfügen.

4.1 Anwendungsfeld Schätzung des Heizenergiebedarfes von Gebäuden

Für Planungen innerhalb von Energieversorgungsunternehmen sind Energieverbrauchswerte der Gebäude, sowie deren Aggregation auf Versorgungsgebiete von großer strategischer Bedeutung, da die Netzinfrastrukturen auf aktuelle und zukünftige Verbräuche ausgelegt sein müssen. Tatsächliche Verbrauchsdaten sind innerhalb der einzelnen Energieversorger verfügbar, unterliegen jedoch strengen Datenschutzrichtlinien. Demnach kann bei einer marktwirtschaftlich getriebenen Versorgerstruktur nicht auf einen umfassenden Datenbestand für die gesamte Stadt oder größere Stadtgebiete zurückgegriffen werden. Daher ist es notwendig, dass Schätzmechanismen für die Ermittlung von Energiebedarfen angewendet werden. STRZALKA et al. [2010; 2011] beschreiben eine Methode zur Abschätzung des Heizenergiebedarfes auf Stadtebene unter Verwendung von Gebäudegrundflächen und LIDAR-Daten, weiteren Gebäude- und Wetterdaten sowie unter Verwendung eines Geoinformationssystems (GIS). Durch dieses Verfahren wird aus den Gebäudegrundflächen und den Höheninformationen ein 3D-Stadtmodell einschließlich der automatisch extrahierten beheizten Volumina abgeleitet. Durch die Einbeziehung der Wärmedurchgangswerte (U-Werte) der Gebäude sowie der Wetterdaten wird in diesem Beitrag der Heizenergiebedarf für das Testgebiet *Scharnhäuser Park* in Stuttgart abgeschätzt. Ein Verfahren zur Ableitung einer digitalen Wärmebedarfskarte wird durch NEIDHART [2007] und NEIDHART et al. [2006] beschrieben. Durch ein Gebäuderekonstruktionsverfahren werden aus LIDAR-Daten Gebäudevolumina ermittelt und unter Verwendung einer Gebäudetypologie und der Siedlungsstruktur der Wärmeenergiebedarf für Gebäude sowie für ganze Siedlungen abgeleitet und in einer Wärmebedarfskarte dargestellt.

Eine wachsende Zahl von Städten verfügt über flächendeckende CityGML-konforme 3D-Stadtmodelle sowie über 2D-Geobasisdaten. Diese vorhandenen Daten können für die Abschätzung von Energiebedarfen auf der Skalenebene einer Stadt oder Region genutzt werden.

Ausgehend von der Hypothese, dass starke Korrelationen zwischen der Gebäudecharakteristik und den anfallenden Heizenergieverbräuchen bestehen, wurde durch CARRIÓN [2010] und CARRIÓN et al. [2010] ein Verfahren zur Abschätzung des Heizenergiebedarfes in Gebäuden unter Verwendung des 3D-Stadtmodells von Berlin entwickelt. Demnach hängt der Heizenergieverbrauch von den geometrischen Eigenschaften eines Gebäudes (beheiztes Volumen, Nutzfläche), dem Sanierungszustand, dem Gebäudetyp und -alter sowie der Gebäudenutzung ab. Abbildung 3 zeigt die Korrelationsbeziehung zwischen den Gebäudeinformationen, welche aus der Semantik und Geometrie des Gebäudemodells abgeleitet werden, und den Katasterinformationen sowie weiteren statistischen Daten und Verbrauchsinformationen.

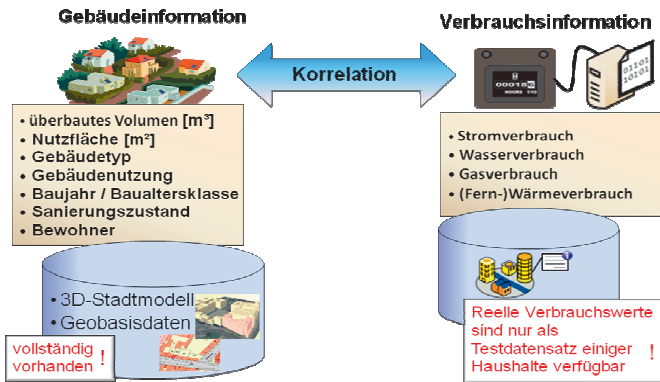


Abbildung 3: Abschätzung des Heizenergiebedarfes in Gebäuden unter Berücksichtigung der Korrelation zwischen Gebäudecharakteristik und Verbrauchswerten

In CARRIÓN [2010] und CARRIÓN et al. [2010] wird der Heizenergieverbrauch unter Verwendung der Etagenzahl, der Gebäudehöhe, dem beheizten Volumen, dem Baujahr, der Anzahl der Wohneinheiten und der Gebäudenutzung berechnet. Diese Daten können aus der Gebäudegeometrie des Berliner 3D-Stadtmodells (Volumen, Gebäudehöhe) ermittelt werden oder sind bereits als semantische Attribute (Etagenzahl, Gebäudenutzung, Baujahr) im Stadtmodell enthalten. Die Gebäudenutzfläche ermittelt sich entsprechend der Energieeinsparverordnung (EnEV) von 2009 über das beheizte Volumen und der durchschnittlichen Etagenhöhe, wobei die durchschnittliche Etagenhöhe aus der Division der Gebäudehöhe und der Etagenzahl ermittelt wird:

$$A_N = \left(\frac{1}{h_G} - 0.04m^{-1} \right) \cdot V_e$$

$$A_N \text{ Nutzfläche [m}^2\text{]}$$

$$h_G \text{ durchschnittliche Etagenhöhe [m]}$$

$$V_e \text{ beheiztes Volumen [m}^3\text{]}$$

$$h_G = \frac{h_B}{n}$$

$$h_B \text{ Gebäudehöhe}$$

$$n \text{ Etagenzahl}$$

Aus der Gebäudenutzung, der Etagenzahl, der Anzahl der Wohneinheiten und der Anzahl der Nachbargebäude lässt sich ein Gebäudetyp ableiten, z.B. freistehendes Einfamilienhaus, Reihen-

oder Doppelhaus, großes Mehrfamilienhaus oder mehrstöckiges Gebäude. Über eine zur Gebäudestruktur einer Stadt passenden Gebäudetypologie (Verzeichnis mit einem Verbrauchswertfaktor in kWh/m²a zugeordnet zu Gebäudetyp und Baujahr) kann der Heizenergiebedarf durch Multiplikation der Nutzfläche mit dem Verbrauchswertfaktor abgeschätzt werden:

$$E_H = A_N \cdot f_V$$

A_N Nutzfläche [m²]
 f_V Verbrauchwert - Faktor
 E_H Heizenergieverbrauch [kWh/a]

Abbildung 4 zeigt die Visualisierung der Bedarfswerte, welche auf der Basis des 3D-Stadtmodells und durch Einfärbung der Gebäudehüllen entsprechend einer festgelegten Klassifizierung erfolgt.



Abbildung 4: Visualisierung der geschätzten Heizenergiebedarfe im Testgebiet Berlin Charlottenburg-Wilmersdorf in Verbindung mit dem 3D-Stadtmodell [CARRIÓN, 2010]

Durch das Verfahren konnten für ein Testgebiet in Berlin die Heizenergiebedarfe mit einer durchschnittlichen Abweichung von 19% ermittelt werden. Ein Schwerpunkt der Entwicklungsarbeiten in den Projekten Energieatlas Berlin und Neighbourhood Demonstrator ist die Optimierung und Weiterentwicklung dieses Ansatzes.

4.2 Anwendungsfeld Solarthermische Heizenergieversorgung

Die Zuführung von Wärmeenergie aus konventioneller (fossiler) zentraler Energieerzeugung zu einzelnen Gebäuden und Gebäudegruppen lässt sich durch die dezentrale Energieversorgung mittels Solarthermie auf Dach- oder Fassadenflächen der jeweiligen Gebäude deutlich reduzieren. In Berlin wurde in den Jahren 2009 und 2010 eine Solarpotentialanalyse hinsichtlich der Eignung von Dachflächen für Solarthermie und Photovoltaik auf der Basis des virtuellen 3D-

Stadtmodells und durch LIDAR-Daten durchgeführt³. Die Ergebnisse werden potentiellen Nutzern online und kostenfrei zur Verfügung gestellt⁴. Bezüglich der Solarthermie wurden dabei folgende Werte ermittelt [simuPLAN, 2011]:

- Flachdach < 8° Neigung (ja/nein)
- dachflächenbezogene potentielle (ohne Verschattung) und mittlere Strahlungsmengen (inkl. Verschattung) in kWh/m²
- dachflächenbezogene prozentuale Einstrahlungsenergie bezogen auf die maximal mögliche jährliche Einstrahlung (1132 kWh/m²)
- dachflächenbezogene Dachneigung in Grad
- dachflächenbezogene Ausrichtung der Fläche in Grad (360° entspricht der nördlichen Ausrichtung)
- dachflächenbezogene installierbare Modulfläche in m²
- gebäudebezogener potentieller Wärmeertrag in MWh/a bei einem angenommenen Wirkungsgrad von 35%
- gebäudebezogene Eignungsklasse für Solarthermie (geeignet/nicht geeignet)

Die Ergebnisse der Solarpotentialanalyse sind gebäude- sowie dachflächenbezogen im virtuellen 3D-Stadtmodell des Energieatlasses als generische Gebäudeattribute integriert.

Für die Neuplanung von Gebäuden sowie ganzer Nachbarschaften kann diese Ertragsberechnung durch die Nutzung des 3D-Stadtmodells entsprechend durchgeführt werden. LUDWIG et al. [2009] beschreiben ein Verfahren zur Solarpotentialanalyse durch die Geoprozessierung von LIDAR-Daten. In diesem Ansatz werden aus Punktwolken Dachflächen einschließlich ihrer geometrischen Eigenschaften abgeleitet und die jeweilige Einstrahlungsenergie ermittelt. Des Weiteren werden lokale Faktoren wie die Geometrie der Dachfläche, die Dachneigung, die Ausrichtung der Dachflächen, die globale Sonneneinstrahlung sowie der Einfallswinkel der Sonne beschrieben, welche für die Solarpotentialanalyse genutzt werden. Analog zur Ableitung der geometrischen Faktoren aus LIDAR-Daten können die Größe, Neigung und Ausrichtung von Dachflächen aus den Gebäudegeometrien eines 3D-Stadtmodells abgeleitet werden. Die globale Sonneneinstrahlung sowie der Einfallswinkel der Sonne fließen in ein Berechnungsmodell zur Bestimmung der Einstrahlungsmenge ein. Ein weiterer lokaler Faktor nach LUDWIG et al. [2009] ist eine schattenfreie Lage der Dachflächen. Anhand eines 3D-Stadtmodells kann die Verschattung über eine Sichtbarkeitsanalyse zum jeweiligen Sonnenstand unter Berücksichtigung der Flächegeometrie sowie der Morphologie der Nachbarschaften durchgeführt werden.

Die Ergebnisse der solarthermischen Potentialanalyse werden in den Datenbestand des Energieatlas zurückgeführt. Dies ermöglicht die strategische Heizenergieplanung auf Gebäudeebene

³ Informationen zum Solaratlas Berlin: <http://www.businesslocationcenter.de/de/3d-stadtmodell/das-projekt/projektbeispiele/solaratlas> (letzter Zugriff: 19.01.2012)

⁴ Onlineportal zum Solaratlas Berlin: <http://www.wirtschaftsatlas.berlin.de/mapguide/Apps/Solar/Public/index.jsp> (letzter Zugriff: 19.01.2012)

wobei die Wärmebedarfsabschätzung aus Kapitel 4.1 und der Heizenergieertrag aus der Solarthermie zusammengeführt und subtrahiert werden können. Es ist dadurch möglich, den Bedarf an zuzuführender Energie, welcher durch andere Energieträger gedeckt werden muss, sowie das Einsparpotential zu ermitteln.

4.3 Ableitung von Indikatoren, Indexen und Metriken aus den Anwendungsfeldern

Eine ganzheitliche strategische Umwelt- und Energieplanung innerhalb des städtischen Raumes erfordert die Betrachtung der Stadt als ein komplexes Energiesystem. Analysen innerhalb von Energiesystemen arbeiten in der Regel über die Verknüpfung einzelner Parameter zu komplexen Zusammenhängen. Diese Parameter müssen aus dem angereicherten 3D-Stadtmodell (aus der Semantik, der topologischen Relationen und der Geometrie) abgeleitet werden. Hierfür wird der Ansatz von CARNEIRO [2011] genutzt, welcher Indikatoren und Indexe zur Prozessierung von LIDAR-Punktwolken verwendet. Für die Verwendung des Ansatzes im Energieatlas Berlin wird dieses Konzept auf semantisch angereicherte 3D-Stadtmodelle übertragen.

Indikatoren enthalten eine Reihe von Regeln für das Aufbereiten, Zusammenstellen und Organisieren von Daten, zur Bereitstellung von quantitativen oder qualitativen Resultaten über spezifizierte Anfragen [CARNEIRO, 2011]. Elementare Indikatoren können direkt aus den analysierten Werten über eine atomare Operation abgeleitet werden. Komplexe Indikatoren sind zusammengesetzt aus einer Menge von elementaren oder weiteren komplexen Indikatoren und bilden somit komplexere Analyseoperationen ab. Indexe unterliegen einem hohen Grad der Abstraktion mit minimalem Verlust an Information. Hierzu zählen die Verhältnisse und Einteilungen in Typklassen. Indexe setzen sich aus Indikatoren und/oder weiteren Indexen zusammen [CARNEIRO, 2011]. Zur computergestützten Verarbeitung sollen Indikatoren und Indexe einer Metrik unterliegen (numerische Werte) oder über eine Referenz auf entsprechende Werte verweisen (Tabellen, Listen).

Entsprechend der Repräsentation von Geometrie, Topologie, Semantik und äußerer Erscheinung durch virtuelle 3D-Stadtmodelle, lassen sich Indikatoren/Indexe nach ihrer zugrundeliegenden Metrik klassifizieren, welche sich auf Geometrie, Topologie, Morphologie und räumlich zugeordneter Semantik beziehen kann. Dabei ist zu erwähnen, dass die Topologie an sich keinen Metriken unterliegt. Mit einer Metrik bezogen auf die Topologie werden nicht die Topologierelationen an sich verstanden, sondern eine quantitative Angabe zum Vorkommen einer solchen Relation, bezogen auf ein Stadtojekt oder eine Menge von Stadtojekten. Für die beiden vorgestellten Anwendungsfelder in Abschnitt 4.1 und 4.2 lassen sich folgende Indikatoren und Indexe identifizieren und nach dem zugrundeliegenden Typ der Metrik klassifizieren. Tabelle 1 stellt die Klassifizierung dar. Diese Indikatoren und Indexe fließen in die Entwicklung der thematischen Erweiterung des Energieatlasses in Form der CityGML Energy ADE ein.

Typ der Metrik	Elementare Indikatoren		Komplexe Indikatoren		Indexe	
	A	B	A	B	A	B
Metrik bezogen auf die Geometrie	Nutzfläche, beheiztes Volumen, Gebäudehöhe	Dachneigung, Dachfläche, Ausrichtung der Dachfläche		installierbare Modulfläche		
Metrik bezogen auf die Topologie	Anzahl der Nachbargebäude					
Metrik bezogen auf die Morphologie (Morphometrik)						Verschattung (Schatten / Bestrahlung Verhältnis)
Räumlich- semantische Metrik	Baujahr, Anzahl der Wohneinheiten, Gebäudenutzung	maximal mögliche jährliche Einstrahlung, Modulfläche pro Modul, Wirkungsgrad	Etagenzahl, Etagenhöhe, Gebäudenutzfläche		Gebäudetyp, Heizenergieverbrauch	Strahlungsmenge, Wärmeertrag

Tabelle 1: Indikatoren der Anwendungsfelder Schätzung des Heizenergieverbrauchs (A) und Solarthermische Heizenergieversorgung (B) klassifiziert nach der zugrundeliegenden Metrik

5 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurden Konzepte und erste Implementierungen eines integratives Entscheidungs Werkzeug zur transparenten strategischen Energieplanung für verschiedene Nutzergruppen aus der Wirtschaft, Verwaltung, Politik und Endverbrauchern vorgestellt. Untersuchungen im Rahmen des Energieatlasses Berlin haben gezeigt, dass die strategische Umwelt- und Energieplanung innerhalb von Städten unterschiedliche Fachdisziplinen einbezieht, welche fachübergreifend als komplexes System zusammenwirken. Als Basis für den Energieatlas Berlin dient das Berliner virtuelle 3D-Stadtmodell, welches CityGML-konform modelliert ist und einen gemeinsamen integrativen Betrachtungsrahmen für umwelt- und energiebezogene Untersuchungen und Planungen zur Verfügung stellt. Fachthematische Informationen und Entitäten, welche nicht durch das CityGML-Datenmodell abgebildet werden, werden innerhalb einer Fachschale „Energie“ (ADE) dem Modell hinzugefügt. Themenspezifische Schlüsselindikatoren und Indexe stellen einen domänenspezifischen Regelsatz zum Aufbereiten, Zusammenstellen und Organisieren von Daten bereit, zugeordnet zu räumlich aggregierten Entitäten. Diese Entitäten innerhalb des Stadtmodells bilden Verknüpfungspunkte zwischen den Ontologien und stellen über die integrierten Indikatoren und Indexe einen umfassenden Regelsatz für fachübergreifende Analysen bereit. Im Bereich des Energieatlas Berlin lassen sich einige zukünftige Forschungsschwerpunkte identifizieren. Zukünftige Arbeiten umfassen die Identifizierung der relevanten Schlüsselindikatoren sowie deren räumliche Aggregation und die Erweiterung des CityGML Datenmodells um eine Energie-ADE für den Energieatlas. Darüber hinaus sollen weitere Use-Cases konzipiert und entwickelt, sowie Visualisierungskonzepte umgesetzt werden.

6 Literaturverzeichnis

- BIMSCHG, 2011: Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge. Bundesrepublik Deutschland
- CARNEIRO, C., 2011: Extraction of Urban Environmental Quality Indicators using LiDAR-Based Digital Surface Models. Doktorarbeit, École polytechnique fédérale de Lausanne, Schweiz
- CARRIÓN, D., 2010: Estimation of the energetic rehabilitation state of buildings for the city of Berlin using a 3D city model represented in CityGML. Masterarbeit, Technische Universität Berlin, Deutschland.
- CARRIÓN, D., LORENZ, A. & KOLBE, T. H., 2010: Estimation of the energetic rehabilitation state of buildings for the city of Berlin using a 3D City Model represented in CityGML. In: Proceedings of the 5th International Conference on 3D Geo-Information 2010 in Berlin. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, S. 31-36
- CHOI, N., SONG, I.-Y. & HAN, H., 2006: A Survey on Ontology Mapping. SIGMOD Record, Vol. 35, Nr. 3
- FUCHS, F., 2008: Semantische Modellierung und Reasoning für Kontextinformationen in Infrastrukturnetzen, Dissertation, Fakultät für Mathematik, Informatik und Statistik, Ludwig-Maximilians-Universität München, Cuvillier Verlag, Göttingen
- GRUBER, T. R., 1993: Toward principles for the design of ontologies used for knowledge sharing. Originally in: Guarino, N., Poli, R. (Hrsg.), International Workshop on Formal Ontology, Padova, Italy. Revised August 1993: International Journal of Human-Computer Studies, Vol. 43, Nr. 5-6, S. 907-928
- KOLBE, T. H., 2008: Representing and Exchanging 3D City Models with CityGML. In: Lee, J., Zlatanova, S. (Hrsg.), Lecture Notes in Geoinformation & Cartography, 20, Springer Verlag
- LUDWIG, D., LANIG, S. & KLÄRLE, M., 2009: Location analysis for solar panels by LiDAR-Data with Geoprocessing - SUN-AREA. Enviroinfo 2009, 23rd International Conference on Informatics for Environmental Protection, Berlin, Germany.
- LUTZ, M., MÖLTGEN, J. & KUHN, W., 2002: Ontologien zur Spezifikation von Informationssystemen für Verkehrsplaner. In: Schrenk, M. (Hrsg.), CORP - The 7th Symposium on Information Technology in Urban and Spatial Planning, Band 1, Technische Universität Wien, S. 151-156.
- MÉTRAL, C., BILLEN, R., CUTTING-DECELLE, A.-F. & VAN RUYMBEKE, M., 2010: Ontology-Based Approaches for Improving the Interoperability Between 3D Urban Models. Special Issue Bringing Urban Ontologies into Practice, Journal of Information Technology in Construction (ITcon), Vol. 15, S. 169-184
- NEIDHART, H., 2007: Digitale Wärmebedarfskarte aus Laserscanning. Dreiländertagung der SGPBF, DGPF und OVG: Von der Medizintechnik bis zur Planetenforschung – Photogrammetrie und Fernerkundung für das 21. Jahrhundert, DGPF Tagungsband Nr. 16, S. 339-345
- NEIDHART, H. & SESTER, M., 2006: Creating a digital thermal map using laser scanning and GIS. Proceedings of the 10th International Symposium on District Heating and Cooling, Hanover, Germany, 2006

- OPEN GEOSPATIAL CONSORTIUM INC., 2008: OpenGIS City Geography Markup Language (CityGML) Encoding Standard. URL: <http://www.opengeospatial.org/standards/citygml>, letzter Zugriff: 24.01.2012
- SENGUV, 2011: Klimaschutz in Berlin. Broschüre, Senatsverwaltung für Gesundheit, Umwelt und Verbraucherschutz, Berlin, URL: <http://www.stadtentwicklung.berlin.de/umwelt/klimaschutz/publikationen/infoblatt/index.shtml>, letzter Zugriff: 24.01.2012
- SIMUPLAN, 2011: Solarpotentialanalyse Berlin – Datendokumentation. URL: <http://www.businesslocationcenter.de/imperia/md/content/3d/solaratlas/datendokumentation.pdf>, letzter Zugriff: 19.01.2012
- STRZALKA, A., BOGDAHN, J., COORS, V. & EICKER, U., 2011: 3D City modeling for urban scale heating energy demand forecasting. In: HVAC&R Research, Jg. 17, H. 4, S. 526–539, URL: <http://www.tandfonline.com/toc/uhvc20/17/4>
- STRZALKA A., EICKER U., COORS V. & SCHUMACHER, J., 2010: Modeling Energy Demand for Heating at City Scale. In: Proceedings of SimBuild 2010, 4th National Conference of IBPSA-USA, New York, USA

3D-Informationssysteme für die Bauphysik: Ein alternativer Ansatz der Gebäudemodellierung

REBECCA MÜLLER-SIEGERT¹ & HEINZ-JÜRGEN PRZYBILLA²

Zusammenfassung: Die umfangreichen Anforderungen der Bauphysik an ein flächenübergreifendes 3D-Gebäudeinformationssystem stellt Geowissenschaftler und Informatiker vor neuen Herausforderungen:

Zur Darstellung hochkomplexer energetischer Gebäudeinformationen von Siedlungsflächen ist eine Abkehr von den bisher verwendeten Standards und Techniken der 3D-Gebäudemodellierung erforderlich. Im Zuge dessen werden innerhalb eines Projektes der Hochschule Bochum Methoden zur Analyse, Weiterentwicklung und Visualisierung von bauklimatischen Informationen entwickelt. Das zu generierende Informationssystem basiert auf vektorbasierten Gebäudemodellen, die einen innovativen Ansatz in der Modellierung und Datenverarbeitung bieten. Als Basis für dieses Informationssystem wird ein Google Earth Plugin verwendet.

1 Vorstellung des GEKIS-Projektes

Innerhalb des GEKIS-Projektes (Bauklimatisches Informationssystem auf Basis von Google Earth) arbeiten Bauingenieure und Geoinformatiker mit Immobilienunternehmen zusammen, um ein dynamisches Informationssystem auf Basis von Google Earth zu entwickeln.

Dieses Informationssystem soll dazu beitragen, die Bestände von Immobilienunternehmen effektiver zu verwalten. Ein besonderer Schwerpunkt bei dieser Verwaltung soll dabei auf den bauphysikalischen, bauklimatischen und energetischen Parameter gelegt werden. Bauklimatik bedeutet hier die Berücksichtigung aller äußeren und inneren Einflüsse auf ein Gebäudeobjekt und die entsprechende Energiebilanz. Diese Einflüsse liegen teils in der Exposition, teils in der Gebäudekonstruktion und teils durch die Objekte in der Umgebung des Gebäudes begründet. Einen wesentlichen Einfluss üben darüber hinaus das verwendete Heizungssystem, die lokale Wärmedämmung und die örtlichen Witterungsverhältnisse aus.

Innerhalb des Informationssystems werden 3D-Gebäudemodelle mit bauphysikalischen Parametern verknüpft und auf Basis von Google Earth dargestellt. Die Erstellung dieses System erfordert die enge Zusammenarbeit von Geoinformatikern, Geodäten und Bauingenieuren.

Das GEKIS-Informationssystem ist dadurch ein Produkt der interdisziplinären Zusammenarbeit der Labore Photogrammetrie und Bauphysik der Hochschule Bochum. Während das Labor für Bauphysik für die Berechnung und Analyse der relevanten Einflüsse auf das Energieprofil eines Gebäudes verantwortlich ist, erstellt und entwickelt das Labor für Photogrammetrie das Informationssystem.

¹ Rebecca Müller-Siegert, Labor für Photogrammetrie, Hochschule Bochum, Lennerhofstr. 140, 44801 Bochum, E-Mail: rebecca.mueller-siegert@hs-bochum.de

² Heinz-Jürgen Przybilla, Labor für Photogrammetrie, Hochschule Bochum, Lennerhofstr. 140, 44801 Bochum, E-Mail: heinz-juergen.przybilla@hs-bochum.de

Ein weiterer wesentlicher Projektpartner ist ein Oberhausener Immobilienunternehmen, welches für die notwendigen Untersuchungen dem Projekt ein Untersuchungsgebiet im Norden des Ruhrgebietes zur Verfügung stellte. Dieses Untersuchungsgebiet zeichnet sich durch mehrere architektonisch und bauphysikalisch unterschiedliche Gebäudetypen aus. Insgesamt gibt es bis zu 10 Haupttypen, denen jeweils mehrere Untertypen angehören. Diese Haupttypen weisen eine hohe Heterogenität bezüglich der durchgeführten energetischen Sanierungsmaßnahmen auf und bieten daher der Untersuchung eine ausreichende Forschungsgrundlage.

Die reinen Geometriedaten sollen im Zuge dieses Systems nicht nur als Visualisierungsgrundlage dienen, sondern auch dynamisch die Veränderungen des Energiebedarfes anzeigen. Dadurch erhält der Anbieter nicht nur ein reines Visualisierungstool, sondern auch eine graphische Oberfläche zur anschaulichen Präsentation von sanierungsbedingten Wärmebilanzverbesserungen. Als Grundlage für die Informationsplattform dient ein in eine HTML-Oberfläche eingebundenes Google Earth Plugin.

2 Problemstellung

In der Bauphysik verwendete Gebäudemodelle zur Berechnung des Energiebedarfes beruhen vorwiegend auf 2D-Faltmodellen, die als Eingabehilfe dienen. Abb. 1 zeigt ein solches Faltmodell. 3D-Modelle kommen vereinzelt als Visualisierungsbasis in Form von CAD-Zeichnungen zum Einsatz. Die Verwendung einer dreidimensionalen Grundlage zur Darstellung von Informationen findet daher innerhalb der Bauphysik wenig Verwendung. Innerhalb der Geoinformatik ist dieses Gebiet zwar weitestgehend erforscht, jedoch stellen die Erwartungen der Bauphysik an die Darstellung und Verwendung von Gebäudemodellen die Geoinformatik vor neue Herausforderungen. Neben der Einteilung in unterschiedliche Zonen ist ein Gebäude nicht nur durch seine Geometrie, sondern auch durch die Summe seiner bauphysikalischen Parameter bestimmt.

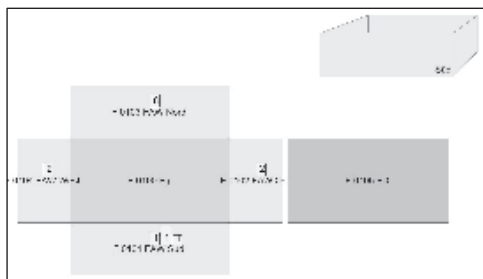


Abb. 1: In der Bauphysik verwendetes Faltmodell zur Berechnung des Energieprofils.

Für das GEKIS-Informationssystem ist daher die Darstellung der Gebäude als massives Objekt weniger wichtig als

dessen Unterteilung in unterschiedliche Komponenten. Diese sollen dynamisch, je nach Eingabe des Nutzers, ihre jeweiligen Attribute verändern und so neue Berechnungsgrundlagen für die Visualisierung schaffen. Diese Attribute sollen entsprechend der EnEV 2009, der Energieeinsparverordnung für Gebäude, aufgearbeitet sein. Neue Daten sollen darüber hinaus schnell mit dem bisherigen Bestand verknüpft und die Ladezeit wesentlich reduziert werden. Zur Darstellung komplexer energetischer Gebäudeinformationen, entsprechend eines LOD 4-5 nach

LÜBKE et al. 2003 und STREICH 2011 von Siedlungsflächen, ist daher eine Abkehr von den bisher verwendeten Standards und Techniken der 3D-Gebäudemodellierung erforderlich.

2.1 Bisherige Modellierungsmethoden

Die für die Darstellung innerhalb Google Earths verwendeten Modelle basieren auf XML-Strukturen, die entweder den Verweis auf ein, in einer separaten Datei enthaltenes, Geometriemodell selbst oder die Koordinaten der einzelnen Flächen als String beinhalten. Alternativ werden auch über XML-Anweisungen Gebäudeumrisse extrudiert, um den Anschein eines massiven Objektes zu vermitteln (Google 2012).

OGC-standarisiert unter diesen XML-basierten Modellen sind nach SALMINEN & TOMPA 2011 die Auszeichnungssprachen Keyhole Markup Language (KML) und die nach STADLER et al. 2009 auf einem GML-Anwendungsschema basierende City Geography Markup Language (CityGML).

Beide Ansätze bieten durch den hohen Detaillierungsgrad in der Darstellung vielversprechende Möglichkeiten für ein Informationssystem und sind besonders für die effiziente und umfangreiche Darstellung von kompletten Stadtlandschaften geeignet. Besonders die auf CityGML basierenden semantischen Gebäudemodelle (KOLBE 2009) sind Standard. Allerdings bieten diese massiven Gebäudemodelle oder extrudierten Flächen wenige Ansätze, einzelne Bauteile differenziert darzustellen. Zudem ist bei den erwähnten Methoden bereits die Style-Information bzw. die Textur vorgegeben. Eine dynamische Änderung der Darstellung anhand bestimmter Attribute bedeutet hier eine umfangreiche Aufarbeitung der Modelle für das System und eine Inflexibilität in der Darstellung.

2.2 Alternativer Ansatz der GEKIS-Projektes

Für das GEKIS-Informationssystem soll diese Inflexibilität in der Darstellung vermieden werden. Dafür ist eine detaillierte und in mehrere Komponenten untergliederte Darstellung der Gebäudemodelle notwendig. Diese Einzelteile sollen darüber hinaus anhand eindeutig identifizierbarer Attribute mit Sachinformationen verknüpft werden. Attributiv gespeicherte Informationen sollen sich dynamisch anhand von Nutzereingaben verändern. Die veränderten Attribute beeinflussen wiederum die visuelle Darstellung der Gebäude.

Um diese Kriterien zu erfüllen, erfolgte bei der Erstellung des Informationssystems eine Orientierung an bisher verbreiteten GIS-Systemen, wie ArcGIS oder QGIS, verbunden mit einer Abwendung von den massiven Stadtmodellen. Zu diesem Zweck wurde die Methode Linien und Polygone als Koordinatenstrings in eine KML einzubinden für die Darstellung kompletter Gebäude optimiert. Die Modellierung innerhalb des GEKIS-Projektes nutzt demzufolge Vektordaten. Diese bestehen aus Polygonen, deren räumliche Anordnung den Flächen eines Gebäudes nachempfunden wurde. In der späteren Darstellung dieser Daten in Google Earth sind die so entstandenen Gebäudeobjekte nicht visuell von denen der mit herkömmlichen Methoden erstellten Modelle zu unterscheiden.

3 Technischer Hintergrund

3.1 Datenmodellierung

Die Vektordateien werden anhand von Bauzeichnungen oder Laserscans unter Verwendung von AutoCAD als geschlossene Polylinien modelliert. Die so erstellten Daten werden zu einer Shapefile konvertiert und innerhalb von ArcGIS als Polygone interpretiert. Diese werden mit Basisinformationen, wie Adresse oder Bauteilbezeichnung, versehen. Zudem erhalten die Daten eine vorläufige Standard-Farbinformation, welche der jeweiligen Farbe des realen Objektes nachempfunden ist. Die Adresse und die Bauteilbezeichnung dienen dabei als eindeutiges Identifizierungsmerkmal, um ein explizites Objekt innerhalb eines bestimmten Gebäudes zu kennzeichnen.

3.2 Datenverwaltung

Die Verwaltung der Daten erfolgt in einer PostgreSQL-Datenbank mit einer Postgis-Erweiterung, welche dieser erlaubt, räumliche Operationen auszuführen (BRINKHOFF 2009). Diese Erweiterung ermöglicht PostgreSQL geographische Funktionen auszuführen und Geometrien zu verwalten. So werden die aktuellen Daten sowohl als relationale Tabelle wie auch als Geometrie gespeichert. Zusätzlich zu den Geometrien werden in der Datenbank weitere bauphysikalische Sachinformationen verwaltet. Dazu gehören, neben Daten über die energetische Qualität der Wärmedämmung, Aussagen über

bauphysikalische Parameter oder über die Anlagentechnik. Über die Adresse als Primärschlüssel erfolgt die Verknüpfung von Geometrien und Sachdaten. Abb. 2 stellt diese Verknüpfung und die jeweiligen Arbeitsschritte bis zu diesem Punkt dar, an dem die Forschungsergebnisse der Bauphysik und der Geoinformatik zusammen fließen.

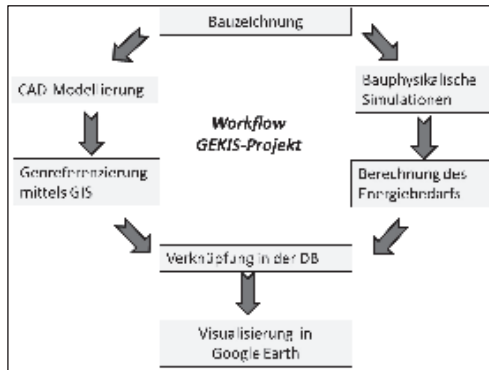


Abb. 2: Workflow des GEKIS-Projektes: Die Verknüpfung geodätischer und bauphysikalischer Informationen resultiert in einer Darstellung innerhalb von Google Earth

3.3 Systemaufbau

Serverseitig wird, neben einer PostgreSQL-Datenbank und einem Apache-Server, PHP verwendet. Dieses stellt die Schnittstelle zwischen der Datenbank und der Visualisierungsebene dar. Dabei wird innerhalb des PHP-Skriptes die Datenbankausgabe in ein KML-Format umgewandelt und mit den entsprechenden Style-Informationen versehen. Die Art der übermittelten Informationen sowie deren Darstellung werden durch JavaScript-Parameter

definiert. Dieses JavaScript interagiert mit dem in die HTML-Oberfläche integrierten Google Earth Plugin. Dieses Plugin ist Teil eines 3D-Viewers. Eine von Google eigens für die Interaktion mit dem Plugin erstellte API ermöglicht neben der Weitergabe von Funktionen deren Visualisierung. Der Nutzer verwendet einen Werkzeugkasten zur Festlegung der Ansichtsparameter. Die Modelldarstellung wird diesen Parametern angepasst. Das Plugin selbst ist ein voll funktionsfähiger Earth Globus, welcher die Verknüpfung eigener Funktionen mit der proprietären Software von Google Earth ermöglicht. Darüber hinaus beinhaltet das System neben dem beschriebenen 3D-Viewer eine 2D-Darstellung weiterer Daten, wie einem Baumkataster, welche als separates Informationstool dient. Die in der Abb. 3 ersichtliche Systemarchitektur des GEKIS-Systems gibt einen Überblick über diese grundsätzlichen Systemkomponenten.

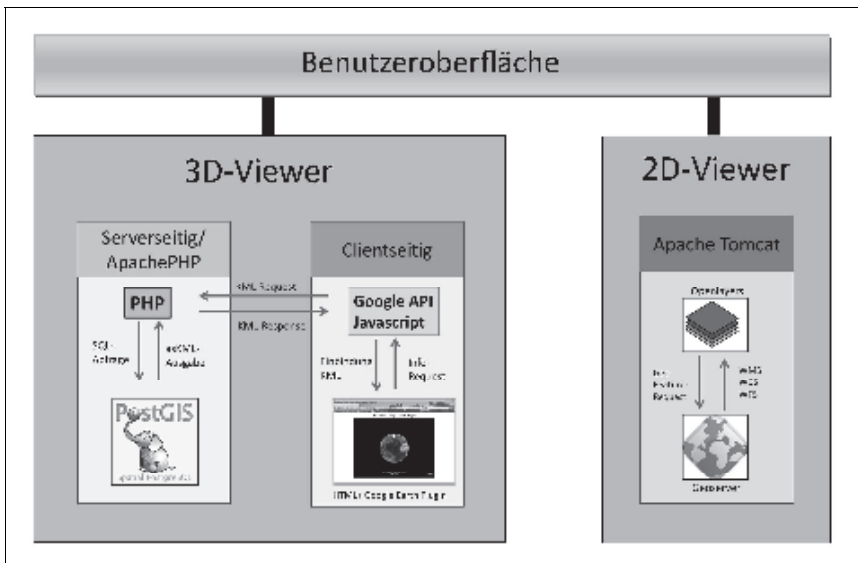


Abb. 3: Systemarchitektur des GEKIS-Informationssystems, bestehend aus einem 3D- und einem 2D-Viewer.

3.4 Visualisierung und Funktionen

Die Art der Darstellung der Gebäudeobjekte unterscheidet sich in bereits vordefinierten und in vom Nutzer beeinflussten Ansichten. Innerhalb der vordefinierten Ansicht werden die Gebäudeobjekte in ihrer Standardeinstellung farblich ihren realen Vorbildern angepasst. Zusätzlich liegen bereits vordefinierte Farbschemata und Klassifikationskriterien vor, die der Nutzer auf Wunsch direkt aufrufen kann. Ein Beispiel für ein farblich vorgegebenes Objekt zeigt die Abb. 4, welche einen Ausschnitt der in realen Farben dargestellten Gebäudemodelle darstellt. Je nach Abfrage des Nutzers verändert sich darüber hinaus die Darstellung der Modelle. So ist es

diesem möglich sich z.B. nur einzelne Objekte anzusehen, oder auch den Farbcode der Darstellung anhand eines bestimmten Kriteriums zu verändern.

Beispielhaft soll dies an der Toolbox Solarpotenzial erläutert werden:

Diese Toolbox ermöglicht die dynamische Abfrage und farbcodierte Aufarbeitung der Gebäudeobjekte. Anhand von aktuellen Standards wird hier die Farbe der Dachfläche dem Abfragekriterium angepasst. Neben der Abfrage nach bereits vorklassifizierten Merkmalen ist der Nutzer in der Lage, sich selektiv bestimmte Dachflächen anzeigen zu lassen. Die Anzeige erfolgt anhand von Merkmalen wie Azimut und Neigung. Diese Art der Abfrage hat den Vorteil, dass Veränderungen in der Gesetzgebung oder der Solartechnik mit geringem Zeitaufwand innerhalb des Systems umgesetzt werden.

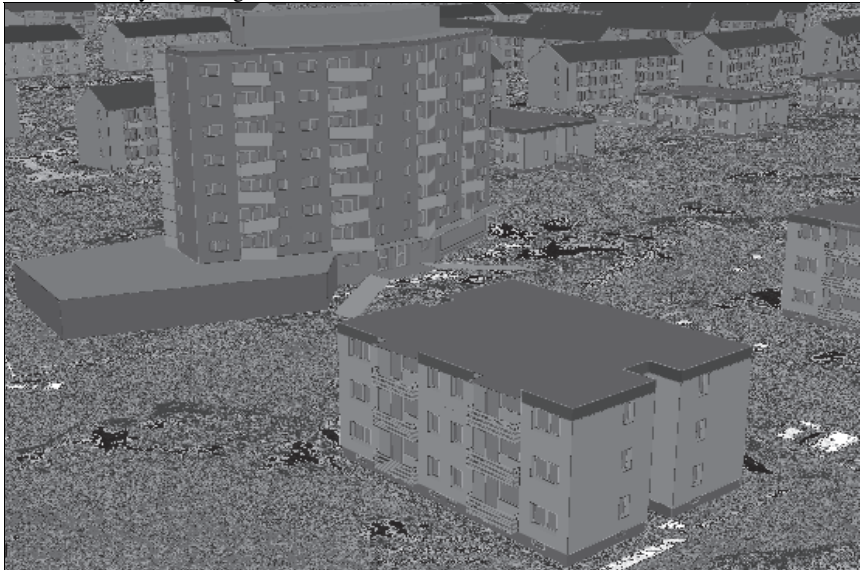


Abb. 4: Vektorbasierte Hausmodelle in Google Earth. Ausschnitt aus dem Informationssystem.

Neben der rein visuellen Darstellung von abgefragten Attributen oder Wertespannen bietet das System darüber hinaus die Möglichkeit, Berechnungen für das individuelle Energieprofil der Gebäude durchführen zu lassen. Über eine Eingabemaske kann der Nutzer Werte in die Datenbank eingeben, die bei der nächsten Abfrage direkt in die Darstellung mit einfließen. Zusätzlich kann der Nutzer Einfluss auf Berechnungsvariablen nehmen. So zeigt das System beispielsweise eine mögliche Verringerung des Transmissionswärmeverlustes eines Gebäudes durch die Verwendung einer dickeren Wärmedämmung an.

4 Bewertung des vektorbasierten Ansatzes

Im Gegensatz zu den bisher in der 3D-Modellierung verwendete Methoden bietet der Ansatz einer vektorbasierten Darstellung dem Anwender die Möglichkeit innerhalb eines detaillierten, auf kleinere Stadtteile angepassten Rahmens arbeiten zu können. Die dargestellten Komponenten sind nicht vordefiniert, sondern können in ihrer Darstellung vom Nutzer beeinflusst werden. Zudem bedeutet der Verzicht auf jede Art von Textur eine wesentlich kürzere Ladezeit bei der Darstellung hochkomplexer kleinräumlicher Modelle. Darüber hinaus können sowohl die Objekte selbst, wie auch die mit ihnen verknüpften Daten mit geringem Aufwand vom Nutzer verändert werden.

Für ein Immobilienunternehmen bedeutet dies nicht nur eine verbesserte Pflege des eigenen Datenbestandes, sondern auch eine relativ schnelle und kosteneffiziente Methode, Sanierungsauswirkungen auf ein Gebäude oder eine Siedlung bereits im Vorfeld einer Maßnahme abschätzen zu können. So kann der Einfluss einer neuen Gebäudedämmung auf den Energieverbrauch relativ schnell veranschaulicht werden. Zudem können bereits im Vorfeld erstellte Klassifikationen, wie die bereits erwähnte Eignung für Solarpotenzial, auf einfach Art und Weise aktuellen Richtlinien angepasst werden. Dieser Tatbestand verhindert eine Überalterung des Datenbestandes und bedeutet für das System ein Zugewinn an Resilienz. Zudem reduzieren sich Fehlerquellen, die durch eine manuelle Klassifikation einzelner Flächen auftreten könnten. Dem Mehrwert an diesem alternativen Modellierungsansatz geht aber eine umfangreiche Datenaufbereitung voraus. Erschwerend wirkt zudem der Einfluss von Google Earth als Darstellungsplattform, welches als proprietäre Software wenig Aufschluss über im Hintergrund ablaufende Prozesse gibt. Abzuwarten wäre daher die Entwicklung eines vergleichbaren Open-Source-Plugins und dessen Vor- oder Nachteile für das verwendete System.

Ebenfalls ist zu berücksichtigen, dass dieser Ansatz sich hervorragend für die Darstellung einzelner Gebäudeobjekte oder kleinere Stadtteile, aber weniger für einen großräumigen Ansatz eignet. Für größere Gebiete, mit weniger dynamischen Auswertungskriterien, eignen sich eher die bewährten Methoden.

5 Zusammenfassung

Die von Immobilienunternehmen und Bauingenieuren benötigten Gebäudeinformationssysteme erfordern einen alternativen Ansatz in der Gebäudemodellierung. Daher werden innerhalb des GEKIS-Informationssystems vektorbasierte Modelle verwendet. Diese sind für den kleinräumlichen Einsatz und für eine hochdynamische Darstellung optimiert. Die Verwaltung dieser Modelle erfolgt in einer PostgreSQL/Postgis-Datenbank. Als Visualisierungsplattform dient ein Google Earth Plugin. Diese Art der Datenhaltung wurde speziell für die detaillierte, hochdynamische Visualisierung von bauphysikalischen Informationen ausgewählt. So ermöglicht sie eine größere Informationsdichte als bei gebräuchlichen Darstellungen in der Bauphysik. Zudem erleichtert diese Modellform die Verknüpfung und Visualisierung von Sachinformationen mit Gebäudegeometrien. Darüber hinaus ermöglicht sie dem Anwender eine

unkomplizierte Veränderung und Pflege des Datenbestandes. Neue Datengrundlagen oder Sanierungen können bereits im Vorfeld in das Informationssystem eingepflegt und deren Auswirkungen dreidimensional dargestellt werden. Zudem können selektiv nur einzelne Aspekte der Gesamtszene von dem Anwender detailliert untersucht werden.

Die umfangreichen Analysemöglichkeiten kompensieren eine langwierige Datenaufbereitung und ermöglichen eine schnelle Verknüpfung mit neuen Datenbeständen. Der programmiertechnische Aufwand wurde so reduziert. Auch kann das System gesetzlichen und technischen Veränderungen in der Gebäudesanierung durch geringen programmiertechnischen Aufwand angepasst werden. Dadurch ist die vektorbasierte Darstellung durchaus als eine Alternative zu den bisherigen Ansätzen der 3D-Stadtmodellierung zu betrachten.

6 Literatur

- BRINKHOFF, T., 2008: Geodatenbanksysteme in Theorie und Praxis. 492 S., Wichmann Verlag, Oldenburg.
- EnEV, 2009, Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden. Energieeinsparverordnung für Gebäude, nichtamtliche Fassung. Quelle: http://www.enev-online.org/enev_2009_volltext/index.htm (letzter Zugriff 19.01.2012).
- KOLBE, T., NAGEL, T. & STADLER, A., 2009: CityGML – OGC Standard for Photogrammetry? In: Photogrammetric Week (2009), S. 265-277.
- LUEBKE, D., REDDY, M., COHEN, J.D., VARSHNEY, A., WATSON, B. & R. HUEBNER, R., 2003: Level of Detail for 3D Graphics. 405 S., Elsevier Science, San Francisco.
- OBE, R. O. & HSU, L. S., 2011: PostGis in Action. 491 S., Manning Verlag, Greenwich.
- SALMINEN, A. & TOMPA, F., 2011: Communicating with XML. 237 S., Springer Verlag, London.
- STADLER, A., NAGEL, C., KÖNIG, G. & KOLBE, T., 2009: Making Interoperability Persistent: A 3D Geo Database Based on CityGML. In: LEE.J&S.ZLATANOVA (Hrsg.), 3D GeoInformation Science. S. 175-192, Springer Verlag, Heidelberg.
- STREICH, B., 2011: Stadtplanung in der Wissensgesellschaft. 723 S., SV Verlag für Sozialwissenschaften, Wiesbaden.
- WIESNER, W., 2007: Energetische Grundlagen solaren Bauens. In: EVERDING, D. (Hrsg.), 2007, Solarer Städtebau. Vom Pilotprojekt zum planerischen Leitbild. Kohlhammer Verlag, Stuttgart, S. 101-124.

Linienbasiertes Matching von 3D-Gebäudemodellen mit IR Luftbildsequenzen zur automatischen Texturgewinnung

DOROTA IWASZCZUK, LUDWIG HOEGNER, MICHAEL SCHMITT & UWE STILLA

Zusammenfassung: Wärmetexturen, die der Detektion und Dokumentation von Wärmeleckagen in der Gebäudehülle dienen können, werden immer häufiger aus IR Daten abgeleitet und den Gebäudemodellen zugeordnet. Bei der Erfassung sind die vom GPS/INS-System registrierten Parameter der äußeren Orientierung hilfreich. Jedoch sind die direkt bestimmten Parameter oft nicht ausreichend. In diesem Beitrag wird eine Methode zur Verfeinerung der äußeren Orientierung der Kamera dargestellt. Dafür wird eine Registrierung des Gebäudemodells mit den georeferenzierten Bilddaten durchgeführt. Zuerst werden in der Bildsequenz lineare Strukturen extrahiert und mit Liniensegmenten approximiert. Aus dem Kontrast und der Länge eines Liniensegmentes wird die Zuverlässigkeit der Features bestimmt. Als nächstes wird das Modell mit den angenäherten Orientierungsparametern ins Bild projiziert. Dann werden die Korrespondenzen gesucht, die sich aus der Entfernung und Steigung des Liniensegmentes ergeben. In den weiteren Schritten sollen aus den Korrespondenzen mittels einer Ausgleichsrechnung die Orientierungsparameter der Kamera neu berechnet werden.

1 Einleitung

3D-Gebäudemodelle finden in Bereichen wie z.B. Navigation, Krisenmanagement, Verkehrs-, Stadtplanung und Lärmuntersuchung Anwendung. Die Gebäudemodelle werden oft auch um zusätzliche Informationen, z.B. Texturen, Fassadenstrukturen, oder zeitliche Änderungen erweitert. Die Wärmetexturen, die der Detektion und Dokumentation von Wärmeleckagen in der Gebäudehülle dienen können, werden immer häufiger aus IR Daten abgeleitet und den Gebäudemodellen zugeordnet. Bei der Registrierung sind die vom GPS/INS-System registrierten Parameter der äußeren Orientierung hilfreich. Jedoch sind die direkt bestimmten Parameter oft nicht ausreichend, um eine präzise Texturzuordnung durchzuführen. In diesem Beitrag wird eine Methode zur Verfeinerung der äußeren Orientierung der Kamera dargestellt. Dafür wird eine Registrierung des Gebäudemodells mit den georeferenzierten Bilddaten durchgeführt. In den letzten Jahren wurden verschiedene Methoden zur Registrierung von luftgetragener Kamera entwickelt. FRUEH et al. projizierte das 3D-Gebäudemodell mit verschiedenen, zufälligen Parametern ins Bild und korrelierte die Modelllinien mit den extrahierten Liniensegmenten. Aus mehreren Versuchen wurde dazu die Kameraposition mit der besten Anpassung ausgewählt. Andere Autoren (DING & ZAKHOR, 2008; CHAM et al., 2010; FOERSTNER, 2010) wenden sog. „Manhattan“ oder „Legoland scenes“ mit dominanten horizontalen und vertikalen Richtungen an und berechnen die Ausrichtung der Kamera mithilfe der Fluchtpunkte.

2 Linienbasiertes Matching

Dieser Beitrag beschreibt ein Verfahren zur Registrierung von 3D Gebäudemodellen mit IR Aufnahmen. Diese Methode basiert auf Zuordnung von Linien und der Neuberechnung der äußere Orientierung der Kamera mit der Methode der kleinsten Quadrate. Die Linien wurden fürs Matching ausgewählt, weil sie am genauesten den realen Gebäudestrukturen entsprechen. In den IR Bildern sind typischerweise die Kanten zwischen Wänden und Dächern am einfachsten zu erkennen. Dies liegt meistens an den unterschiedlichen verwendeten Materialien bei Dächern und Wänden und ihren verschiedenen Emissionsgraden. Zwei Körper mit gleicher Temperatur können unterschiedlich starke Infrarotstrahlung emittieren und dadurch im IR Bild verschiedene Grauwerte annehmen.

2.1 Extraktion von Linien im Bild

Bevor das Model mit dem Bild koregistriert werden kann, müssen im IR Bild passende Features extrahiert werden. Im Vergleich zu VIS Aufnahmen sind IR Bilder oft kontrastarm. Die spektrale Information bei einem IR Bild ist nicht verfügbar und es werden auch keine Spektralkanäle differenziert. Als Folge dessen ist das IR Bild ein Grauwertbild.

2.2 Bestimmung der Zuverlässigkeit

Die Liniensegmente der IR Bilder werden mit verschiedenen Parametern extrahiert. Die minimale Amplitude wird stufenweise variiert, so dass die Liniensegmente mit verschiedenen Zuverlässigkeitsgraden detektiert werden. Je größer die minimale Amplitude, desto zuverlässiger ist das Liniensegment. Es können dadurch aber auch weniger Liniensegmente im Bild detektiert werden. Die Liniensegmente, bei deren Extraktion die minimale Amplitude hoch ist, werden als zuverlässiger betrachtet da sie höhere Kontraste besitzen. Ähnlich verhält es sich mit den langen Liniensegmenten. Diese sind besser und zuverlässiger für die Ausgleichung. Deswegen ergibt sich die Zuverlässigkeit eines Liniensegmentes aus der Länge $l \in (0, d)$, wobei d die Diagonale des Bildes ist (keine Linie im Bild kann länger als die Diagonale werden) und aus der minimalen Amplitude $A \in [0, 255]$ (siehe eq.1).

$$\rho = 1/2 \cdot (l/d + A/255) \quad (1)$$

2.3 Projektion des Modells ins Bild und Sichtbarkeitsuntersuchung

Um die 3D Koordinaten des Modells in 2D Koordinaten des IR Bildes auszudrücken, wird das Model mithilfe der Kollinearitätsgleichungen ins Bild projiziert (2). Jeder Punkt des Modells wird unter Verwendung von Parametern der äußere $(X_0, Y_0, Z_0, \omega, \varphi, \kappa)$ und inneren (c, x_0, y_0) Orientierung in Bildkoordinaten umgewandelt. Die Koeffizienten r_{11}, \dots, r_{33} sind die Elemente der Rotationsmatrix $R(\omega, \varphi, \kappa)$ (Abb.1).

$$x = x_0 - c \frac{r_{11} \cdot (X - X_0) + r_{21} \cdot (Y - Y_0) + r_{31} \cdot (Z - Z_0)}{r_{13} \cdot (X - X_0) + r_{23} \cdot (Y - Y_0) + r_{33} \cdot (Z - Z_0)} + dx \quad (2)$$

$$y = y_0 - c \frac{r_{12} \cdot (X - X_0) + r_{22} \cdot (Y - Y_0) + r_{32} \cdot (Z - Z_0)}{r_{13} \cdot (X - X_0) + r_{23} \cdot (Y - Y_0) + r_{33} \cdot (Z - Z_0)} + dy$$

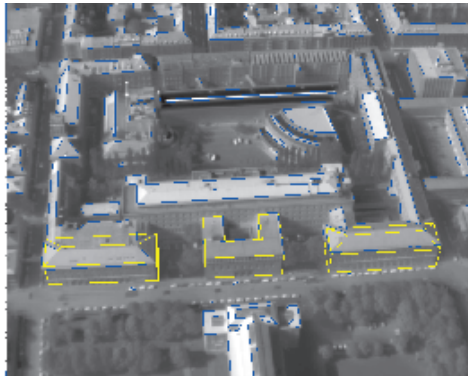


Abb. 1: Projiziertes 3D-Gebäudemodell (gelb) und extrahierte Linien (blau)

Bei der Projektion muss zusätzlich darauf geachtet werden, dass die verdeckten Linien nicht mitprojiziert werden. Es ist auch von Vorteil, die Flächen die fast senkrecht zu der Bildebene stehen, zu entfernen, da diese oft nur einige Pixel beinhalten und in den Kanten kaum zu unterscheiden sind. Dies kann leicht zu Fehlzuordnungen führen und die Ausgleichung instabiler machen.

Für die Sichtbarkeitsuntersuchung gibt es zwei Typen von Methoden. Einerseits gibt es vektorenbasierte Methoden, die versuchen die neuen Koordinaten der Polygone nach der Verschneidung mit dem zudeckenden Objekt zu bestimmen, andererseits gibt es die bildbasierten Methoden („depth-buffer“, „ray tracing“), die für jedes Pixel bestimmen, zu welchem Objekt das Pixel gehört. Hier wird die bildbasierte Methode gewählt.

2.4 Zuordnung

2.4.1 Parametrisierung der Gerade im 2D Raum

Eine Gerade im 2D Raum kann durch einen Winkel und die Entfernung vom Ursprung des Koordinatensystems beschrieben werden (3). Im Fall der sog. hesseschen Normalform wird die Gleichung der Gerade wie in (3) geschrieben.

$$x \cdot \cos(\gamma) + y \cdot \sin(\gamma) - p = 0 \quad (3)$$

Diese Form hat den Vorteil, dass die Gleichung auch für vertikale Geraden bestimmt ist. Die Linie wird auch nicht „überparametrisiert“, das heißt, es werden für die Beschreibung der Gerade nur zwei, und nicht wie bei manchen Gleichungen drei Parameter benötigt.

2.4.2 Suche der Korrespondenzen

Die Zuordnung der im Bild extrahierten Liniensegmente zu den Modelllinien basiert auf den Parametern der Gerade und der Entfernung der Endpunkte. Die Korrespondenzen zwischen verschiedenen Geraden werden aufgrund der Orientierung die durch den Winkel γ in der eq. (1) beschrieben ist und aufgrund der Lage gesucht. Dafür werden zunächst für jede Gerade die Parameter γ und p bestimmt. Danach wird um jedes Liniensegment des Modells ein Puffer gebildet. Die im Bild extrahierten Liniensegmente bei denen sich beide Enden im Puffer befinden, werden als korrespondierende angenommen (Abb.2).

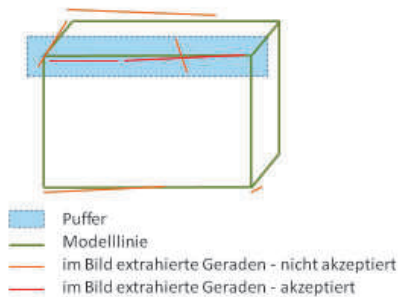


Abb. 2: Zuordnung der Geraden. Es wird geprüft, ob: Winkel $\gamma_i = \gamma_1 \pm \Delta\gamma$, wobei $\Delta\gamma$ ein wählbarer Schwellenwert ist. Um jede Modelllinie wird ein Puffer gebildet und für die Kandidaten (extrahierten Linien, mit ähnlichem Winkel γ) wird untersucht, ob beide Ende im Puffer liegen.

3 Ergebnisse

Die Ergebnisse der Linienzuordnung wurden im der Abb. 3 und in der Tab. 1 dargestellt. Die stärksten Zuordnungen konnten für die Dächer gefunden werden. Wie vorher erwähnt, liegt dies an den unterschiedlichen Materialien bei Dächern und Wänden. In unserem Fall stammte das verwendete 3D-Gebäudemodell aus der semiautomatischen 3D Rekonstruktion aus den Luftbildern. Deswegen sind die Dachkanten genauer als andere Kante erfasst und deswegen für die Zusammenführung vom Model und IR Bilder gut geeignet.

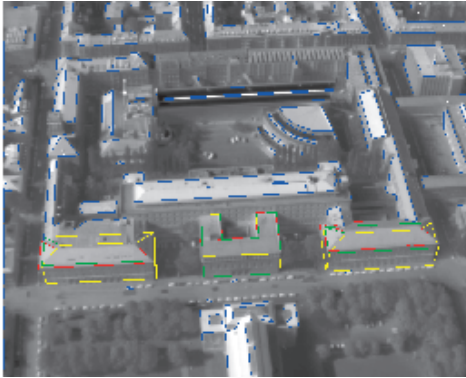


Abb. 3: Zuordnete Geraden. Gelb – das Modell, grün – Modelllinien mit Zuordnung, blau – extrahierte Liniensegmente, rot - extrahierte Liniensegmente mit Zuordnung

	Modelllinie ID	Bildlinie ID	gamma	p	gamma_Model	p_Model
			[a]	[pixel]	[a]	[pixel]
Zuordnung_1	2	263	7	-5,92	3	-5,13
Zuordnung_2	4	246	4	-2,60	4	-2,55
Zuordnung_3	5	264	94	-6,73	92	-6,90
Zuordnung_4	6	252	8	1,82	6	2,21
Zuordnung_5	7	244	92	-3,35	92	-3,48
Zuordnung_6	8	245	8	4,65	7	4,81
Zuordnung_7	9	263	7	-5,92	1	-5,03
Zuordnung_8	10	263	7	-5,92	3	-5,21
Zuordnung_9	12	263	7	-5,92	3	-5,13
Zuordnung_10	14	277	90	-12,75	93	-11,79
Zuordnung_11	21	254	92	-5,18	93	-5,84
Zuordnung_12	22	258	72	-0,92	74	-1,72
Zuordnung_13	22	259	77	-1,96	74	-1,72
Zuordnung_14	25	257	4	10,84	10	10,80
Zuordnung_15	25	262	7	10,96	10	10,80
Zuordnung_16	26	258	72	-0,92	74	-1,72
Zuordnung_17	26	259	77	-1,96	74	-1,72
Zuordnung_18	27	260	52	11,09	45	13,67
Zuordnung_19	33	267	94	-9,23	93	-9,54
Zuordnung_20	33	268	95	-9,84	93	-9,54
Zuordnung_21	33	270	94	-9,48	93	-9,54

Zuordnung_22	33	272	92	-8,84	93	-9,54
Zuordnung_23	39	257	4	10,84	10	10,80
Zuordnung_24	39	262	7	10,96	10	10,80
Zuordnung_25	43	273	93	-9,49	92	-9,39
Zuordnung_26	48	269	49	-14,98	44	-14,96
Zuordnung_27	52	266	175	26,08	175	25,54
Zuordnung_28	53	265	67	-17,06	60	-19,00
Zuordnung_29	56	265	67	-17,06	60	-19,00
Zuordnung_30	58	269	49	-14,98	44	-14,96
Zuordnung_31	59	273	93	-9,49	92	-9,39

Tab. 1: Zusammenstellung von exemplarischen Zuordnungen zwischen Liniensegmenten mit Pufferbreite 20 Pixel und Winkeltoleranz 10°

3.1 Ausblick

In weiteren Schritten der Arbeit sollen Projektionsparameter mittels einer Ausgleichung neu berechnet werden.

3.1.1 Parametrisierung der Gerade im 3D Raum

Damit im 3D Raum, genauso wie im 2D Raum, keine Sonderfälle zu berücksichtigen sind, ist es empfehlenswert die Geradengleichung zu parametrisieren. Eine Gerade im 3D Raum ist vollständig definiert und nicht überparametrisiert bei vier Parametern: zwei Winkeln und zwei Lageparametern (X_s, Y_s) (ROBERTS, 1988; SCHWERMANN, 1995; SCHENK, 2004; MEIERHOLD et al., 2008a, MEIERHOLD et al., 2008b). Die Geradengleichung ist in eq. (4) dargestellt, wobei $t \in \mathbf{R}$ ist.

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_s \cos \alpha \cos \theta - Y_s \sin \alpha + z \cos \alpha \sin \theta \\ Y_s \sin \alpha \cos \theta + Y_s \cos \alpha + t \sin \alpha \sin \theta \\ -X_s \sin \theta + t * \cos \theta \end{pmatrix} \quad (4)$$

3.1.2 Kollinearitätsgleichungen für Linien

Wie bei (SCHENK, 2004; MEIERHOLD et al., 2008a, MEIERHOLD et al., 2008b) beschrieben, können die (X, Y, Z) -Koordinaten in die Kollinearitätsgleichungen eingesetzt werden. Weiterhin können diese Gleichungen in (5) und (6) umgewandelt werden.

$$y = a \tan \left(-\frac{1}{m} \right) \quad (5)$$

$$p = \frac{n}{\sqrt{m^2 + 1}} \quad (6)$$

4 Literaturverzeichnis

- CHAM T.J., CIPTADI A., TAN W.C., PHAM M.T. & CHIA L.T., 2010: Estimating Camera Pose from a Single Urban Ground-View Omnidirectional Image and a 2D Building Outline Map, In Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), San Francisco, USA
- FOERSTNER, W., 2010: Optimal vanishing point detection and rotation estimation of single image from a legoland scenes, International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Geoinformation Sciences, Vol 38(3B): 157-162
- 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)
- MEIERHOLD, N., BIENERT, A. & SCHMICH, A., 2008a: Linebased referencing between images and laser scanner data for image-based point cloud interpretation in a CADenvironment. In The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, **37** (B5), S. 437–444
- MEIERHOLD, N., BIENERT, A. & SCHMICH, A., 2008b: Linienbasierte Referenzierung zwischen Einzelbildern und Laserscannerdaten für eine bildgestützte Interpretation von Punktwolken in einer CAD-Umgebung, DGPF Tagungsband 17
- ROBERTS, K.S., 1988: A new representation for lines. IEEE Proceedings of Computer Vision and Pattern Recognition, 635–640.
- SCHENK, T., 2004: From point-based to feature-based aerial triangulation. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, **58** (2004), pp. 315-329.
- SCHWERMANN, R., 1995: Geradengestützte Bildorientierung in der Nahbereichsphotogrammetrie. Dissertation, Veröffentlichung des Geodätischen Instituts der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, Nr. 52.

Sketch of an automatic image based pollen detection system

GILDARDO LOZANO-VEGA^{1,2,3}, YANNICK BENEZETH², MATTHIAS UHLER¹,
FRANK BOOCHS¹ & FRANCK MARZANI²

Abstract: The ability of measuring accurately airborne pollen concentration in the environment is an important goal for palynology. It has been unsatisfactory for agile image based pollen detection system, under the framework of the Personalized Pollen Profiling and Geospatial Mapping project based on individual information of allergic patient profile measured at multiple points from personal mobile wearable devices. With features from classical geometric and optical measures to specialised palynological information, it is feasible to characterise different pollen taxa images. Optimal selection of features allows a pattern detection system to split and recognise each taxon exactly. Gathering such accurate individual pollen concentration data in a geo-spatial context will benefit not only to patients through more precise medication but also to the improvement of pollen distribution models and forecasting.

In the context of computer vision, this paper presents the outline for the structure of an image based pollen detection system, under the framework of the Personalized Pollen Profiling and Geospatial Mapping project based on individual information of allergic patient profile measured at multiple points from personal mobile wearable devices. With features from classical geometric and optical measures to specialised palynological information, it is feasible to characterise different pollen taxa images. Optimal selection of features allows a pattern detection system to split and recognise each taxon exactly. Gathering such accurate individual pollen concentration data in a geo-spatial context will benefit not only to patients through more precise medication but also to the improvement of pollen distribution models and forecasting.

1 Introduction

The proportion of people in the world that suffer from allergic rhinitis is considerably high; estimations indicate from 10% to 20% (DYKEWICZ & HAMILOS 2009). For diagnosis purposes, it is necessary to understand the sort of airborne pollen taxa and the amount the sufferer was exposed to. Moreover, in order to avoid contact to risky environments, it is also beneficial to forecast pollen concentration by geographic regions. For instance, the allergen distribution in Europe changes every year (D'AMATO et al. 2007). This makes the creation of prediction models more difficult due to requirements of more precise data. Thus, the ability of measuring accurately airborne pollen concentration in the environment has become an important purpose for palynology.

Traditional counting methods consist of trapping airborne samples and counting particles manually. This is time consuming, involves costly labour and requires long-trained palynologists. Additionally, it is highly susceptible to human error due to fatigue or inexperience. These factors limit the processing of huge volumes of airborne samples and the necessary information to perform analysis with geographical accuracy in timely manner.

The advent of computer vision had brought plausible possibilities of improving counting methods to palynology. Microscopic object identification is becoming faster and more robust, although a satisfactory automatic pollen detection system has not been found yet. Such system need to be able to estimate the pollen concentration accurately in time and to gather information from multiple geographic points still being affordable.

1) i3mainz, Fachhochschule Mainz, Lucy-Hillebrand-Strasse 2, 55128 Mainz, Germany.

2) Le2i, Université de Bourgogne, B.P. 47870, 21078 Dijon Cedex, France.

3) E-Mail: gildardo.lozano@fh-mainz.de

2 Scheme of the 3P-GM project

The present work aims to outline the structure of an image based pollen detection system, under the framework of the Personalized Pollen Profiling and Geospatial Mapping project (3P-GM). The aim of 3P-GM project is to create an allergic patient profile based on reliable information of most allergenic pollen taxa concentration in the vicinity of a patient, measured on an individual basis at multiple points from personal and mobile devices.

Whereas stationary pollen monitors are capable of sampling just a single location and representing extensive regions, the proposed individual mobile pollen trap will gather airborne particles in the vicinity of the patient, and therefore with a closer relationship to the concentration of his exposure. The device will be able to gather information of the environmental conditions, geo-position and sampling time. Together with the symptomatic framework, this information will bring the analysis of pollen concentration to a new level. For example, it can be analysed by geo-statistical scientists, for example, to improve pollen distribution models and forecasting or by doctors for more precise and personalised treatment and medication.

In the following section, a description of relevant approaches according their function in the image based pollen detection system is given: imaging technologies, pollen localisation and segmentation techniques, modelling of pollen according to discriminating characteristics and machine learning schemes.

3 Sketch of a pollen detection system

Almost all works and projects in automatic and semi-automatic pollen recognition have followed the process described in Fig.1. The goal is to optimally adapt processing to the real characteristics of the pollen, which are most suitable and reliable for robust image based detection. However, available technical resources limit the system for instance, microscopy hardware, cost and computational power (including processing time and data storage). A trade-off between accuracy and resources needs to be considered. Below, most representative approaches are described as function of their contribution to tackle the recognition problem.

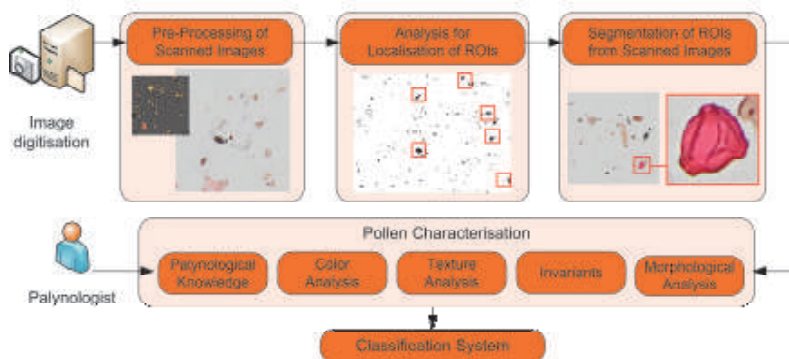


Fig.1: Typical pollen detection system: Image digitalisation, pre-processing, ROI localization. ROI segmentation, pollen characterisation and classification.

3.1 Image digitisation

Pollen grains have typical size between 10 and 100 microns depending on the taxa and almost all allergenic sorts have near spherical shape. Additional important characteristics are symmetry, apertures, ornamentation and internal structures. During the digitisation, it is sought to retain all these characteristics in the image. Also pollen grains usually acquire a purple-red dye after being prepared with fuchsine to enhance visibility of characteristics, previous to digitisation.

3P-GM project employs *airborne samples* as source that, unlike *manually prepared samples* are formed of a bulk of airborne pollen, debris and different biological particles stuck randomly in a sampling material.

One of the most employed microscopy techniques for pollen detection is transmitted light microscopy (TLM) due to its accessibility, simplicity and low cost. A drawback is the reduction of visibility of pollen characteristics after its projection in a 2D plane with magnification limited to 100X. Multiple-layer imaging at different heights is a technique that is used to gather volumetric information of the specimen. Higher-quality imaging methods such as electron beam based and confocal microscopy require specialised manipulation, high cost and long imaging time. Also fluorescence microscopy is useful to identify specimen's components that under typical TLM would not be possible. However, it requires high energy light sources, which usually have short lifetime (WU et al. 2008).

3.2 Localisation and Segmentation

The localisation problem consists in identifying particles of interest in images of airborne samples. Segmentation is performed to compute the detailed contour of the region of interest and extract it. The near-circular shape of the most allergenic taxa is the base of the processing. Modelling pollen as circular objects helps with the identification in airborne samples. Also, the roundness of the pollen contour is an advantage in the segmentation stage. It can be used for parameterising energy minimization methods as well as for the application of morphological operations. Colour, combined with shape characteristics, is also functional for segmenting and localising pollen in one step.

Commonly, the Hough transform has been used successfully to identify circular objects as done by RODRIGUEZ-DAMIAN et al. (2003) and LANDSMEER et al. (2009). Furthermore, RONNEBERGER et al. (2007) used the so called voxel-wise vector based gray-scale invariants in order to extend circular to spherical object detection for 3D objects.

For segmenting manually prepared samples, ALLEN (2006) employed a classical edge detector, combined with morphological operations. Furthermore, BOUCHER et al. (2002) combined classical morphological operations with enhanced colour information and proposed a segmentation method without previous localisation on airborne samples. Results showed a localisation/segmentation rate over 90%.

Techniques based on energy minimization have been widely employed. RONNEBERGER et al. (2007) employed a fast version of graph-cut on confocal manually prepared samples. Similarly, the "snakes" approach aims to find the contour by balancing external and internal forces. Trade-off between accuracy and smoothness can be also achieved by tuning initial parameters. However, the wrong selection of these parameters makes snakes method susceptible to local minima. Examples of successful contour segmentation using snakes are FRANCE et al. (1997), RODRIGUEZ-DAMIAN et al. (2003) and RONNEBERGER et al. (2007) on their airborne samples.

3.3 Characterisation of pollen taxa

The extraction of particular information that describes pollen grains, such that depicted in Fig. 2, is critical for the success of the detection system. Some information can be enclosed in pollen characteristics such as morphological structure, texture, colour and spectral reflectance while some other can be enclosed in pixel properties measured by local features. In order to achieve a robust system, the information must be discriminant enough to distinguish uniquely different pollen taxa and discard non-pollen grains as well as insensitive enough not to take into consideration intra-class variability. Thus a compromise must be found. There exist no single feature that can characterise pollen taxa with the aforementioned considerations completely; therefore an optimal mix is desired. In this section, most promising features for characterisation found in the field are described.

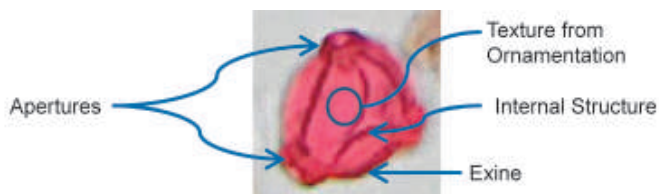


Fig.2 General characteristics of a pollen grain previously stained with fuchsin. Unknown taxon.

3.3.1 Morphological features

Geometric features. Geometrical structure is widely used in all sorts of applications and is one of the most common measures tested in pollen recognition due to its discriminating capability. RODRIGUEZ-DAMIAN et al. (2003) and BOUCHER et al. (2002) have tested more than 14 geometric features in total.

Second order moments. BOUCHER et al. (2002) and ZHANG et al. (2004) have employed parameters from central moments up to order three. These are known to be invariant to translation, rotation and scaling.

RODRIGUEZ-DAMIAN et al. (2003) are the only ones who used exclusively morphological features. An optimal search yielded to a recognition rate of 85.6% for just 3 taxa. BOUCHER et al. (2002) combined this sort of features with palynological information and reached a recognition rate of 77% for 30 taxa. Results indicate some weakness in morphological features, despite the amount of different measures. This fact was noticed by The Massey University (LI et al. 2004, HOLT et al. 2011) by considering additional features as improvement, as described in the following section.

3.3.2 Texture features

The Massey University is the only group that has deeply studied and tested texture features for pollen characterisation. In the last prototype a set of 31 parameters are used (HOLT et al. 2011). Combined with geometric features, their system achieved recognition rates from 88 to 100% for 6 different taxa. Mainly employed texture features are:

a) Grey-level co-occurrence matrix measures. From Haralick's statistics, LI et al. (2004) computed contrast of grey-levels, variance, homogeneity, inverse local homogeneity and

entropy. ALLEN (2006) describes additionally the use of 12 measures from the grey gradient co-occurrence matrix.

b) Gabor features. Mean and standard deviation of a family of Gabor filters and

c) Wavelet features. Gabor and Orthogonal Wavelet transforms.

Texture analysis is a powerful approach, especially robust to low image resolution. For instance, The Massey University group had reached its results with a 20X maximum magnification system (HOLT et al. 2011).

3.3.3 Palynological knowledge

The traditional method of manual pollen classification is the identification and qualification of a set of distinctive structures belonging to each pollen taxa. The idea is to transmit palynological knowledge into the pollen detection. In a first approach, FRANCE et al. (1997) designed a method to identify a single taxon only by means of identifying its exine. Although they achieved a recognition rate of 90%, the false positive rate reached 35%. Moreover, BOUCHER et al. (2002) incorporated algorithms to find pollen structures like cytoplasm, exine ornamentation, exine thickness, pore and reticulum.

3.3.4 Colour features

BOUCHER et al. (2002) used colour information not only for segmentation but also included mean colour to the feature vector together with morphological features. Furthermore, LANDSMEER et al. (2009) designed a more complex colour-based discrimination system to distinguish pollen grains from debris, in which the colour of each pixel of the studied particle is compared to the previously determined typical colour of pollen. Best results showed a recall of 86% and a precision of 61%. Closely related, MITTUMOTO et al. (2009) found Blue to Red (B/R) ratio suitable for recognition of 9 taxa by means of their autofluorescence images.

3.3.5 Local Invariant Features

Specific local features have been developed to address specific invariance by RONNEBERGER et al. (2007) and RANZATO et al. (2007). The best performance was reached by RONNEBERGER et al. (2007) who developed a set of 3D features from Haar integral framework: invariant to translation, rotation and global radiation deformation and robust to local deformations and gray-value transformations. They studied the performance of the features on airborne samples containing 22.700 particles of 33 pollen taxa and obtained a precision of 98.5% and recall of 86.5% with a rejection scheme.

3.3.6 Multispectral reflectance.

MITTUMOTO et al. (2009) studied the fluorescence spectrum measured in 10 nm wavelength intervals of 9 taxa. Unfortunately, only the B/R ratio was computed to compare it with the rest of the experiments. No-image-based techniques have confirmed that spectral reflectance of some pollen varies from taxon to taxon as explored by GOTTARDINI et al. (2007) and DELL'ANNA et al. (2009) with Fourier-Transform Infra-Red (FT-IR) spectral patterns.

4 Classification Algorithms

The choice of the classification method is vital for satisfactory results. Simple discriminating algorithms, e.g. one nearest neighbour, have been used for clustering due to their easy implementation and sometimes the low computational expense. For instance, RODRIGUEZ-DAMIAN et al. (2003) chose a minimum distance classifier. In order to select the most critical feature, a Floating Search Method was performed, reducing the vector size from 14 to 5 in the optimal case. BOUCHER et al. (2002) applied also the minimum distance idea to assign probabilities to shape feature vectors. The class decision was taken by confirming hypothesis probabilities by palynological features.

In a more sophisticated approach, RONNEBERGER et al. (2007) used a Support Vector Machine (SVM) technique together with one-versus-rest multi-class optimisation to get the aforementioned classification results on high-dimension vectors from 3D invariants.

Neural Networks have become very popular due to its relative simple configuration, flexibility and favourable results. For example, ZHANG et al. (2004) employed a supervised multilayer perceptron to classify a 6-dimension vector. Currently, HOLT et al. (2011) still rely in Neural Networks to classify the pollen types.

Then again, other classification methods have not been successful. RANZATO et al. (2007) used a Bayes classifier for a recognition rate of 64.9%. LANDSMEER et al. (2009) used Quadratic Discriminant Classifier and obtained the aforementioned recall of 86% and precision of 61%. These results put the method's suitability in this task into question.

5 Discussion

3P-GM project demands multiple point pollen monitoring, which implies massive analysis and agile concentration estimation. This fact discards complex and costly technologies like confocal or electron based microscopy and TLM is left as the most suitable. To overcome the reduction of pollen information, fluorescence and multiple-layer images are a clear option.

In the context of the project, the selection of techniques must focus on the localisation and segmentation of airborne samples from mobile pollen traps. Circular locators have been effectively tested on airborne samples even though some problem could arise with overlapped particles. Thus, its combination with supporting approaches may be recommendable, for example with colour features, whose information is useful not only for localisation but also for segmentation and characterisation. Moreover, airborne samples are susceptible to pollen cluttering and cropping. This problem has not been fully addressed yet and most approaches just reject particles in such cases. Multiple-layer images own the volumetric information needed for recognising overlapping particles, but constrains must carefully considered when using stacks of TLM images.

Pure morphological operations look unsatisfactory for segmenting airborne samples due to the random disposition of particle clutters. To overcome this problem, energy-minimisation-based approaches seem to have a reasonable trade-off between performance and computational cost.

The 3P-GM project requires a robust pollen characterisation to cope with most allergenic taxa. Global features, such as morphology, texture and colour, are measured considering the whole image and can provide some robustness, for example to rotation. They are weak against occlusion and imprecise segmentation and the extracted information is not enough for

characterising pollen completely. However, global features can be used in an early rough classification of groups of similar taxa due to its simple implementation. Further classification would be needed.

Palynological knowledge has been employed for specific taxon characterisation. It turns the system more complex as the number of taxa increases. Moreover, previous works have shown difficulty to detect specific characteristics due to the random orientation of particles. Nevertheless, rich palynological information is available and it is not fully employed in automatic detection systems. Multiple-layer images are an advantage in the detection of palynological characteristics.

The use of local features has been barely explored for characterisation. Aforementioned invariants are computed locally, but they are used for describing the whole image in a global manner. Local approaches, like SIFT and local self-similarity, usually employed in object matching, are a potential area of study for robust pollen description.

Fluorescence and multispectral reflectance are properties that have not fully explored for the characterisation task and early results using these techniques are encouraging to keep investigating in that direction as important features.

A quantitative comparison of the aforementioned performances is not always possible because of the variety of used methods and because the studied pollen taxa with different levels of difficulty, is not the same in all the experiments. Results suggest that simple classification methods are not enough when considering complex or high-dimensional features. Thus, optimal dimensional reduction and more complex algorithm can help to improve classification rates. To date, best classification results have been reached by means of neural networks and SVM. We consider that the optimal classifier is a function of specific feature vectors. Once the structure and dimensionality of the feature vector is chosen, testing different classification schemes would be possible.

6 Conclusions

A practical and reliable automatic pollen detection system remains still unsolved. Several efforts have gotten closer, with respectable results and some prototypes are already working in the field. 3P-GM project is expected not only to short the distance to the goal of improving the accuracy of the pollen concentration measure, but also of the availability of the data to allergists focused on the relief of the patients. Future work will be the study of fluorescence, multiple-layer images and palynological knowledge as support of already established characterisation methods with focus on a practicable and robust implementation.

7 Bibliography

- ALLEN, G., 2006: An Automated Pollen Recognition System (Master's thesis). Massey University.
- BOUCHER, A., HIDALGO, P. J., THONNAT, M., BELMONTE, J., GALAN, C., BONTON, P., & TOMCZAK, R., 2002: Development of a semi-automatic system for pollen recognition. *Aerobiologia*, **18**(3), pp. 195–201. Springer.
- D'AMATO, G., CECCHI, L., BONINI, S., NUNES, C., ANNESI-MAESANO, I., BEHRENDT, H., LICCARDI, G., POPOV, T. & VAN CAUWENBERGE, P., 2007: Allergenic pollen and pollen allergy in Europe. *Allergy*, **62**(9) pp. 976–990.

- DELL'ANNA, R., LAZZERI, P., FRISANCO, M., MONTI, F., MALVEZZI CAMPEGGI, F., GOTTARDINI, E., & BERSANI, M., 2009: Pollen discrimination and classification by Fourier transform infrared (FT-IR) microspectroscopy and machine learning. *Analytical and bioanalytical chemistry*, **394**(5), pp.1443-52.
- DYKEWICZ, M. & HAMILOS, D., 2010: Rhinitis and sinusitis. *The Journal of allergy and clinical immunology*. **125**(2) pp. S103-S115.
- GOTTARDINI, ELENA, ROSSI, S., CRISTOFOLINI, F., & BENEDETTI, L., 2007: Use of Fourier transform infrared (FT-IR) spectroscopy as a tool for pollen identification. *Aerobiologia*, **23**(3), pp. 211-219.
- HOLT, K., ALLEN, G., HODGSON, R., MARSLAND, S., & FLENLEY, J., 2011: Progress towards an automated trainable pollen location and classifier system for use in the palynology laboratory. *Review of Palaeobotany and Palynology*, **167**(3-4), pp. 175-183. Elsevier B.V.
- LANDSMEER, S. H., HENDRIKS, E. A. DE WEGER, L. A., REIBER, J. H. C., & STOEL, B. C., 2009: Detection of pollen grains in multifocal optical microscopy images of air samples. *Microscopy research and technique*, **72**(6), pp. 424-30.
- LI, P., TRELOAR, W. J., FLENLEY, J. R., & EMPSON, L., 2004: Towards automation of palynology 2: the use of texture measures and neural network analysis for automated identification of optical images of pollen grains. *Journal of Quaternary Science*, **19**(8), pp. 755-762.
- MITSUMOTO, K., YABUSAKI, K., & AOYAGI, H., 2009: Classification of pollen species using autofluorescence image analysis. *Journal of bioscience and bioengineering*, **107**(1), pp. 90-94.
- RANZATO, M., TAYLOR, P., HOUSE, J., FLAGAN, R., LECUN, Y., & PERONA, P., 2007: Automatic recognition of biological particles in microscopic images. *Pattern Recognition Letters*, **28**(1), pp. 31-39.
- RODRIGUEZ-DAMIAN, M., CERNADAS, E., FORMELLA, A., & GONZÁLEZ, A., 2003: Automatic identification and classification of pollen of the urticaceae family. *Proceedings of Advanced Concepts for Intelligent Vision Systems (ACIVS 2003)*, pp. 38-45.
- RONNEBERGER, O., WANG, Q., & BURKHARDT, H., 2007: 3D invariants with high robustness to local deformations for automated pollen recognition. *Proceedings of the 29th DAGM conference on Pattern recognition*. pp. 425–435. Springer.
- WU, Q., MERCHANT, F. & CASTLEMAN, K., 2008: *Microscope image processing*. Academic Press.
- ZHANG, Y., FOUNTAIN, D. W., HODGSON, R. M., FLENLEY, J. R., & GUNETILEKE, S., 2004: Towards automation of palynology 3: pollen pattern recognition using Gabor transforms and digital moments. *Journal of Quaternary Science*, **19**(8), pp. 763-768.

InSAR and GPS analysis of landslides: Application to assess slope stability of Sarcheshmeh and Gougerd landslides, Iran

Mehrdad Akbarimehr¹, Mahdi Motagh, Bahman Akbari, Fardin Pashazadeh & Hans-Ulrich Wetzel

Abstract: Landslide is one of the most destructive natural hazards which threatens human's life and influences the socioeconomic conditions of many countries. Iran is exposed to a wide variety of landslides mainly distributed on the steep slopes of Alborz and Zagros mountain ranges. Detection and monitoring of mass movement in susceptible slopes plays a key role in mitigating hazards and damages associated with creeping slopes and landslides. In this paper, we use observations from both GPS and InSAR to assess slope stability for two landslides in Iran. The first one is Sarcheshmeh landslide, located in Khorasan province of northeast Iran, and the other one is Gougerd landslide, located in Azarbaijan province of northwest Iran. GPS observations were conducted by campaign measurements during 2009-2010, while InSAR observations were obtained by the time-series analysis of Envisat SAR images during 2002-2008. We provide maps of surface deformation for these landslides and show the complementary nature of InSAR and GPS measurements to address slope stability analysis.

1 INTRODUCTION

GPS is a high precision positioning technique, which can be used to provide point-wise, semi continuous maps of crustal deformation associated with geophysical phenomena using a variety of static or kinematic techniques (DZURISIN, 2007). The choice of the processing techniques depends on a number of the practical considerations like the accessibility, cost, number of points, the required precision (GEORG GASSNER et. al, 2002, HITOSHI KONDO et. al, 1996). Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) measurements are exciting due to their unparalleled spatial resolution and wide coverage. Both GPS and InSAR are complementary to each other in that GPS provides detailed ground-truth vector information of displacement for specific localities as compared to the extensive spatial coverage provided by InSAR line-of-sight (LOS) observations. Combination of different ground and space-based geodetic monitoring systems provide promising tools for the assessment and evaluation of geological hazards. In this study we apply both techniques of radar interferometry and GPS to study the past and present kinematics of two creeping landslides in Iran. The first one is located in Khorasan province of northeast Iran in the vicinity of Esfarayen City. An ancient village called Sarcheshmeh is located at the foot of this creeping slope. The second one is a moving landslide in western Azerbaijan province near the city of Khoy. An ancient village called Gougerd is located at the foot of this creeping slope. Both case studies are subject to relatively high rate of precipitation, in particular during rainy periods, resulting in the high level of groundwater, sometimes emerging itself as springs on the surface of slopes.

¹ Master student, Department of Surveying and Geomatics Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran, E-mail: m.akbarimehr@ut.ac.ir

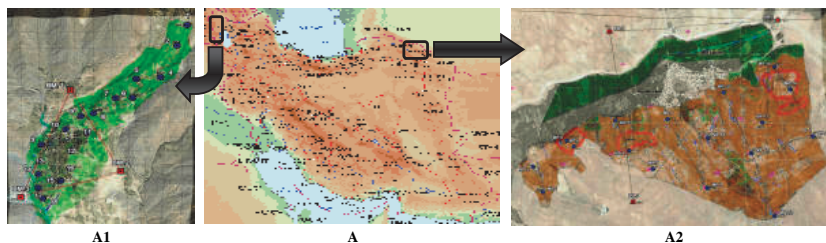


Fig.1: Geographical setting of two landslides investigated in this study. (A1) Gougerd landslide in northwestern Iran. (A2) Sarcheshmeh landslide in northeastern Iran. Red points are reference GPS stations outside of the landslides and blue points are monitoring stations inside the landslides.

2 DATA AND METHODOLOGY

The dataset used in this paper is divided into two categories of GPS observations and SAR satellite images. For evaluation of current surface deformation we used GPS and made a network of ~ 20 stations including reference and monitoring points in and around the landslide area. Constructed stations are pillars made of reinforced concrete, anchored to a depth of 1 m. The top of the pillars was 0.5 m above the ground. The reference network consists of 3 pillars constructed on the stable places like bedrocks around and outside of the landslide area (Fig.1). The monitoring stations were distributed near the cracks and sliding masses inside the landslide area. The required accuracy for monitoring slow movement phenomena like creeping landslides should be in order of centimetres to millimetres (JOSEF A. GILI et. al, 2000). GPS field observations carried out in rapid static mode with dual frequency GPS receivers, where each baseline was observed for at least 40 minutes, resulting in a precision of 5 mm +1 ppm for each baseline (WAN AZIZ et. al, 2009). Monitoring stations are observed at least from two reference stations. For Sarcheshmeh landslide 3 campaigns in October 2010, and May and August 2011 have been carried out, while Gougerd landslide has already been monitored by only 2 campaigns in October 2010 and May 2011. For evaluation and analysis of past mechanism of surface deformation in both landslides, we used ASAR images acquired over our study areas by the Envisat satellite. 16 descending images have been obtained for Sarcheshmeh spanning 2004-2006 time period, while 24 descending images have been obtained for the Gougerd landslide covering 2003-2010. Time-series interferometric processing using the Small Baseline Approach (SBAS) is applied on these datasets to produce time-series displacement map of surface deformation on landslides.

2.1 GPS ANALYSIS

GPS observations are carried out in rapid static mode, where monitoring points are positioned by the differential method with respect to reference points. Baselines ranging from 50 m to more than 3000 m in length were observed by dual frequency GPS receivers. The raw data are post-processed by Leica Geo Office software package. For compatibility of coordinates with Iranian National Geodetic Network (INGN), we connected our network to INGN using daily observation from a permanent GPS station in the vicinity of the landslide areas. Reference and monitoring stations are named by “BM” and “MP” prefix in figures and tables presented here. Baselines are first individually processed using precise ephemeris. A least-

square optimization method is then applied to adjust the network in order to determine precise coordinates of stations during each campaign. The displacements of monitoring points are computed from the difference between coordinates of monitoring points determined in each epoch. The standard error analysis using 95% is applied to calculate relative error ellipse and other statistical parameters associated with displacements.

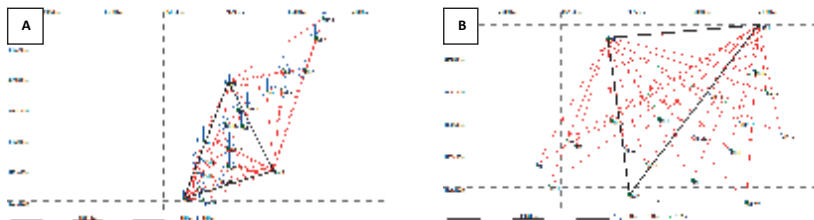


Fig. 2: GPS Geodetic network and observed baselines in (A) Gougard and (B) Sarcheshmeh landslides. Black lines are baselines between reference points, red lines are baselines between reference and monitoring points.

2.2 INSAR ANALYSIS

Differential SAR interferometry (InSAR) extracts information about the Earth's surface using the phase difference between two SAR images of the same area. Two complex SAR images taken from slightly different positions by the same antenna at two different times are combined and differenced in phase, forming a radar interferogram. Assuming uncertainties in orbital parameters and atmospheric phase distortions do not compromise the quality of the differential phase signal, the latter can be related to both surface topography and any coherent surface displacements along the look direction of the satellite that may occur between two acquisitions. The basic idea of differential InSAR is to subtract the topography-related phase from the interferogram in order to retrieve line-of-sight (LOS) surface displacement. The simplest way to do this is to use an image pair with a very small baseline so that the effect of topographic phase contribution becomes negligible. Alternatively, an external digital elevation model (DEM), generated e.g. from map digitization or optical stereo photogrammetry, can be used to estimate the effect of topography in an interferogram.

The interferometric processing in this study was done using the repeat-pass method implemented in DORIS software, developed by the Delft Institute for Earth-Oriented Space Research (DEOS), Delft University of Technology. The topography-related phase in the interferometric processing was estimated using a 3 arcsec digital elevation model from the Shuttle Radar Topography Mission (FAR & KOBRICK 2000). The precise orbital information provided by European Space Agency (ESA) was used during the processing. We formed 41 interferograms for Sarcheshmeh and 80 interferograms for Gougard, which are then used in the time-series analysis using the Small Baseline approach implemented in Stamps software (<http://radar.tudelft.nl/~ahoooper/stamps/index.htm>)

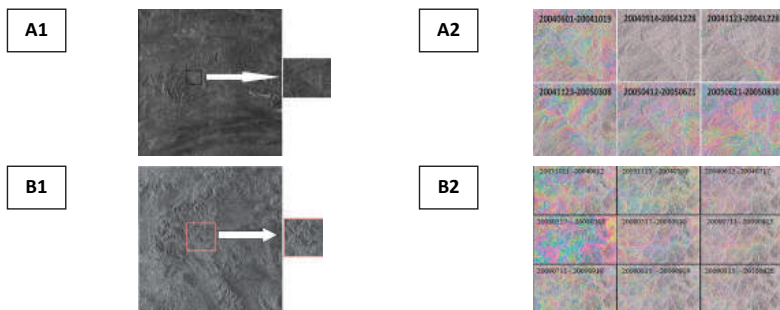


Fig. 3: (A1) An example of Envisat SAR image from the study area in northeast Iran. The small image shows the cropped frame that was used in this study to analyze Sarcheshmeh landslide. (A2) Several differential interferograms associated with Sarcheshmeh landslide and its surrounding area after eliminating orbital and topography effects. (B1) An example of Envisat SAR amplitude image from the study area in northwest Iran (Gougurd slope). The small image shows the cropped frame that was used in this study to analyze Gougurd landslide. (B2) Several differential interferograms associated with the Gougurd landslide and its surrounding area after eliminating orbital and topography effects.

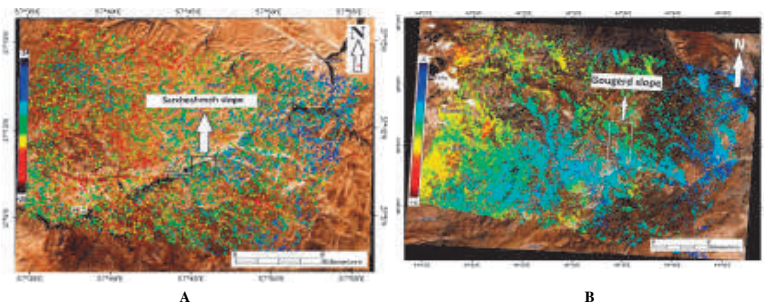


Fig. 4: Deformation velocity maps for (A) Sarcheshmeh and (B) Gougurd landslides and their surrounding areas obtained by InSAR time-series analysis. The units of measurements is mm/yr.

3 RESULTS AND DISCUSSION

3.1 Gougurd slope

For the Gougurd landslide, classical repeat-pass InSAR observations show relatively strong decorrelation for the main part of the landslide. Nevertheless, the use of advanced InSAR time-series analysis enabled us to detect few pixels on the landslide surface for the kinematic analysis. Fig. 5A illustrates the downward movement in the LOS direction from 2003 until 2009 on a specific pixel located close to the toe of the slide.

GPS observations on the Gougerd landslide show large amount of surface movement, in particular on the upper hand of village. A maximum of 99.5 cm was detected at station MP.2 located on the upper part of the landslide. Numerical results for the displacement of other monitoring points in Gougerd slope are represented in table 1 and illustrated graphically in Fig. 5B.

Table 1. Numerical displacement result for GPS monitoring points of Gougerd landslide

Monitoring Point ID	Displacement Epoch 1-2 (cm)	Standard error Epoch 1-2 (cm)	Horizontal Status	Displacement Rate (mm/Year)
MP.1	83.1	1.3	Moved	3.81
MP.2	99.5	1.0	Moved	4.56
MP.3	11.7	1.1	Moved	0.54
MP.4	60.9	1.2	Moved	2.79
MP.5	40.1	1.4	Moved	1.84
MP.6	29.4	0.9	Moved	1.35
MP.7	19.5	0.8	Moved	0.89
MP.8	9.7	0.8	Moved	0.44
MP.9	4.7	0.8	Moved	0.22
MP.10	13.5	1.3	Moved	0.62
MP.11	6.9	1.0	Moved	0.32
MP.12	1.2	1.2	Stable	-
MP.13	2.3	1.1	Moved	0.11
MP.14	0.8	1.0	Stable	-
MP.15	3.0	0.9	Moved	0.14
MP.16	4.4	1.1	Moved	0.20
MP.17	-	-	Destroyed	-
MP.18	0.8	0.9	Stable	-

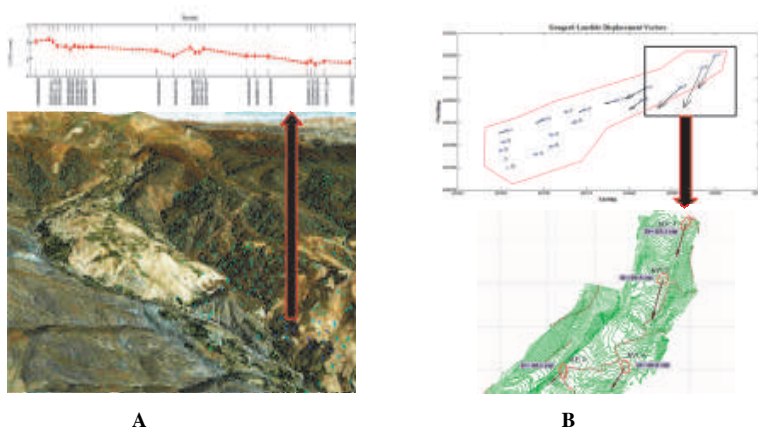


Fig. 5: (A) A sample time-series of displacement during 2003-2009 in the LOS direction for a pixel on the toe of the Gougerd landslide. (B) Graphical view of displacements between 2 epochs of GPS measurements at monitoring stations.

3.2 Sarcheshmeh slope

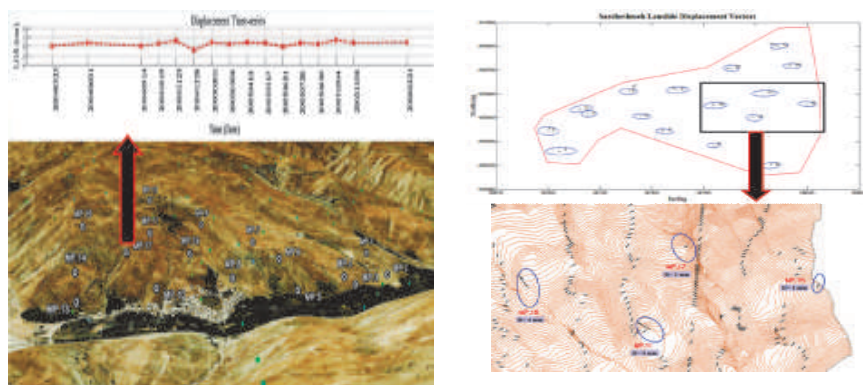
For the Sarcheshmeh landslide, the results of InSAR techniques show the stability of the slope in this time period. Fig. 6A illustrates a sample of displacement time-series for a selected pixel on the slope, which has a very flat and smooth trend. Slight fluctuations of the

time-series diagram are also unavoidable because of the residual tropospheric error. This selected PS in Fig. 6A is close to the GPS station MP.17.

Three epochs of repeated GPS observations also show the stability of the slope at the present time. GPS horizontal displacement vectors for most of the stations do not show significant displacements at 95% confidence interval (Table 2 and Fig. 6B). The only exceptions are stations MP.5 and MP.13, showing motion between epochs 1 and 2 and station MP.14, showing movement between epochs 2 and 3. However, field visit of the landslide site proved that detected movements on these stations were caused by human interference for agricultural activity in the area.

Table 2: Numerical displacement result for GPS monitoring points of Sarcheshmeh landslide

Monitoring Point ID	Displacement Epoch 1-2 (cm)	Standard error Epoch 1-2 (cm)	Horizontal Status	Displacement Epoch 2-3 (cm)	Standard error Epoch 2-3 (cm)	Horizontal Status
MP.1	0.5	0.5	Stable	0.3	0.5	Stable
MP.2	0.6	0.6	Stable	0.5	0.7	Stable
MP.3	0.4	0.4	Stable	0.3	1.6	Stable
MP.4	0.4	0.5	Stable	0.2	0.7	Stable
MP.5	1.3	0.2	Moved	0.5	0.5	Stable
MP.6	0.4	0.4	Stable	0.0	0.4	Stable
MP.7	0.5	0.5	Stable	0.4	0.7	Stable
MP.8	0.7	0.7	Stable	0.5	0.5	Stable
MP.9	0.4	0.5	Stable	0.5	1.1	Stable
MP.10	0.7	0.7	Stable	0.4	0.4	Stable
MP.11	0.3	0.4	Stable	0.2	0.3	Stable
MP.12	0.4	0.4	Stable	0.3	0.5	Stable
MP.13	1.1	0.4	Moved	0.5	0.5	Stable
MP.14	0.4	0.4	Stable	14.2	0.3	Moved
MP.15	0.3	0.4	Stable	0.2	0.9	Stable
MP.16	0.5	0.5	Stable	0.3	0.5	Stable
MP.17	0.1	0.3	Stable	0.4	0.5	Stable



A

B

Fig. 6: (A) A sample time-series of displacement during 2004-2006 in LOS direction for a pixel on Sarcheshmeh landslide. (B) Graphical view of displacements between epochs 1 and 2 for GPS monitoring points of Sarcheshmeh landslide.

4 CONCLUSION

An integration of GPS and InSAR data were used to investigate two landslides in Iran. Both GPS and InSAR results are corroborated with each other. They prove the current stability of Sarcheshmeh landslide in northeastern Iran while demonstrating surface deformation associated with the Gougerd landslide in northwestern Iran. Such monitoring studies provide important insights for mitigation efforts and efficient hazard assessment for landslide-prone areas.

5 REFERENCES

- DZURISIN, D., 2007: VOLCANO DEFORMATION: Geodetic Monitoring Techniques. *Journal of Springer*, 441 p.
- GEORG GASSNER, ANDREAS WIESER & FRITZ K. BRUNNER, 2002: GPS Software Development For Monitoring of Landslide. *Proc. FIG XXII, Deformation Measurement and Analysis II, Congress Washington, D.C. pp. 12.*
- FARR, T.G. & M. KOBRICK, 2000: Shuttle Radar Topography Mission produces a wealth of data. *Amer. Geophys. Union Eos*, v. 81, p. 583-585.
- JOSEP A. GILI, JORDI COROMINAS & JOAN RIUS, 2000: Using Global Positioning System Techniques In Landslide Monitoring. *Journal of Engineering Geology 55 (2000) 167-192, Barcelona, Sepanyol.*
- WAN AZIZ W.A. & KHAMARRUL A.R., 2009: An appropriate GPS technology for landslide monitoring at east-west highway, Perak, Malaysia. *Faculty of Geoinformation Science & Engineering University Technology Malaysia, Skudai 81310, Johore.*

Einsatzmöglichkeiten der Fernerkundung für struktur- und ingenieurgeologische Fragestellungen in gering aufgeschlossenen Kristallingebieten (Süd-Schwarzwald)

HANS JOACHIM FRANZKE¹, HANS-ULRICH WETZEL² & MICHAEL KNIEPER³

Zusammenfassung: Mit LIDAR-Höhenmodellen steht für die tektonische Bruchanalyse eine vorzügliche Datenbasis zur Verfügung, mit der auch in schlecht aufgeschlossenen Gebieten (Einebnungsflächen mit oder ohne Lockergesteinsbedeckung) wichtige Erkenntnisse zur Bruchstrukturierung gewonnen werden können. Anhand einer Hochflächensituation im kristallinen Grundgebirge des Schwarzwalds (Vorberg-Scholle) wird gezeigt, wie sich in benachbarten Tälern aufgeschlossene Störungszonen in die aufschlussfreien Bereiche der Hochflächen weiter verfolgen lassen. Auf diese Weise lassen sich geologische Voraussetzungen für spätere, sehr kosten- und zeitaufwändige geologische Erkundungsarbeiten schaffen (Schürfe, Bohrungen, Geophysik).

1 Problemstellung

Im südlichen Schwarzwald bestehen gute geographische Voraussetzungen für die Errichtung von umweltfreundlichen Pumpspeicherwerken. Zur Vorbereitung eines Großprojekts (Pumpspeicherwerk Atdorf/Schluchseewerk A G) wurden umfangreiche geologisch-strukturelle, ingenieurgeologische und hydrogeologische Vorarbeiten durchgeführt. Ein Problem ist es, dass im Südschwarzwald die lange Hebungs- und Abtragungsgeschichte (100-120 Ma) größere aufschlussarme Verebnungsflächen geschaffen hat, die außerdem noch durch junge Sedimente aus den quartären Kaltzeiten (Verwitterungsschutt, Fließerden, Moränenbildungen, Schmelzwasserablagerungen) bedeckt sind. Aufschlüsse der im Untergrund anstehenden Gneise, Granite, Gangmagmatite und Scherzonen des Kristallins des Südschwarzwalds sind deshalb nur in einzelnen, den Verebnungsflächen aufsitzenden Felshärtlingen und in den randlich in die Hochflächen eingreifenden Tälern (Hochrhein, Wehra, Alb, Murg) zu finden. Für ingenieurgeologische Aussagen ist dies eine sehr ungünstige Situation, der mit der zeit- und kostenaufwendigen Beschaffung von künstlichen Aufschlüssen (Geophysik, Schürfe, Bohrungen) abgeholfen werden muss. Um diese Arbeitsstufe vorzubereiten und möglichst aussagekräftige Ansatzpunkte hierfür zu schaffen, sind vorgeschaltete Fernerkundungsarbeiten eine relativ billige und effektive Methode, welche die Ergebnisse der traditionellen geologischen Kartierung absichern und ergänzen kann. Wegen der bis zu einigen Zehnermeter mächtigen Lockergesteinsbedeckung kann die geologische Kartierung nur generelle Aussagen zur Gesteinsverbreitung und zur Strukturierung des Gebiets unterhalb der Schotterdecken liefern.

1) Dr. Hans Joachim Franzke, Hirschler Weg 11, D-38678 Clausthal-Zellerfeld,
E-Mail: franzke.cz@googlemail.com

2) Dr. Hans-Ulrich Wetzel, Deutsches Geoforschungszentrum, Telegrafenberg A 17, D-14473 Potsdam;
E-Mail: wetz@gfz-potsdam.de

3) Dipl.-Geol. Michael Knieper, Schluchseewerk AG, Säckinger. Str. 67 D-79725 Laufenburg;
E-Mail: knieper.michael@schluchseewerk.de

Da die geplanten Staubauwerke und Tunnelaufführungen vor allem auf die großen ruptil verformten Störungszone des Gebiets Rücksicht nehmen müssen, ist die Verfolgung von Störungszone aus den hinlänglich aufgeschlossenen Tallagen in die von jungen Sedimenten überdeckten Hochflächen eine wichtige, dringend zu lösende Fragestellung.

2 Geologisches Umfeld

Das zu untersuchende Gebiet für das geplante Pumpspeicherwerk Atdorf (PSW Atdorf) befindet sich am Südrand des kristallinen Schwarzwalds (Abb. 1).

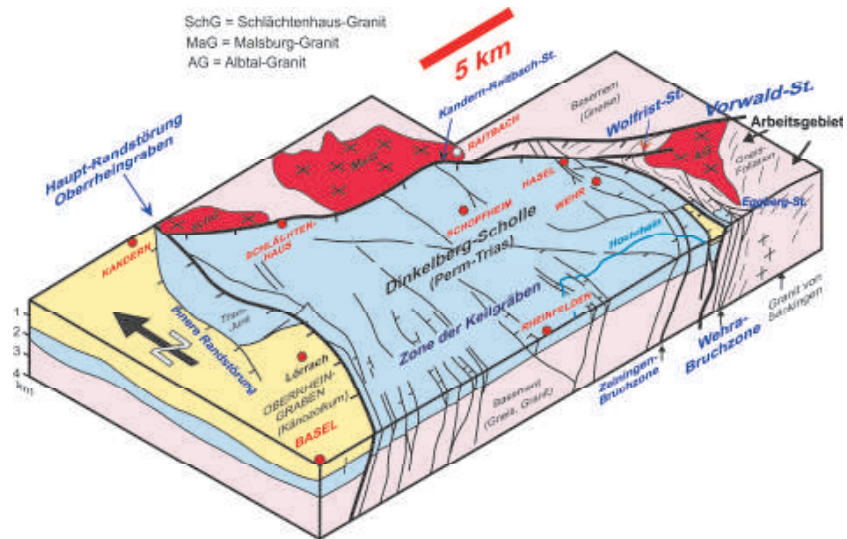


Abb. 1: Blockbild zur Charakterisierung der strukturellen Situation im Umfeld des PSW Atdorf. SchG-Schlächtenhaus-Granit, MaG-Malsburg-Granit, AG-Albtal-Granit. Das Arbeitsgebiet befindet sich östlich der Wehra-Bruchzone (N-S) in der jungen Hebungzone des kristallinen Grundgebirges des Südschwarzwalds (Vorberg-Zone). Der im Känozoikum entlang von Rahmenstörungen eingesenkte westlich angrenzende Dinkelberg-Block enthält noch große Teile der ehemals auch den Schwarzwald überlagernden Deckgebirgsauflagerung. Der seit dem mittleren Eozän (ca. 45 Ma) eingebrochene Oberrheingraben enthält außerdem mehr als 2 km mächtige känozoische Sedimente (Eozän-Quartär).

Alle geplanten unter- und übertägigen Bauwerke stehen nahezu vollständig in Gesteinsserien des variszischen Kristallinen Basements. Eine Ausnahme bilden der Hauptabschlussdamm des Unterbeckens im Haselbach-Tal nördlich von Bad Säckingen, der teilweise in flach lagernden Sedimenten des Oberrotliegend aufsitzt, die von N-S streichenden variszischen Gneisen des Murgtal-Komplexes des Südschwarzwalds unterlagert werden.

In Abb. 2 ist die geologische Entwicklung für den Bereich des Südschwarzwalds zusammengefasst. Die Paragneise des Südschwarzwälder Gneiskomplexes (Murgtal- und Wiese-Wehra-Komplex, Ordovizium bis Silur) werden von zahlreichen Granitintrusionen unterschiedlichster Form und Größe durchdrungen, welche in der variszischen extensionalen Inversionsphase am Ende des Unterkarbons (334-332 Ma) in die Mittel- und Oberkruste aufgestiegen sind (METZ 1980, ECHTLER & CHAUVET 1992, HINCKE 2010). Die großen Schmelzvolumina verursachten im Unterkarbon eine erhebliche thermische Überprägung der Gneise (HT-LP-Metamorphose, 335-330 Ma). Die Gneise zeigen deshalb verbreitet anatektische bis diatektische Überprägungen, so dass die Gneisgefüge durch Um- und Rekristallisation erheblich verändert sind und die Gneise sich stofflich und in ihrem geomechanischen Verhalten den umgebenden Graniten angenähert haben. Das kristalline Basement des südlichen Schwarzwalds wurde im Oberkarbon-Unterperm tief abgetragen und danach nur noch von relativ geringmächtigen Sedimenten des Deckgebirges (Trias Jura) bedeckt, welche aber durch die intensivierte Hebung im Laufe des Känozoikums bis auf kleine Reste (Oberrotliegend, oberer Buntsandstein) wieder erodiert wurden. Das hat dazu geführt, dass die permische Landoberfläche der heutigen nahezu entspricht (Abb. 2). Im Gegensatz dazu sind im abgesunkenen Block des westlich benachbarten Dinkelbergs die Sedimente des Deckgebirges erhalten, ebenso im südlich anschließenden Tafel- und Faltenjura/Schweiz.

3 Ergebnisse der fernerkundlichen Untersuchungen

Das geowissenschaftlich komplex untersuchte Gebiet wurde anhand von gängigen Fernerkundungsdaten (TM, SPOT, ASTER, SRTM, JERS) vor allem auf die Existenz und den konkreten Verlauf von größeren Bruchstrukturen hin untersucht. Durch die Verknüpfung der Ergebnisse der Fernerkundung mit den verfügbaren geologischen Karten konnte eine präzisierte Übersichtskarte zu den Bruchstrukturen im Maßstab 1:10.000 angelegt werden, die neben weiteren darin enthaltenen geologischen Informationen (Gesteinsverteilung, Lagerungsverhältnisse) die Grundlage für die Planung weiterer Erkundungsarbeiten ist.

Diese Arbeiten ergaben wichtige Ergebnisse zur regionalen Bruchzerteilung des Gebiets, die vorangegangene Untersuchungen im südlich angrenzenden Schweizer Jura (FRANZKE et al. 2011) ergänzen. Regional angelegte Bruchuntersuchungen anhand von Fernerkundungsdaten können jedoch für die detaillierte Planung von aufwändigen und kostenintensiven Erkundungen im Allgemeinen keine ausreichend präzisen Ansatzpunkte liefern, z. B. für den geologisch begründeten Ansatz von Schürfen und Bohrungen. Ein Beispiel für eine der durchgeführten regionalen Bruchauswertungen wird in Abb. 3 anhand eines ASTER-Höhenmodells präsentiert. Aufbauend auf der regionalen Analyse, ein Beispiel siehe Abb. 3, wurde mit den in Baden-Württemberg zur Verfügung stehenden flugzeuggestützten Laser-Scanning-Daten (LIDAR) und daraus generierten Geländemodellen versucht, den Verlauf von Bruchstrukturen mit Hilfe von morphologischen Feinanalysen (Relief plus Drainage) detaillierter festzulegen. Darüber wird im Folgenden weiter berichtet.

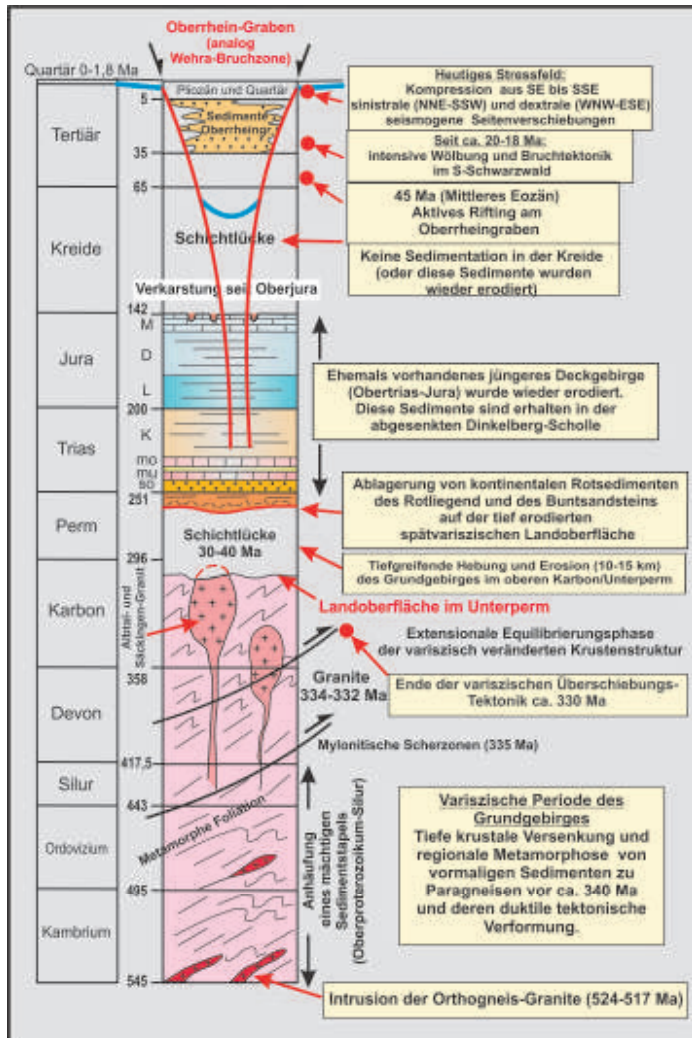


Abb. 2: Geologische Entwicklung im Bereich der Vorwaldscholle des Südschwarzwalds, vereinfacht. Die Bruchentwicklung der heutigen Störungszonen begann in der späten variszischen Ära nach Abschluss der Granitintrusionen (ab ca. 325 Ma).

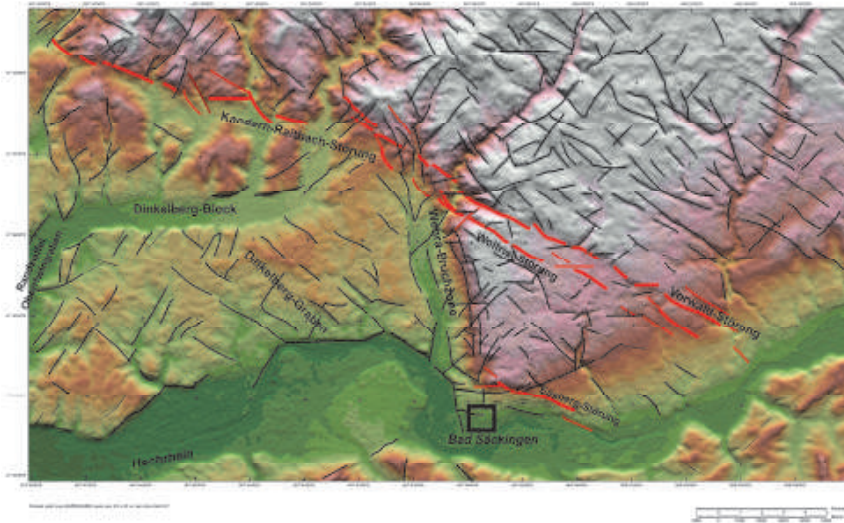


Abb. 3: Bruch-Interpretation eines ASTER-Höhenmodells vom Arbeitsgebiet nördlich von Bad Säckingen (Südschwarzwald). Die wesentlichen regionalen Bruchzonen sind hervorgehoben. Das Interessengebiet liegt zwischen der Eggberg-Störung im SW und der Vorwald-Störung im NE. Die amtlichen geologischen Karten verzeichnen für diesen Raum wegen der mächtigen Lockergesteinsbedeckung fast keine Bruchstörungen.

Die angewendete Methodik der morphologischen Analyse basiert auf der Erkenntnis, dass durch die stattgefundenen Bruchverformungen die dabei entstandenen Störungen weniger verwitterungsresistent sind als ihre Rahmengesteine und sich in den Details der Reliefprägung als linear gestreckte morphologische Senken wiederfinden lassen. Dies gilt nicht nur für ihren Verlauf, sondern auch für weitere Störungsparameter, denn durch die Beachtung der Asymmetrie der bei der Erosion geschaffenen Talformen ergeben sich auch Hinweise auf Einfallrichtung. Die Breite der geschaffenen Hohlformen ergibt Hinweise zur Mächtigkeit, Verzweigungen (Aufspaltungen von Störungen) sind morphologisch ebenfalls nachvollziehbar (Abb. 4). In den Bereichen, wo innerhalb der Lineationszonen (Störungen) verwitterungsresistente Gesteine vorkommen, es können dies magmatische Gänge oder Mineralgänge sein, treten auch wall- bis mauerartige Härtlingszüge innerhalb der Lineationszonen auf. Diese führen im Allgemeinen ausreichend Aufschlüsse an der Erdoberfläche, so dass diese Gesteine auch mit den gängigen geologischen Arbeitsmethoden untersucht und kartiermäßig verfolgt werden können. Im Gegensatz dazu sind die ausgeräumten Lineationszonen sehr arm oder vollständig frei an geologisch verwertbaren Aufschlüssen. Wegen der erfolgten Gesteinskataklase und der dabei geschaffenen erhöhten Porosität der entstandenen Störungsgesteine (Kataklasite im weiteren Sinne) sind diese aber gute Wasserspeicher und Wasserleiter. In den Fällen, wo durch intensive

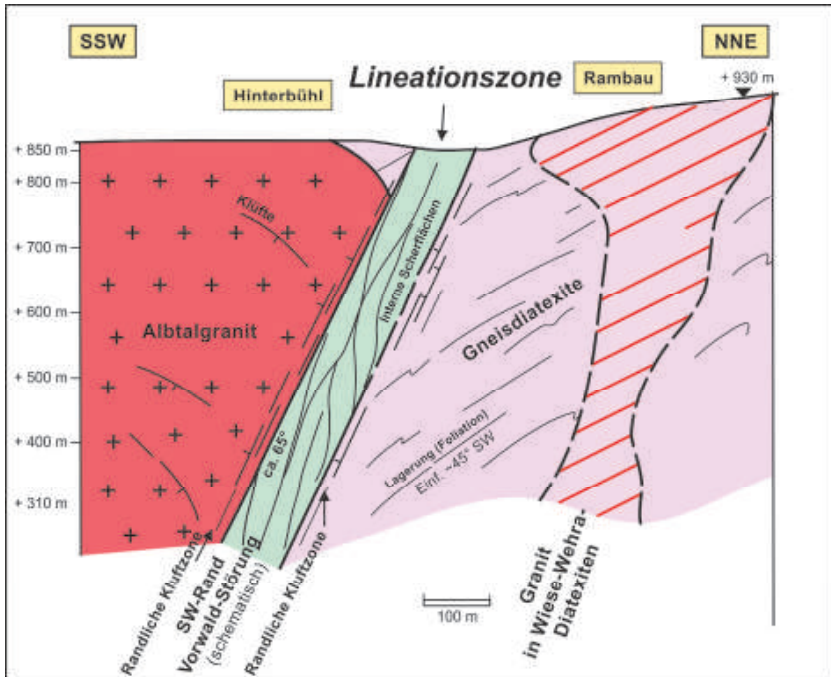


Abb. 4: Querprofil durch eine störungsbedingte breite Lineationszone (Vorwald-Störung). Sie bildet eine im Streichen (WNW-ESE) linear gestreckte flache Geländesenke. Die Breite der ausgeräumten Zone gibt einen Hinweis auf die Mächtigkeit des bruchtektonisch überprägten Bereichs. Eine Talasymmetrie ist nur vage angedeutet. Östlicher Ortsrand der Gemeinde Strick, Südschwarzwald. Das innere Gefüge ist aus der Bearbeitung von Störungsaufschlüssen im Wehra-Tal übernommen.

Bereichen, wo innerhalb der Lineationszonen (Störungen) verwitterungsresistente Gesteine vorkommen, es können dies magmatische Gänge oder Mineralgänge sein, treten auch wall- bis mauerartige Härtlingszüge innerhalb der Lineationszonen auf. Diese führen im Allgemeinen ausreichend Aufschlüsse an der Erdoberfläche, so dass diese Gesteine auch mit den gängigen geologischen Arbeitsmethoden untersucht und kartiermäßig verfolgt werden können. Im Gegensatz dazu sind die ausgeräumten Lineationszonen sehr arm oder vollständig frei an geologisch verwertbaren Aufschlüssen. Wegen der erfolgten Gesteinskataklase und der dabei geschaffenen erhöhten Porosität der entstandenen Störungsgesteine (Kataklasite im weiteren Sinne) sind diese aber gute Wasserspeicher und Wasserleiter. In den Fällen, wo durch intensive oder mehrphasige Scherprozesse sehr feinkörnige Störungsgesteine (lettenartige Mikrokataklasite) entstanden, können Störungen auch als Wasserstauer wirken, wobei sie aufgrund ihres zumeist steilen Einfallens laterale Migrationsbarrieren mit ausbilden können.

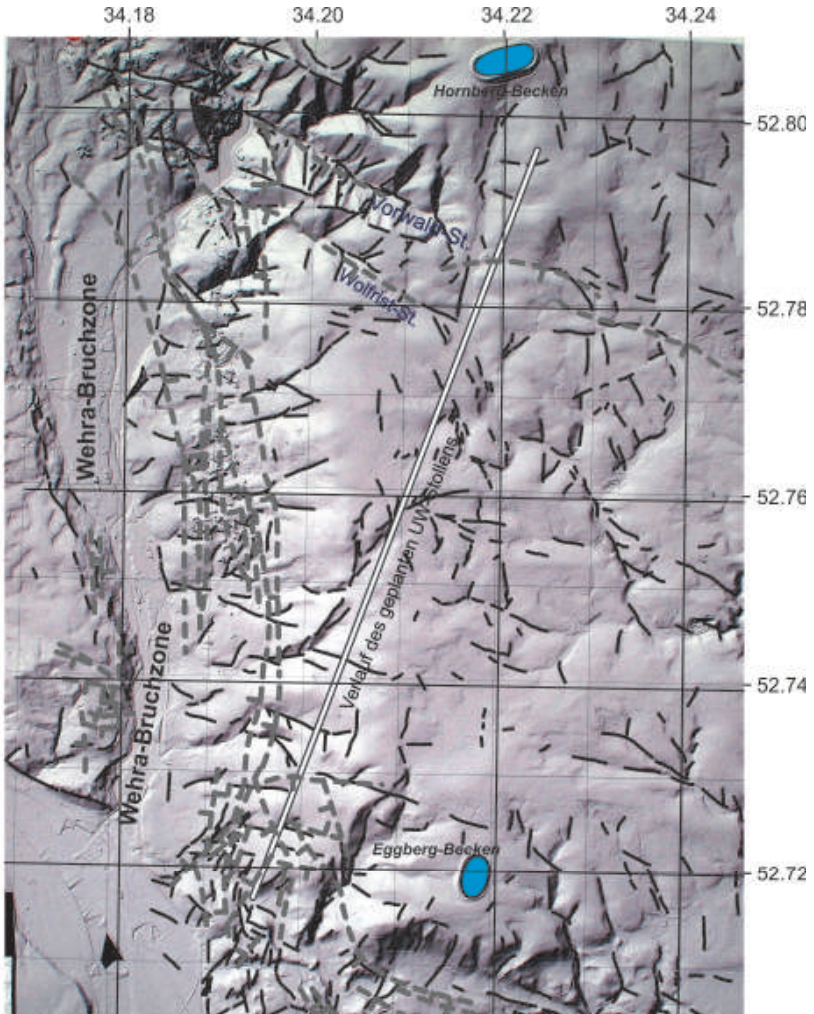


Abb. 5: LIDAR-Interpretation des SW-Schwarzwalds (Vorberg-Scholle) nördlich von Bad Säckingen am Hochrhein/Baden-Württemberg. Die eingetragene geplante Achse des Unterwasserstollens zeigt den Kernbereich des geologischen Untersuchungsfeldes. Gestrichelt: Störungen aus geologischen Karten, schwarze Linien: LIDAR-Elemente. Beleuchtung: von West, Pixelgröße: 1x1m.

Durch die morphologische Analyse der LIDAR-Höhenmodelle konnten die Verläufe und Zusammenhänge der großen NW-SE-Störungszonen (Vorwald-, Wolfrist- und Eggberg-Störung) sowie der ebenso wichtigen N-S-Bruchzonen (Wehra-Bruchzone und ihrer zahlreichen subordinierten Begleitstrukturen) nahezu durchgängig belegt werden. Durch die Verknüpfung mit den vorhandenen geowissenschaftlichen Informationen können präzisierte Angaben zu den streichenden Längen von Störungen, der Breite ihrer Einfluss-Zonen (Breite der Lineationszonen) und zum inneren Gefüge der Störungen gemacht werden (Abb. 4). Es zeigte sich, dass die großen Störungszonen des Gebiets streifenartige Zonen von bis über 100 m Breite darstellen, von denen zahlreiche Äste abzweigen und die auch von querenden Bruchzonen häufig durchsetzt werden. Zu den WNW-ESE- und N-S-Hauptstrukturen existieren zahlreiche Parallelstörungen niederer Ordnung, so dass in der Realität ein sehr komplexes Störungsgitter existiert, was im Bereich der Hochfläche südlich der Vorwald-Störung mit der traditionellen geologischen Kartierung bisher nur andeutungsweise erfasst werden konnte.

Probleme ergaben sich bereichsweise dadurch, dass die Geländesenken der ausgeräumten Störungszonen in den quartären Kaltzeiten durch Fließerden infolge von Bodenfließen, besonders an Hanglagen, teilweise wieder aufgefüllt und damit maskiert wurden. Dies kann aber im Gelände an wulstartigen flachen Reliefformen erkannt und bei der Interpretation der konkreten Situation berücksichtigt werden.

In Abb. 5 ist eine LIDAR-Interpretation des Arbeitsgebiets dargestellt. Die aus den verfügbaren geologischen Karten übernommenen Störungen (gestrichelt) sind fast gänzlich auf die relativ gut aufgeschlossenen randlich die Hochfläche begrenzenden Tallagen beschränkt. Im Bereich der zentralen, wenig gegliederten Gneis- und Granit-Hochfläche sind fast keine Störungen kartiert. Durch die LIDAR-Auswertung ergaben sich Hinweise auf die Fortsetzung der großen bekannten Bruchstrukturen dieses Gebiets und weiterer subordinierter Strukturen. Deren detaillierte Erkundung erfordert den Einsatz von aufwändigen technischen Untersuchungen (Schürfe, Bohrungen) und ergänzender geophysikalischer Sondierungen.

4 Literatur

- ECHTLER, H. & CHAUVET, A., 1992: Carboniferous convergence and subsequent crustal extension in the southern Schwarzwald (SW-Germany).- *Geodynamica Acta*: 1285-1301; Paris.
- FRANZKE, H. J., WETZEL, H.-U. & MADRITSCH, H., 2010: Verknüpfung von struktur-geologischer Fernerkundung mit Geländeaufnahmen im Grenzbereich zwischen Oberrheingraben, Südschwarzwald und Faltenjura. - DGPF Tagungsband 20/2010.
- HINCKE, E., 2010: Deformierte Granite im Südschwarzwald als Indikatoren lokaler variszischer Deformationszonen.- Dissert. Univ. Hamburg, 132 S., PDF-File; Hamburg.
- METZ, R., 1980: Geologische Landeskunde des Hotzenwalds.- 1116 S., Verlag Moritz Schauenburg; Lahr/Schwarzwald.

Time-series analysis of interseismic deformation across the Ganos segment of the North Anatolian Fault (NAF) zone, Turkey, from ERS and Envisat PS-InSAR

MAHMUD HAGHSHENAS¹, MAHDI MOTAGH & MOHAMMAD-ALI SHARIFI

Abstract: In this study, we used time-series analysis of ERS and Envisat SAR data to measure interseismic strain accumulation across the Ganos segment of the North Anatolian Fault (NAF) zone in Turkey. This region is vegetated and has relatively rough topography, hampering the application of classical C-band interferometry for interseismic studies. We applied the advanced processing method of Persistent Scatterer Interferometry (PS-InSAR) to overcome these problems and achieved a good retrieval of spatio-temporal coverage of interseismic displacement field. The elastic half-space modeling of fault deformation parameters using SAR data between 1992 and 2001 indicates 11-13 km locking depth and 26-28 mm/year right-lateral slip rate. Using data between 2004-2007 shows 11-17 km locking depth and 21-27 mm/year slip rate in 95% confidence interval.

1 Introduction

North Anatolian fault is one of the most active continental strike-slip faults in the world, and the Ganos segment is the westernmost part of this fault between the Marmara Sea and the Gulf of Saros (Fig. 1). This segment was last ruptured in 1912 with a large Ms 7.4 earthquake. Previous space and ground-based geodetic studies show a zone of high strain rate across the fault, a few kilometers wide, consistent with right-lateral slip on Ganos fault (MOTAGH et al. 2007). Several studies have already been done on different segments of NAF to infer its current slip rate and locking depth from SAR interferometry observations. WRIGHT et al. (2001) used a stack of 12 interferograms made from ERS data across the eastern end of NAF, inverted the results and inferred a long-term slip-rate of about 22 mm/year beneath a 14 km elastic lid. WALTERS et al. (2011) did a similar analysis using both ascending and descending data acquired by the Envisat satellite to infer a long-term slip rate of 20-26 mm/year and locking depth of 13.5-25 km. MOTAGH et al. (2007) used ERS1/ERS2 images over the western part of the NAF (Ganos Fault) and applied the traditional SAR-amplitude based Persistent Scatterer Interferometry (PS-InSAR) method to map interseismic deformation across the Ganos fault. In spite of steep topography and vegetation coverage, the method proved to work relatively well, although it suffered from relatively low-spatial density of permanent scatterers as compared to the density observed in similar studies in urban areas. Their results indicate a long-term slip rate of 18-24 mm/year and locking depth of 8-17 km.

¹ Master student, Department of Surveying and Geomatics Engineering, University of Tehran, Iran, e-mail: m.haghshenas@ut.ac.ir

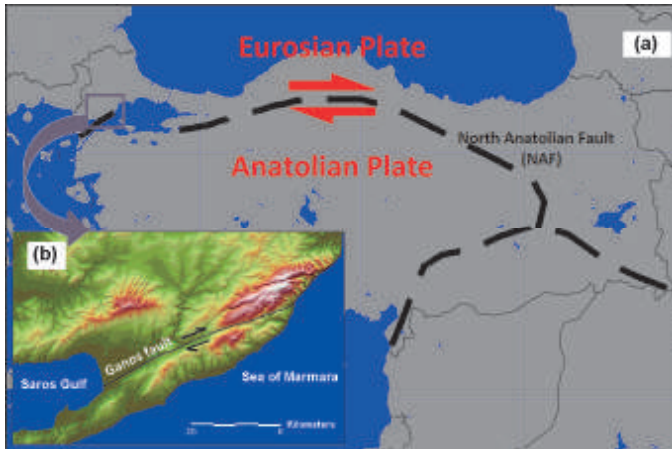


Fig. 1: Location of Ganos segment in western most part of North Anatolian Fault. In (a), Dashed line is the fault and solid lines are countries's boundary. In (b) Hill shade map of the study. Solid line is Ganos segment of North Anatolian Fault.

In this study, we extend the study of MOTAGH et al. (2007), use all ERS1/ERS2 and Envisat images acquired in this region (39 ERS1/ERS2 and 17 Envisat) during 1992-2010, and the apply the advanced PS technique of StaMPS (HOOPER et al. 2007) to retrieve the spatio-temporal coverage of interseismic displacement field at Ganos fault.

2 Persistent Scatterer Analysis

In contrast to traditional PS techniques, which use amplitude statistics to identify coherent scatterers, the PS technique of StaMPS exploits phase stability as a criterion for coherent scatterer selection. More details about StaMPS can be found in (HOOPER, 2006). In this study we applied the StaMPS method of PSI analysis on both ERS and Envisat datasets to detect coherent scatterers in the mountainous and vegetated area of the Ganos fault. 3-dimensional phase unwrapping is then applied on detected PS pixels to derive interseismic velocity in line-of-sight direction from ground to the satellite. Assuming the fault motion is dominated by horizontal transform deformation, we converted the LOS velocities to the fault parallel velocities. Fig. 2 shows fault parallel velocities obtained from ERS and Envisat SAR data, overlaid on a Landsat TM image. Average velocities show relative motion of earth surface on either side of the fault that is low along the fault trace and gradually increases by distance from the fault.

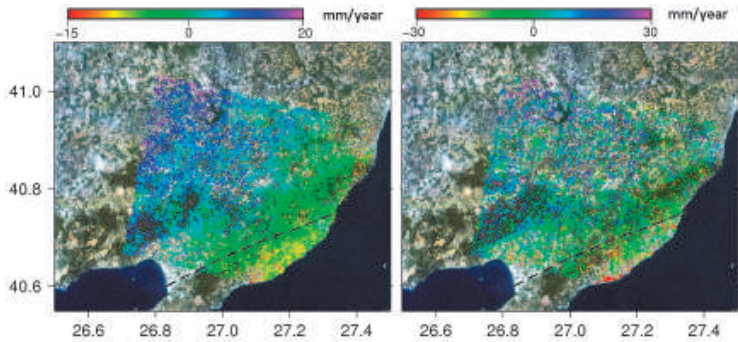


Fig. 2: Average parallel to fault velocities per year overlaid on a Landsat TM true color composite. (a) Between 1992 and 2001 acquired from ERS1/ERS2 dataset. (b) Between and 2004 to 2007 acquired from Envisat dataset. Dashed lines represent Ganos segment of North Anatolian Fault.

Average velocities derived from both ERS and Envisat SAR datasets show positive and negative motion in the northern and southern branches of Ganos fault, respectively, which is consistent with right-lateral strike-slip motion on this fault. Detected persistent pixels in both datasets are homogenous and have a reasonable spatial density. In comparison to the traditional PS-InSAR method applied by MOTAGH et al. (2007), which is shown in Fig. 3, the PS technique of StaMPS is able to resolve more pixels for deformation analysis in this mountainous and vegetated environment. As seen in Fig. 3, the traditional PS-InSAR result has a dense coverage on some urban areas like Şarköy village on the north coast of the Marmara Sea, but provides only a sparse network of PS pixels around the fault.

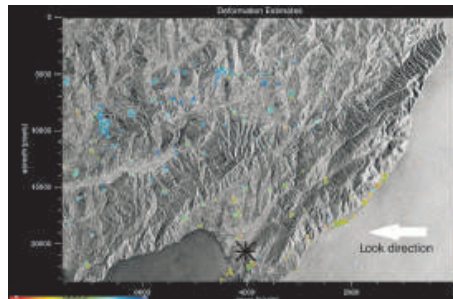


Fig. 3: Estimated line-of-sight (LOS) displacement rates between 1992 and 2000 acquired from ERS dataset using traditional PS-InSAR method. Picture from MOTAGH et al. (2007)

3 FAULT MODELING

The elastic interseismic dislocation model of SAVAGE & BURFORD (1973) is the most widely used model for deformation analysis of a transform fault during an interseismic period. In this model, we assume that the upper part of the fault is locked from the surface down to depth H , but below this depth, two blocks slip freely with a relative amount v_0 (Fig. 4). During the interseismic period slip rate is zero on the earth surface along the fault, but increases with distance normal to the fault and reaches to v_0 at long distances from the fault. This model is mathematically expressed as:

$$v(x) = (v_0 / \delta) \tan^{-1}(x / H)$$

where $v(x)$ is the velocity of a point in perpendicular distance x to the fault, v_0 is the far-field velocity and H is the locking depth.

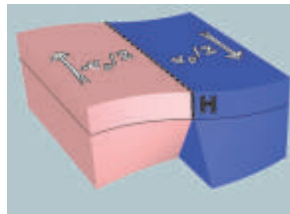


Fig. 4: Elastic half-space model. The fault is locked down to depth H . Below this depth two plate slip freely.

A velocity profile perpendicular to the surface track of the Ganos fault, which is shown in Fig. 5, represents an arc-tangential behavior that adheres to elastic model for interseismic deformation. We extracted interseismic model parameters from the perpendicular profiles provided by ERS and Envisat PS-InSAR results using a nonlinear least-squares inversion (NOCEDAL & WRIGHT 2006). The best-fit model is selected based on mean square misfit between observations and the model predictions defined as:

$$MSE = \frac{1}{n-2} \sum_{i=1}^n \left(\frac{y_i - g(x_i, H, v_0)}{\sigma_i} \right)^2$$

where n is the number of data, σ_i is the standard deviation of observation, y_i is the observation point and g is the model prediction at a given point x_i . Before the inversion, we smoothed the observations using a moving average filter to improve signal to noise ratio of the profiles. The smoothed profiles for ERS and Envisat data are then inverted using a nonlinear least-squares

optimization. The best-fit interseismic model for the ERS data resulted in a locking depth of 12.6 km and a far-field velocity of 27 mm/year. The locking depth and velocity obtained from the inversion of Envisat data are 13.9 km and 24 mm/year, respectively (Fig. 5).

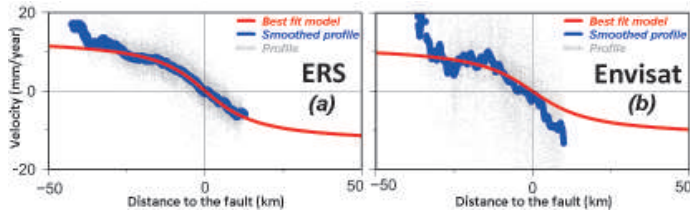


Fig. 5: Velocity profile perpendicular to Ganos fault and best-fit models (a) For ERS dataset between 1992 and 2001 and (b) for Envisat dataset between 2004 to 2007. Gray dots represent the profile perpendicular to Ganos fault; blue dots are smoothed profiles, and red lines are the best-fit interseismic models to the smoothed profiles.

To test the reliability of the best-fitted models, a bootstrap analysis with 2000 replications was done and confidence intervals for interseismic model parameters were obtained. The results are shown in Fig. 6.

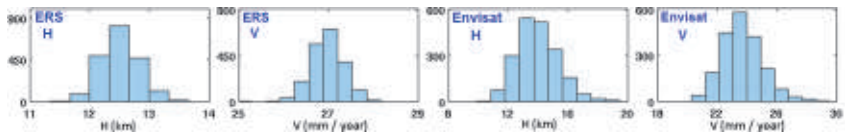


Fig. 6: confidence intervals derived from bootstrap analysis of parameters of the best-fit model.

4 CONCLUSION

In spite of vegetation coverage and relatively rough topography in the Ganos fault, the use of Persistent Scatterer technique of StaMPS has resulted in a good retrieval of spatio-temporal coverage of interseismic displacement field in this area. The elastic half-space modeling of strain accumulation across the fault using deformation rates obtained by ERS1/ERS2 data between 1992 and 2001 indicates 11-13 km locking depth and 26-28 mm/year right-lateral slip rate with 95% confidence interval. Using Envisat data between 2004-2007 shows 11-17 km locking depth and 21-27 mm/year slip rate in 95% confidence interval. The resultant parameters agree with previously geodetic and geological studies along the North Anatolian Fault (WRIGHT et al. 2001, MOTAGH et al. 2007, WALTERS et al. 2011).

5 References

- HOOPER, A., SEGALL, P. & ZEBKER, H., 2007: Persistent scatterer interferometric synthetic aperture radar for crustal deformation analysis, with application to Volcán Alcedo, Galápagos. *Journal of Geophysical Research*, 112, p.21 PP.
- KAMPES, B., HANSEN, R. & PERSKI, Z., 2003: Radar interferometry with public domain tools. In *Proceedings of FRINGE*. pp. 1–5.
- MOTAGH, M. et al., 2007: Strain accumulation across the Gazikoy-Saros segment of the North Anatolian Fault inferred from Persistent Scatterer Interferometry and GPS measurements. *Earth and Planetary Science Letters*, 255(3-4), pp.432–444.
- NOCEDAL, J. & WRIGHT, S., 2006: *Numerical Optimization*, Series in Operations Research and Financial Engineering, Springer, New York.
- SAVAGE, J.C. & BURFORD, R.O., 1973: Geodetic Determination of Relative Plate Motion in Central California. *Journal of Geophysical Research*, 78(5), pp.PP. 832-845.
- WALTERS, R.J. et al., 2011: Interseismic strain accumulation across the North Anatolian Fault from Envisat InSAR measurements. *Geophysical Research Letters*, 38, p.5 PP.
- WRIGHT, T., PARSONS, B. & FIELDING, E., 2001: Measurement of interseismic strain accumulation across the North Anatolian Fault by satellite radar interferometry. *Geophys. Res. Lett.*, 28(10), pp.2117–2120.

TerraSAR-X time series analysis of surface uplift in Staufen, South-West Germany

CHRISTIN LUBITZ¹, MAHDI MOTAGH², HANS-ULRICH WETZEL³, JAN ANDERSSOHN⁴,
INGO SASS⁵ & HERMANN KAUFMANN⁶

Zusammenfassung: Die Stadt Staufen im Breisgau im Schwarzwald sieht sich in den letzten Jahren Hebungserscheinungen von mehreren cm/Jahr und beachtenswerten Schäden an mehr als 260 Gebäuden ausgesetzt. Geologische und geophysikalische Untersuchungen schreiben die Ursache hydro-geologischen und hydro-chemischen Prozessen zu, die als Anhydrit-Quellen bezeichnet werden. Diese wurden ausgelöst durch Bohrungsaktivitäten für die geothermische Beheizung des Rathauses. Hochauflösende Fernerkundungsmethoden wie die SAR-Interferometrie (InSAR) können detaillierte Auskunft über die räumliche Verteilung und zeitliche Veränderung des Hebungsmusters geben. Dazu werden die InSAR-Methoden Persistent Scatterer (PS) und Small Baseline Subsets (SBAS) auf 53 TerraSAR-X StripMap-Bilder (Juli 2008 – Mai 2011) angewandt. Das elliptische Hebungsmuster im Stadtzentrum weist eine SW-NE-Orientierung auf mit etwa 300m Hauptachse und 250m Nebenachse. In Sensor-Blickrichtung treten Deformationen von mehr als 3cm/Jahr im Randbereich und bis zu 11cm/Jahr im Kerngebiet auf. Die maximale kumulative Hebung beträgt etwa 32cm.

1 Introduction

Against the background of rising CO₂ emissions through fossil fuel combustion, the environmentally friendly renewable geothermal energy supply and heat management became an alternative technology in recent years. Contrary to other ecological energy sources as wind or solar power, it is independent of the time of day, seasons and weather.

In the city of Staufen im Breisgau in south-west Germany (hereafter called Staufen) the decision was made to use shallow geothermal energy for the heating and cooling of the two city hall buildings after their renovation in 2006/2007. After assessment through the authorities and conferring of permission for the drilling up to a depth of 140m, seven heat exchanger boreholes were drilled in September 2007 (SASS, I. & BURBAUM, U., 2010). At the end of the year, the first hairline cracks appeared in the city hall and surrounding buildings. The damage developed to an uplift phenomenon within the historical city center with severe consequences.

1) Christin Lubitz, Helmholtz Zentrum Potsdam, GFZ Deutsches GeoForschungsZentrum, Telegrafenberg, 14473 Potsdam; E-Mail: chlubitz@gfz-potsdam.de

2) Mahdi Motagh, Helmholtz Zentrum Potsdam, GFZ Deutsches GeoForschungsZentrum, Telegrafenberg, 14473 Potsdam; E-Mail: mahdi.motagh@gfz-potsdam.de

3) Hans-Ulrich Wetzel, Helmholtz Zentrum Potsdam, GFZ Deutsches GeoForschungsZentrum, Telegrafenberg, 14473 Potsdam; E-Mail: wetz@gfz-potsdam.de

4) Jan Anderssohn, Astrium Services, Geo-Informations-Services, Platz der Einheit 14, 14467 Potsdam; E-Mail: Jan.Anderssohn@astrium.eads.net

5) Ingo Sass, Technische Universität Darmstadt, Institut für Angewandte Geowissenschaften, Schnittspahnstr. 9, 64287 Darmstadt; E-Mail: sass@geo.tu-darmstadt.de

6) Hermann Kaufmann Helmholtz Zentrum Potsdam, GFZ Deutsches GeoForschungsZentrum, Telegrafenberg, 14473 Potsdam; E-Mail: charly@gfz-potsdam.de

The number of affected buildings increased rapidly. In total, 262 private premises and 7 public buildings show damages (November 2011, STADT STAUFEN). The development and the dimension of the uplift have been carefully monitored by conventional leveling surveys, which are repeated regularly. Leveling provides point-based information and gives only a limited impression of the spatial distribution of deformation, although the number of survey marks in this case has been increased with time.

The advanced methods of satellite-based Synthetic Aperture Radar Interferometry (InSAR), in particular the Persistent Scatterer Interferometry (PSI) and the Small Baseline Subset (SBAS) approaches, have shown their ability for detection and quantification of ground deformation in the range of mm/year in many fields of application. They were used for investigations of natural hazards, landslides, earthquakes or volcanoes. The observation of surface uplift and subsidence plays an increasing role as it is related in many cases with anthropogenic impact, caused for example by water withdrawal or underground construction in urban areas. To gain a deeper understanding of the activating processes, their progress, and in consequence the responsibility of humans to avoid the destabilization of surfaces in future, PSI and SBAS provide the possibility of time series analysis.

In this study, we present the results of applying both methods to a TerraSAR-X dataset covering a three years period from 2008 till 2011 to monitor surface deformation in Staufen.

2 Geology

Staufen is located in the transition zone between the Upper Rhine Graben and Schwarzwald in south-west Germany. The interaction between them has formed the regional geology and hydrology. Tectonically, the region is composed of complex structures (see Fig. 1, FRANZKE, H. J. et al., 2001 & 2003). A multiple-structured rift-horst-formation is typical for that area and the underground below the historic city of Staufen is of similar type. This block-system is characterized by faults that separate rifts and horsts into a mosaic, bordering the underground layers of both structure-types.

Geological and geophysical studies attribute the source of uplift to a disturbance of the existing hydro-geological system. The gypsum-keuper layer contains anhydrite that did not have any contact to ground-water until September 2007. The layer below and above are separated hydraulically by low-permeable cutoffs. The drilling of insufficient sealed exploration wells led to contact of artesian confined groundwater with swellable clay minerals and anhydrite of the gypsum-keuper layer (LGRB, 2010). The consequent hydro-chemical process of anhydrite-swelling and the associated volume increase caused new water paths and a continuation of this phenomenon.

3 Data & Methodology

The base of this investigation is a dataset of 53 TerraSAR-X Stripmap images acquired from July 22nd 2008 till May 22nd 2011, recorded in horizontal polarization (HH) and ascending orbit path direction (relative orbit 116 and beam strip_011).

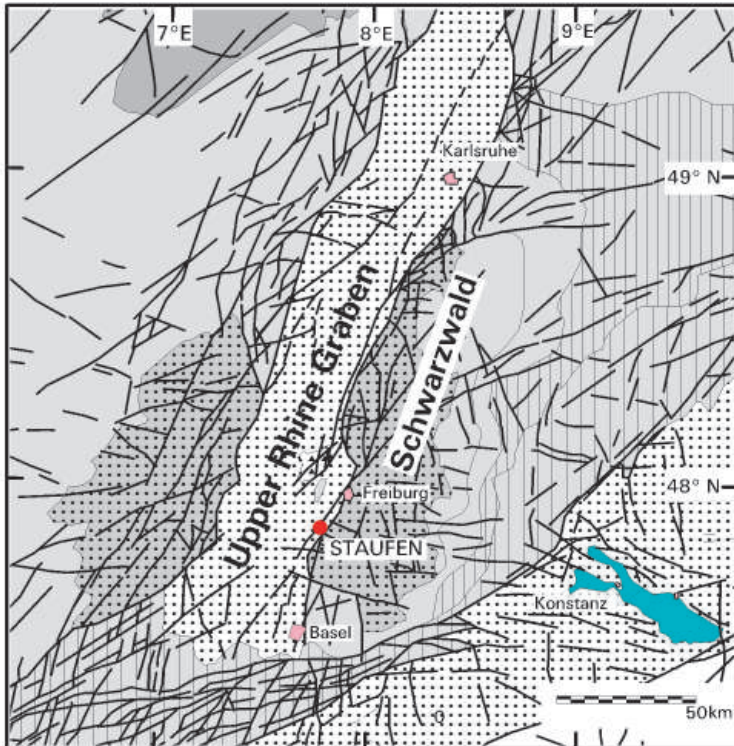


Fig. 1: Main fracture zones and geological structures in SW Germany (FRANZKE, H. J. et al., 2001 & 2003)

The data were processed using both PSI and SBAS methods implemented in the StaMPS/MTI (Stanford Method for Persistent Scatterers/Multi-Temporal InSAR) software (HOOPER, A. et al., 2007 & HOOPER, A., 2008).

In the case of PSI, the deformation contribution of the interferometric phase is extracted for Persistent Scatterers (PS) that appear in all interferograms of a stack of interferograms, which are generated with respect to one master SAR image. The PS – dominant scatterers within a resolution cell and stable in time – are selected based on a combination of amplitude and estimated phase stability (HOOPER, A. et al., 2007). Compared to rural regions, predominantly characterized by distributed scatterers, urban areas provide a high amount of those PS allowing a successful application of PSI.

The SBAS approach refers to the interferogram formation, based on a minimized temporal, perpendicular and Doppler baseline (HOOPER, A., 2008) in order to limit decorrelation effects. A network of differential interferograms is created based on individual combinations of SAR acquisitions taking into account the described conditions. This allows the analysis of deformations within time intervals, preferably short ones, which are not considered in the single-master approach of the PSI principle. Slowly-decorrelating filtered phase (SDFP) pixels are the elements of the SBAS procedure using StaMPS/MTI and described in detail in (HOOPER, A., 2008).

4 Results

We present a new uplift map showing an elliptical deformation pattern in SW-NE orientation. The semi-major axis reaches about 300m and the semi-minor axis 250m after roughly three years of observation. The deformation core, spatially correlating with the drilling area, shows a mean Line-of-Sight (LOS) velocity of up to 11cm/year. The cumulative uplift from July 2008 till May 2011 is 32cm in its maximum.

Comparing the results of PSI with those of the SBAS approach (cf. Fig. 2 (a) and (b)), it is remarkable that the inner part of deformation is not detected by PSI. Stable PS were only found at the border of the deformation area and the values agree well with the SBAS result. Using the SBAS method, the number of selected pixel for the deformation estimation is 43808, as opposed to 6010 with PSI. The increased spatial sampling affects considerably the deformation core. It implies that there is a higher number of resolution cells with semi-stable scatterers than with one dominant scatterer. Similar ratios between the number of PS and SDFP pixels have been found in other studies (HOOPER, A., 2008).

The time series representation of four selected points from the SBAS result is shown in Fig. 3. It is clearly visible that the deformation magnitude increases with time, strongest for the inner part of the uplift pattern (blue diamond) close to the drilling area. With distance the uplift is smaller in size (red square, violet circle).

5 Conclusion

More than 50 TerraSAR-X images of the city Staufen in south-west Germany were acquired covering an observation period of about three years (July 2008 – Mai 2011). The historic city center experiences a remarkable uplift phenomenon since the end of 2007. The uplift pattern, spatially and temporally correlating with the drilling activities related to the geothermal heating and cooling of the city hall, was imaged with the two advanced InSAR methods PSI and SBAS. We found a better applicability of the SBAS approach realized with the StaMPS/MTI software compared to the PSI method. The information content within the inner part of the deformation ellipse is much denser using SBAS, allowing a detailed time series investigation of surface deformation in this area characterized by strong uplift rates.

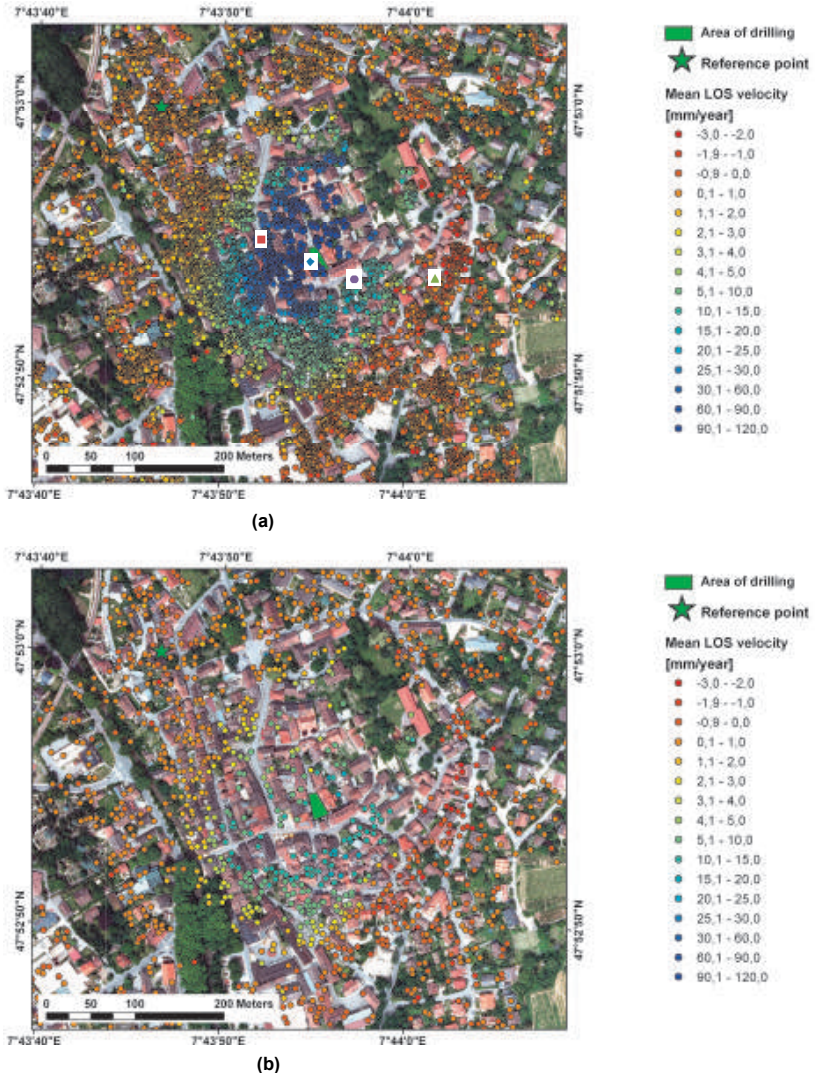


Fig. 2: Mean LOS velocity in mm/year with respect to the reference point, specified by a green star. The results of the SBAS and PSI methods are shown in (a) and (b) respectively. The selected points for the time series diagram in Fig. 3 are presented with their assigned symbol.

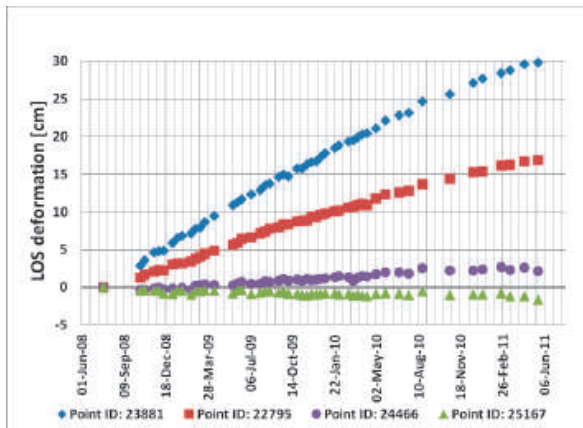


Fig. 3: Time series of selected points from the SBAS result in Fig. 2(a).

6 References

- FRANZKE, H. J., WETZEL, H.-U. & WERNER, W., 2001: Welche Informationen können uns Fernerkundungsdaten zu Paläostressfeldern und zu Mineralisationsprozessen im Schwarzwald geben? - Publik. Deutsche Ges. f. Photogrammetrie u. Fernerkundung, Bd. 9: S. 340-353.
- FRANZKE, H. J., WERNER, W. & WETZEL, H.-U., 2003: Die Anwendung von Satellitenbilddaten zur tektonischen Analyse des Schwarzwalds und des angrenzenden Oberrheingraben. –Jb. Landesamt f. Geologie, Rohstoffe und Bergbau Baden Württemberg, Bd. 41: S. 1-35.
- HOOPER, A., SEGALL, P. & ZEBKER, H., 2007: Persistent scatterer interferometric synthetic aperture radar for crustal deformation analysis with application to Volcan Alcedo, Galapagos. *Journal of Geophysical Research*, 112.
- HOOPER, A., 2008: A multi-temporal InSAR method incorporating both persistent scatterer and small baseline approaches. *Geophysical Research Letters*, 35.
- LGRB LANDESAMT FÜR GEOLOGIE, BERGBAU UND ROHSTOFFE BADEN-WÜRTTEMBERG, 2010: Geologische Untersuchungen von Baugrundhebungen im Bereich des Erdwärmesondenfeldes beim Rathaus in der historischen Altstadt von Staufen i. Br. *Sachstandsbericht Az. 94-4763//10-563*.
- SASS, I. & BURBAUM, U., 2010: Damage to the Historic Town of Staufen (Germany) caused by Geothermal Drillings through Anhydrite-Bearing Formations. *Acta Carsologia*, 233-245.
- STADT STAUFEN, 2011: Presseerklärung vom 22.12.2011 zu den Hebungsrisen an den Gebäuden der historischen Altstadt von Staufen. Online in: <http://www.staufen.de/default.asp?pn=1030&dn=&p1=1&ln=0&nk=20>, 09 January 2012.

Potential contribution of TerraSAR-X radar remote sensing for landslide hazard assessment in Kyrgyzstan

MAHDI MOTAGH, HANS-ULRICH WETZEL,
SIGRID ROESSNER & HERMANN KAUFMANN¹

Abstract: In this paper, we investigate the capability of X-band SAR Interferometry (InSAR) for landslide investigation in southern Kyrgyzstan, Central Asia. SAR data acquired by the X-band German TerraSAR-X satellite are analyzed and the results are compared with field observations. X-band interferograms show several features indicative of areas of potential instability. Ground reconnaissance performed following these observations showed that deformation features detected in TSX data are spatially coinciding with areas of previously unidentified and unmapped landslides.

1 Introduction

Landslides as a specific form of gravitational mass movements represent a geological phenomenon, which refers to the downward sliding of a mass of soil and sedimentary rock, mostly occurring on hillslopes in the forelands of high mountains dominated by weakly consolidated sediments. These events lead to large human and economic losses in the world every year. Due to its specific tectonics and climate setting, Kyrgyzstan is among the most landslide-prone countries in the world. The majority of landslides occur in southern Kyrgyzstan, especially along the Eastern rim of the Fergana Basin where several thousands of landslides have been observed. So far, systematic assessment of landslide occurrence based on field investigation and analysis of aerial photographs has been limited to selected areas of highest landslide intensity (ROESSNER et al. 2005).

Previous studies have investigated the potential of optical satellite remote sensing for assessment of landslide hazard in southern Kyrgyzstan (ROESSNER et al. 2005). In 2009, the German Federal Ministry of Research and Technology (BMBF) funded the Potsdam Research Cluster for Georisk Analysis, Environmental Change and Sustainability (PROGRESS; www.earth-in-progress.de). One important scope of this project is to assess the potential of radar remote sensing methods for characterizing potentially hazardous surface processes in Central Asia. This paper reports on the capability of high-resolution (3 m) Synthetic Aperture Radar (SAR) imagery acquired by the German TerraSAR-X satellite for recognition of surface movements in Kyrgyzstan. Our test site is located south of the town of Uzgen in the southeast of Kyrgyzstan (Fig. 1). In order to understand the spatio-temporal characteristics of slope movements in this region, we applied the technique of SAR Interferometry (InSAR).

¹ Department of Geodesy and Remote Sensing, Helmholtz-Center Potsdam, GFZ, Potsdam, Germany.

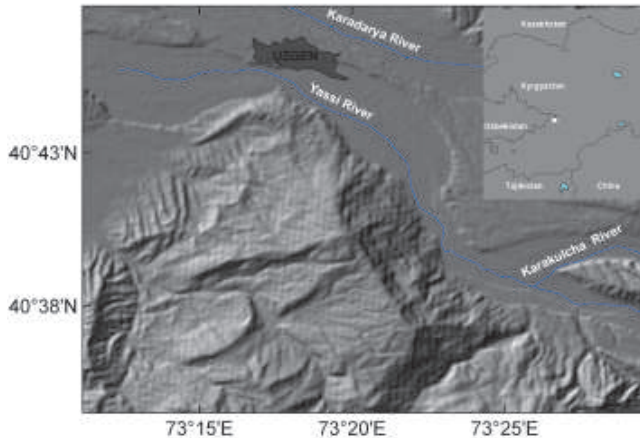


Fig. 1: The geographical setting of the study area in southeastern Kyrgyzstan. The white square in the inset shows the location of Uzgen inside Kyrgyzstan.

2 Data and Methodology

Differential Interferometry Synthetic Aperture Radar (DInSAR) is a radar technique that uses two or more SAR images of the same area to generate maps of surface deformation by using differences in the phase of the waves returning to the satellite. Two complex SAR images taken from slightly different positions by the same antenna at two different times are combined and differenced in phase, forming a radar interferogram. The latter is a contour map of the change in distance between the ground and the radar instrument, which can be analyzed further to derive important parameters such as topography and ground deformation. Details on the principles of radar differential interferometry can be found in (HANSEN 2001; MASSONNET & FEIGL 1998).

For this study, we obtained 38 ascending and 56 descending TerraSAR-X data from the German Aerospace Agency (DLR), covering the time interval from May 2009 to May 2011. We processed these data and formed more than 200 interferograms using the standard repeat-pass interferometry technique implemented in the DORIS software (www.enterprise.lr.tudelft.nl/doris). The topography-related phase in the interferometric processing was estimated and removed from the interferograms using a 3 arcsec digital elevation model from the Shuttle Radar Topography Mission (SRTM). The differential interferograms (complex wrapped images) were low-pass filtered using a multi-looking factor of 10 by 10 to mitigate the impact of high-frequency phase variation due to water vapor variation. The results are used for large-scale landslide survey in the study area.

3 Results

The X-band interferograms showed a wide range of variation in the phase coherence: the interferometric coherence in the region proved to be generally good for short-term summer interferograms, but degraded quickly in the winter and early spring period even for images separated by a single repeat cycle of TerraSAR-X satellite (11 days), presumably because of continuous snow cover, rainfall or starting of vegetation growth.

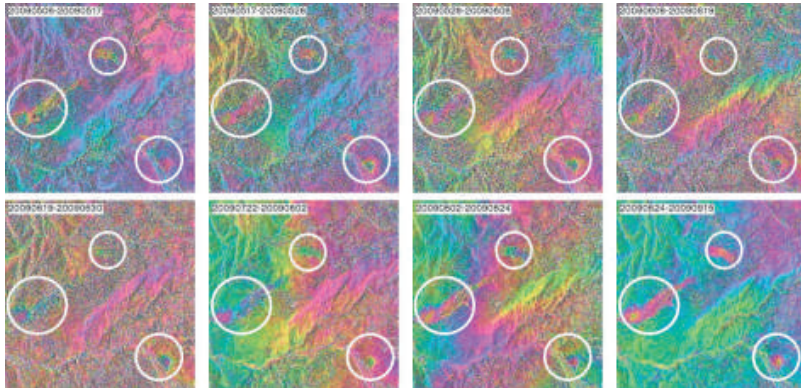


Fig. 2: Eight examples of descending TSX interferograms. The signal related to landslide is marked by white circle. The interferograms are shown in the slant-range geometry format.

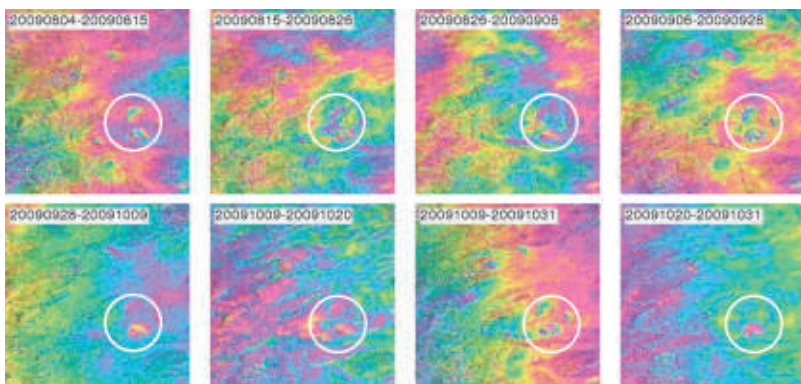


Fig. 3: Eight examples of ascending TSX interferograms. The signal related to landslide is marked by white circle. The interferograms are shown in the slant-range geometry format.

Our strategy for recognition of mass movement was to look for the consistent phase change variation in multiple interferograms in order to avoid misinterpretation of atmospheric artifacts and other error sources as displacement. Fig. 2 shows an example of 8 short-term descending interferograms during May to September 2009. In this

geometry, the interferograms are sensitive to mass movements occurring on slopes facing towards the west. White circles show the location of areas where phase variations appear to be associated with landslides. Fig. 3 shows an example of 8 differential ascending interferograms, which are sensitive to movements of east-facing slopes. In these interferograms we detected one area producing consistent interferometric phase in several interferograms and whose phase variation appeared to be related to landslides. The results shown in Figs. 2-3 proved to be corroborated well with results from ground reconnaissance. Indeed, field investigation performed following these observations revealed that all locations detected above correspond to landslide features in the region, previously unrecognised and unmapped by geologists (Figs. 4-5)

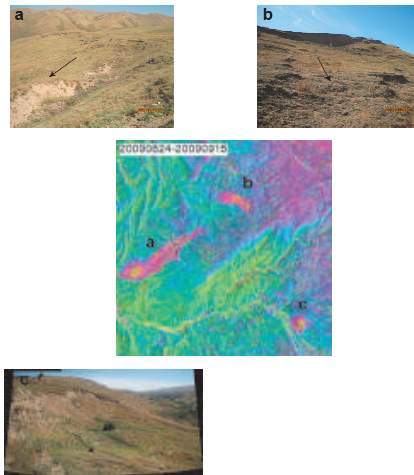


Fig. 4: Ground picture of 3 landslide features detected in descending TSX interferograms.

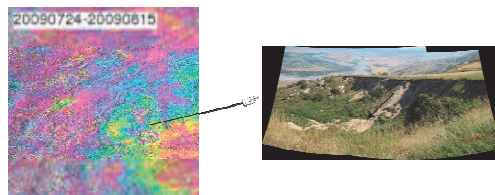


Fig. 5: Ground picture of landslide feature detected in ascending TSX interferograms.

4 Discussion and Conclusion

These results demonstrate the capability of high-resolution TerraSAR-X imagery for investigation of landslide displacement in southern Kyrgyzstan. Results obtained for landslide detection in a mountainous region were illustrated and validation was performed using field investigation. Our results suggest that deformation features associated with landslides in Kyrgyzstan can generally be observed in coherent TSX interferograms covering late spring/summer or early fall period. TSX interferograms made during the winter and early spring period showed more decorrelation in our study area, possibly due to snow cover, rainfall or starting vegetation growth, and could not be used for the recognition of surface deformations related to mass movements.

The landslide features in our interferometry investigation appeared as localized phase variations in TSX interferograms. Such fringe patterns may be easily confused with phase variations due to localized water vapor changes occurring between master and slave images (KIMURA & YAMAGUCHI 2000; STROZZI et al. 2005). Integration of InSAR results with observations from other sources such as optical remote sensing imagery and ground-truth information will be particularly helpful for validation of InSAR-based detected slope instabilities. Future work is underway to perform multi-temporal advanced InSAR analysis (SBAS and PS techniques) for the entire landslide-prone areas detected in this region to better understand their kinematics and deformation rates.

5 Acknowledgements

This work was funded by the German Federal Ministry of Research and Technology (BMBF) within the framework of PROGRESS (Potsdam Research Cluster for Georisk Analysis, Environmental Change and Sustainability). We thank German Aerospace Agency (DLR) for acquiring and providing TerraSAR data under rothach_HYD0289.

6 References

- HANSEN, R.F. (2001): Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis. ISBN-10: 0792369459
- KIMURA, H., & YAMAGUCHI, Y. (2000): Detection of landslide areas using satellite radar interferometry Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 66, 337-344
- MASSONNET, D. & FEIGL, K.L. (1998): Radar Interferometry and Its Application to Changes in the Earth's Surface. Rev. Geophys., 36
- ROESSNER, S., WETZEL, H.-U., KAUFMANN, H. & SARNAGOEV, A. (2005): Potential of Satellite Remote Sensing and GIS for Landslide Hazard Assessment in Southern Kyrgyzstan (Central Asia). Natural Hazards, 35, 395-416
- STROZZI, T., FARINA, P., CORSINI, A., AMBROSI, C., THÜRING, M., ZILGER, J., WIESMANN, A., WEGMÜLLER, U. & WERNER, C. (2005): Survey and monitoring of landslide displacements by means of L-band satellite SAR interferometry. Landslides, 2, 193-201

Observation of the Surface Velocity Field of Inylchek Glacier (Kyrgyzstan) by means of TerraSAR-X Imagery

JULIA NEELMEIJER¹, MAHDI MOTAGH²,
HANS-ULRICH WETZEL³ & MANFRED F. BUCHROITHNER⁴

Zusammenfassung: Mit einer ungefähren Länge von 60 km ist der Inylchek das größte Gletschersystem der Tian Shan Gebirgskette. In dieser Arbeit soll die Möglichkeit aufgezeigt werden, die kurzzeitige Oberflächenkinematik des Gletschers mit Hilfe von TerraSAR-X Radar Daten zu untersuchen. Dieser satellitengestützte Sensor arbeitet unabhängig von den vorherrschenden Wetterbedingungen und liefert Daten mit hoher räumlicher (3 m) und zeitlicher (11 Tage Zyklus) Auflösung. Die Oberflächengeschwindigkeiten werden unter Zuhilfenahme der Amplitude Tracking Methode berechnet, welche auf einer subpixelgenauen Kreuzkorrelation von Intensitätswerten der zurückgestreuten Radarstrahlung beruht. Vorläufige Ergebnisse zeigen eine Bewegungsrate von 0.26 m/d für Bilder des aufsteigenden Bahn Bogens und 0.38 m/d für Bilder des absteigenden Bahn Bogens für den jeweiligen Mittelungszeitraum vom 15.-26. Juli 2009 und 18.-29. Juli 2009.

1 Introduction

Runoff from mountainous glaciers is the primary renewable fresh water resource for the semi-arid highlands of Central Asia. One example for such a highland is the Tarim basin in China, which is completely surrounded by high mountain ranges. In this region, hardly any precipitation reaches the surface, wherefore people living in the basin depend on water originating from glacial streams.

The largest glacier system providing water to the Tarim basin is Inylchek, a 60 km long glacier system situated within the Tien Shan mountain massif. Inylchek constitutes both a favour and a threat, since it is a water source for people in the Tarim basin, but also dams up the Lower Lake Merzbacher, whose waters rush down the valley at least once in a year, destroying infrastructure, agriculture and life (GLAZIRIN, 2010). To investigate the glacier's behaviour and the annually occurring glacial lake outburst floods (GLOFs), a High Mountain Observatory has been maintained next to the glacier site in 2005 (WETZEL et al., 2005). Recent investigation of the glacier kinematics using cross-correlation techniques applied on Landsat TM data show a maximum horizontal displacement of 0.5 m/d during 2002-2003 (NOBAKHT et al., 2011).

1) Julia Neelmeijer, Deutsches GeoForschungsZentrum Potsdam, Telegrafenberg, D-14473 Potsdam, E-Mail: neelmeijer@gfz-potsdam.de

2) Mahdi Motagh, Deutsches GeoForschungsZentrum Potsdam, Telegrafenberg, D-14473 Potsdam, E-Mail: motagh@gfz-potsdam.de

3) Hans-Ulrich Wetzel, Deutsches GeoForschungsZentrum Potsdam, Telegrafenberg, D-14473 Potsdam, E-Mail: wetz@gfz-potsdam.de

4) Manfred F. Buchroithner, Institut für Kartographie, Technische Universität Dresden, D-01062 Dresden, E-Mail: Manfred.Buchroithner@tu-dresden.de

However, to assess the runoff variability of a glacier, it would be important to understand not only its annually averaged behaviour, but rather investigate on the seasonal changes as well. Only with knowledge about short-term variability it would be possible to estimate the amount of the available water reservoir and simultaneously allow to prepare protection against devastating glacial lake outburst floods.

Since measurements by optical spaceborne sensors are often hampered by clouds, weather-independent radar sensors are the ideal technique to routinely collect data about the glacier's status. Within this study, the feasibility of utilising TerraSAR-X radar data to detect the surface velocity field of the glacial area is assessed. TerraSAR-X seems to be ideal, as this system has the advantage of being able to collect data with a very high spatial (3 m) and temporal resolution (11 days repeat cycle) (BUCKREUSS et al., 2003). The calculation of the surface kinematics is possible by applying Amplitude Tracking on radar image pairs. This feature tracking technique is based on sub-pixel cross-correlation of the intensity part of SAR data.

2 Investigation Area

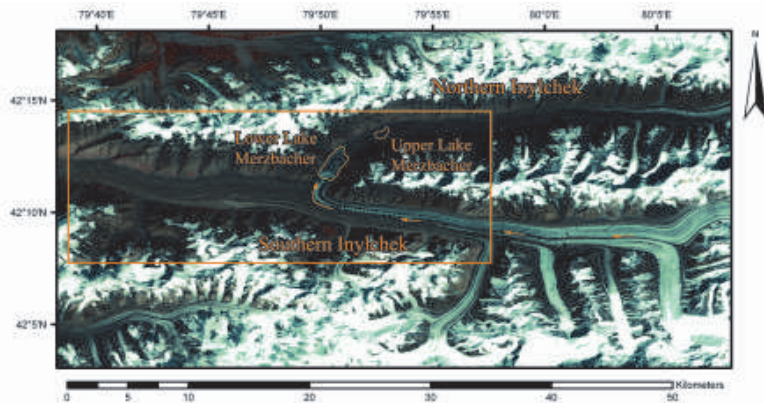


Fig. 1: Landsat TM image from 24. August 2007 showing the northern and southern branch of Inylchek glacier. The contours of Upper and Lower Lake Merzbacher are highlighted by a yellow outline. Additionally, arrows show the flow direction of the kinematically active part of southern Inylchek. The glacier stream turns halfway towards north, due to a heavy dead ice barrier further down the valley. The yellow rectangle marks the outline for the area that is represented within the tracking results.

Inylchek glacier is located in Kyrgyzstan, deep with the western Tien Shan mountain range. It is divided into a northern and a southern branch (Fig. 1), whereas the northern branch yields hardly any motion, but the southern branch shows high surface velocity values (WETZEL et al., 2005). However, due to a dead ice branch barring the way further down the valley, the kinematically active part of the glacier is halfway forced to take a turn towards the north, instead of continuing to flow westwards. Therefore, the fast moving glacier branch ends at this level by calving into

the Lower Lake Merzbacher. Supplied by the water from southern Inylchek, the water level of this lake constantly rises until it reaches a critical point in summer time, where it starts to lift up the ice front of the glacier (MAYER et al., 2008). This leads to the annually occurring glacial lake outburst flood, whereas the water flows westwards down the valley in subchannels beneath the glacier until the entire lake is drained.

3 Data and Methodology

To investigate seasonal kinematics of the glacier, we obtained a TerraSAR-X radar data set consisting of 124 scenes in total. All images were observed in Stripmap Mode with single polarisation (HH). The data set covers the time period from April to October 2009 and February to September 2010, and includes both ascending and descending tracks. Most of the data is recorded with a repeat cycle of 11 days; the maximum gap appearing between two acquisitions is 33 days.

For measuring velocities of fast moving glaciers like Inylchek, spaceborne InSAR has only been successful, when applied to tandem scenes with very short temporal baselines. The reason for the limited applicability of this technique over fast moving glaciers is rapid temporal decorrelation (FLORICIOIU et al., 2008). To overcome the drawbacks of the InSAR technique, we make use of the Amplitude Tracking method, which does not rely on the phase information of the data.

3.1 Amplitude Tracking

Amplitude Tracking is based entirely on examining changes of backscatter intensities, which occurred between two acquisitions. Referring to glaciers, examination of the inhomogeneous pattern of the ice surface is sufficient for movement detection (FLORICIOIU et al., 2008). The required input data includes two radar scenes, where the one with the earlier acquisition acts as the master and the second as the slave image. The technique itself can be divided in two major steps. Firstly, the coregistration takes place, which is the crucial part of the process. The superimposing of the images has to be done with sub-pixel accuracy to prepare the data for comparison (LUCKMAN et al, 2007), therefore coregistration parameters have to be carefully adjusted. Secondly, the actual feature tracking is performed, which is based on a cross-correlation method.

3.1.1 Coregistration

To determine glacier surface velocities by comparison of backscatter intensities, a superposition of images to sub-pixel accuracy is essential, so that every pixel in both master and slave image covers the same area. The coregistration procedure is achieved in two steps. First, a coarse shift takes place, that is based on the orbital data and a SRTM4-DEM. For the second shift, a cross-correlation function is calculated, which refines the result to a 1/10th of pixel accuracy. This is done by defining a grid of small windows on the master image. For each window an individual cross-correlation function is calculated. The maximum of this function is sought-for by oversampling of the data and is finally taken to compute the residual shift.

3.1.2 Cross-Correlation

After the coregistration is completed and images are superimposed to sub-pixel accuracy, the estimation of the shift between displaced features can be started. The calculation relies on a normalised cross-correlation of small image patches. To get the correct offset value, the algorithm searches for the location of the highest peak within the cross-correlation function. To increase the accuracy, the data is once more oversampled. The success of determining the correct offset depends on the existence of identical and distinguishable characteristics in intensity data that are identifiable and located within the same compared image patch (STROZZI et al., 2002).

3.2 Post-Processing

Some post-processing steps are necessary to get interpretable results for ascending and descending acquisitions. The tracking process yields two images, showing displacement offsets in range and azimuth direction. Since these offsets are still in pixel units, they have to be converted to metric units by applying the corresponding pixel spacing of the images.

4 Results

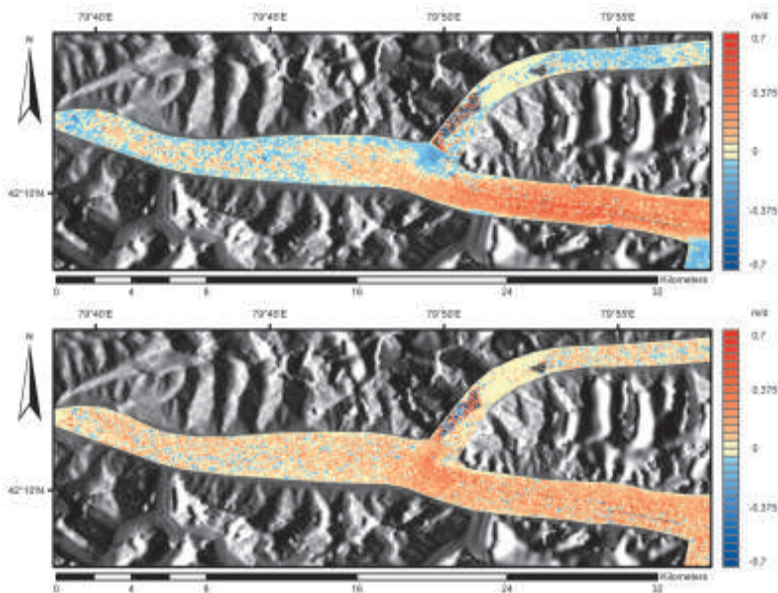


Fig. 2: Feature Tracking results for the ascending acquisition pair from 15-26 July, 2009. The upper image shows surface velocities for range direction, whereas positive values point towards the west. The lower image yields surface velocities for azimuth direction, whereas positive values point towards the north.

Results for ascending and descending images, acquired nearly over the same time period, do not show similar results within summer time. This is apparent also from Figures 2 and 3, where range and azimuth results are represented for an ascending acquisition, covering the time period from 15.-26. July 2009 (Fig. 2) and for an descending image pair from 18.-29. July 2009 (Fig. 3). Over the active upper part of southern Inylchek, mean surface velocities in range direction are with 0.38 m/d for descending images noticeable higher than 0.26 m/d for ascending images. Additionally, a surface velocity flow direction towards the east is noticeable within the ascending result, but cannot be observed within the descending result. For the lower part of southern Inylchek, representing the dead ice part of the glacier, the descending range image shows reasonable horizontal motion towards the west. However, ascending results are rather characterised by motion in eastern direction. In azimuth images, a rather similar behaviour of the glacier is recognisable for both ascending and descending results. Highest values are found in the bending area, where the active glacier branch flows towards the north (the mean displacement yields 0.14 m/d for descending vs. 0.16 m/d for ascending), but especially in ascending images, the remaining glacier part also shows displacement values towards north.

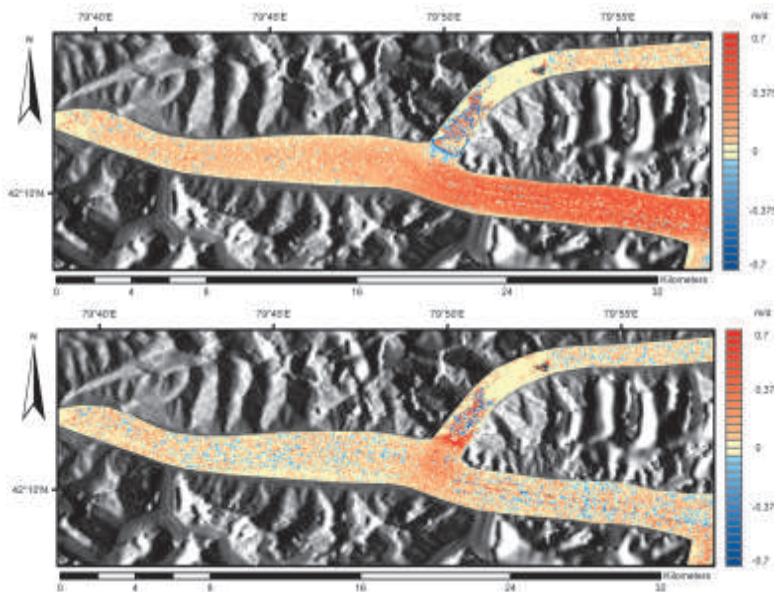


Fig. 3: Feature Tracking results for the descending acquisition pair from 18.-29. July, 2009. The upper image shows surface velocities for range direction, whereas positive values point towards the west. The lower image yields surface velocities for azimuth direction, whereas positive values point towards the north.

5 Discussion

The noticeable difference of surface velocities between ascending and descending results is explainable by the different viewing geometries of the sensor. Figure 4 shows the geometry setting for Inylchek glacier. For an ascending look direction, the glacier moves towards the sensor, whereas for a descending look direction, the glacier moves away from the sensor. Additionally, during the summer month a vertical shift occurs due to ablation processes. Projecting the same shift in both directions on an imaging plane, it is clear that the descending offset will appear distinctly higher compared to the ascending offset. Additionally, a sign change is observed, that is already compensated within the results presented in Figures 2 and 3 to improve readability.

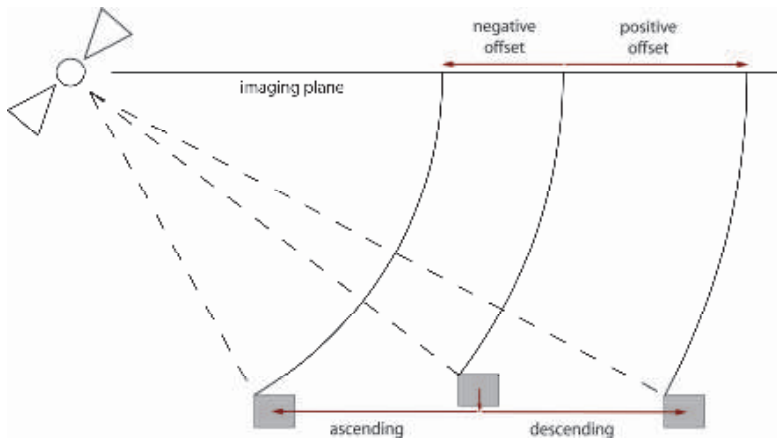


Fig. 4: Acquisition geometry for ascending and descending images for Inylchek glacier. For viewing purposes, the sensor has been left at the same position, but depending on the acquisition geometry, the glacier moves either towards (ascending constellation) or away (descending constellation) from the sensor. If additionally a vertical displacement has to be taken into account, the same offset of a feature on the glacier surface will appear with a different amount and a different sign on the imaging plane.

Due to this side-looking effect, results in range direction are only regarded as displacements in line-of-sight. The solution for this geometry problem would be a combination of range and azimuth results from both ascending and descending images, which would allow to retrieve 3D motion information for displacements that occurred within the acquisition time frame.

6 Conclusion and Future Perspectives

Within this study, it has been demonstrated that Amplitude Tracking is a suitable displacement detection method over glacial areas, when InSAR fails due to decorrelation that might occur due

to rapid changes of the glacier's surface during subsequent acquisitions. The feature tracking method yields highly detailed results in range and azimuth direction. However, it has to be taken into account that range direction results are only showing offsets in line-of-sight. To retrieve real ground motion vectors, information from ascending and descending images, acquired over nearly the same time period, have to be interpreted together. We will continue this study by applying the technique to TerraSAR-X images from both 2009 and 2010. By combining the results from ascending and descending tracks, it will be possible to investigate the 3D seasonal kinematics of Inylchek glacier.

7 Acknowledgements

This study has been accomplished in the framework of the BMBF funded project PROGRESS (Potsdam Research Cluster for Georisk Analysis, Environmental Change and Sustainability). The TerraSAR-X radar data has been kindly provided by DLR under the proposal number HYD0289.

8 References

- BUCKREUSS, S., BALZER, W. MUHLBAUER, P. WERNINGHAUS, R. & PITZ, W., 2003: The TerraSAR-X Satellite Project. IGARSS - International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Toulouse, 2003, **5**, S. 3096 - 3098.
- FLORICIOIU, D., EINEDER, M., ROTT, H. & NAGLER, T., 2008: Velocities of major outlet glaciers of the Patagonia Icefield observed by TerraSAR-X. IGARSS - International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Boston, 2008, **4**, S. 347 - 350.
- GLAZIRIN, G. E., 2010: A century of investigations on outbursts of the ice-dammed Lake Merzbacher (Central Tien Shan). *Austrian Journal of Earth Sciences*, **103** (2), S. 171-179.
- LUCKMAN, A., QUINCEY, D. & BEVAN, S., 2007: The potential of satellite radar interferometry and feature tracking for monitoring flow rates of Himalayan glaciers. *Remote Sensing of Environment*, **111**, S. 172-181.
- MAYER, C., LAMBRECHT, A., HAGG, W., HELM, A. & SCHARRER, K., 2008: Post-drainage ice dam response at Lake Merzbacher, Inylchek glacier, Kyrgyzstan. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, **90** (1), S. 87-96.
- NOBAKHT, M., MOTAGH, M., WETZEL, H.-U. & RÖBNER, S., 2011: Surface velocity field of the Inylchek Glacier/Kyrgyzstan - studied with LANDSAT data imagery. In: Seyfert, E. (Eds.), 31. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF, Mainz, **20**, S. 289-294.
- STROZZI, T., LUCKMAN, A., MURRAY, T., WEGMÜLLER, U. & WERNER, C.L., 2002: Glacier Motion Estimation Using SAR Offset-Tracking Procedures. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **40** (11), S. 2384-2391.
- WETZEL, H.-U., REIGBER, A., RICHTER, A. & MICHAJLJOW, W.N., 2005: Gletschermonitoring und Gletscherseebrüche am Inyltschik (Zentraler Tienshan) - Interpretation mit optischen und Radarsatelliten. In: Seyfert, E. (Eds.), 25. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF, Mainz, **14**, S. 341-350.

InSAR analysis of the coseismic deformation related to the 2008 Nura earthquake, Pamir-Alai mountains

KANAYIM TESHEBAEVA^{1,2}, HENRIETTE SUDHAUS¹, HELMUT ECHTLER¹,
MAHDI MOTAGH¹, SIGRID ROESSNER¹, BERND SCHURR¹,
HANS-ULRICH WETZEL¹ & ALEXSANDER ZUBOVICH^{1,2}

Abstract: A magnitude 6.6 earthquake struck the eastern Alai region near the town of Nura on 5th October 2008. Nura is located at the footwall of the Main Pamir Thrust in an area of complex tectonic structure that develops due to the convergence between India and Eurasia. The earthquake ruptured a part the E-W trending Pamir Frontal Thrust as revealed by surface ruptures observed in the field, distribution of aftershocks and analyses of the tectonic geomorphology. In addition, the surface deformation measured with InSAR (Interferometric Synthetic Aperture RADAR) shows a clear co- or postseismic activation of the NE-SW oriented Irkeshtam thrust fault that is located north-eastwards from the Pamir Frontal Thrust. Here at the Irkeshtam thrust fault, the eastern end of Trans Alai range is thrusting over the Alai basin and ridge. We present a study on the Nura earthquake using InSAR surface deformation measurements from two different look directions that aims to add information on earthquake source parameters as gained in seismological studies. Our study provides estimates on the fault extension and segmentation and with that supports further analyses in the region, e.g. seismic hazard assessment. Also, from a tectonic point of view, it may give new insights into the strain partitioning at the footwall of the Main Pamir Thrust.

1 Introduction

The Nura earthquake occurred in the Pamir-Alay region that is a mountain system belonging to Pamir and southern Tien Shan mountain ranges (Fig. 1). The Pamir-Alay zone accommodates with 10 up to 15 mm/yr of NNW-SSE oriented shortening a large part of the 25 mm/yr (reference) total convergence between Pamir and Eurasia (ZUBOVICH et al, 2010). MOHADJER et al. (2010) report an upper bound of total shortening in the combined Central Asia and northernmost Pamir of 11.8 ± 2 mm/yr. REIGBER et al. (2001) give an estimated rate of 13 ± 4 mm/yr of shortening across the eastern end of the Alai Valley between Kara Kul and the Fergana Valley. These geodetically estimated rates are higher than the geologically estimated lower bound on the rate of 6 mm/yr along the Main Pamir thrust (BURTHMAN & MOLNAR, 1993; ARROWSMITH & STRECKER, 1999).

1) Helmholtz Centre Potsdam GFZ, Telegrafenberg, 14473 Potsdam, Germany, contact: kanayim@gfz-potsdam.de.

2) Central Asian Institute for Applied Geosciences, Bishkek, Kyrgyzstan.

The seismic zone at the connection of the Pamir and Tien-Shan is one of the most active fault zones of the world. The NEIC catalog contains around 380 earthquakes with magnitudes 4 and larger in the period from 1973 to 2011(Fig.1).

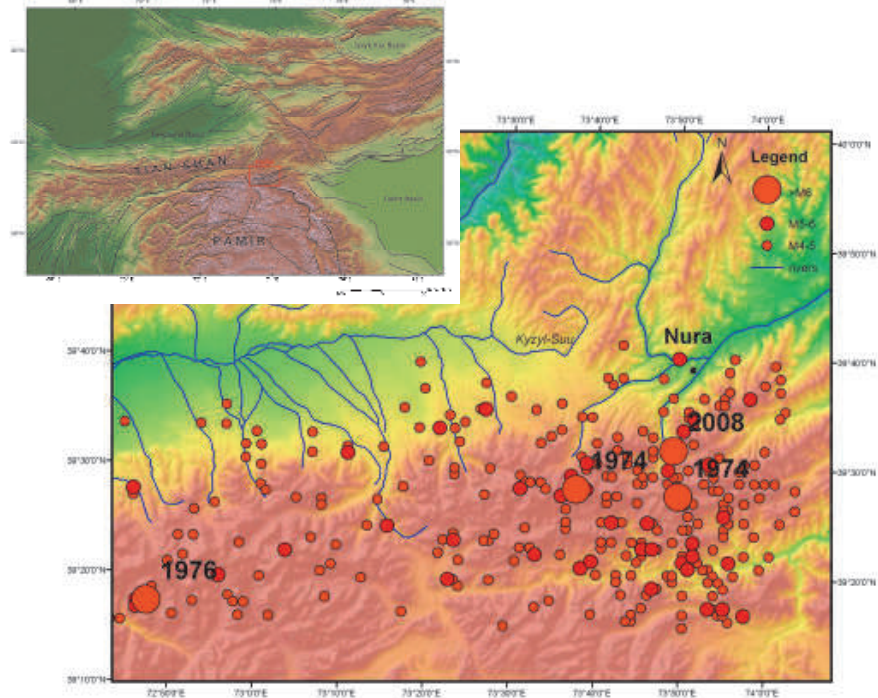


Fig. 1: Tectonic map (top) of the Pamir-Tian Shan region showing the active faults over the color-shaded topographic relief from SRTM data TAYLOR & YIN (2009) and KALMETIEVA et. al. (2009). The earthquake distribution map (bottom) from NEIC catalog from 1973 to 2011. The map shows earthquakes with magnitude 4 and larger.

The four largest earthquakes of the region within the last 50 years are earthquakes in 1974 with magnitudes of M7.3 and M6.1 earthquakes, a M6.1 earthquake in 1976 and the most recent 2008 M6.6 Nura earthquake (Fig 1.).

The Nura earthquake caused 74 human fatalities and considerable destruction. It ruptured a segment of the E-W trending footwall of the Main Pamir Thrust as found in analyses of the tectonic geomorphology and revealed by the distribution of aftershocks. Surface ruptures have been observed as well in the epicentral area that is only hard to access, moreover so as the earthquake occurred at the beginning of winter. As a result only some pictures of these surface

ruptures exist, but no measurements have been done at these places nor any detailed or systematic fault mapping. Therefore, surface deformation measured by using InSAR (Interferometric Synthetic Aperture RADAR) and pixel offset measurements in SAR imagery of ALOS and ENVISAT satellite data adds very valuable information when studying the coseismic processes of the Nura earthquake. Potentially this study may provide new insights into strain partitioning at the footwall of the Pamir Thrust and the processes of mountain building at the eastern end of Trans Alai range.

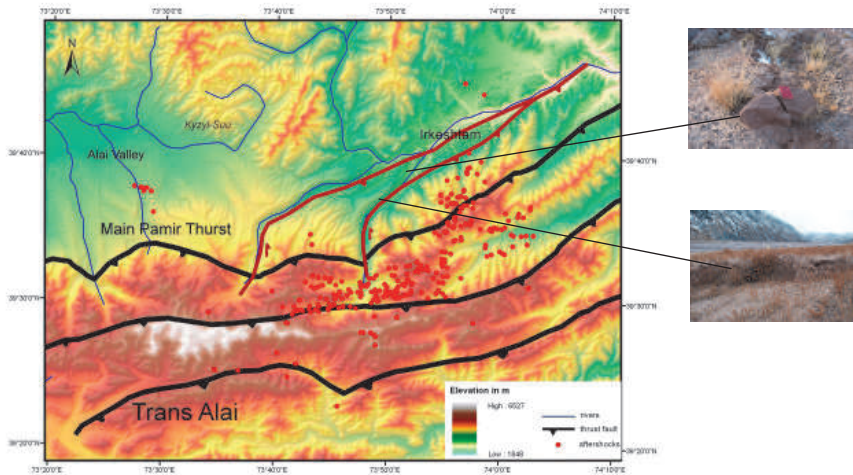


Fig. 2: Tectonic map of the eastern Pamir-Tian Shan region showing the active faults in the Nura region and the location of recorded aftershocks. The pictures from B. Schurr and A. Meleshko show surface ruptures observed in the field from the the Nura 2008 earthquake.

2 InSAR data and pixel offset measurements

To measure the surface deformation we use SAR data from PALSAR, on-board ALOS (Advanced Land Observation Satellite) and from the European ENVISAT Satellite. We processed 22 ascending PALSAR (L-band sensor with $\lambda=23.6$ cm) and 10 descending ENVISAT (C-band sensor with $\lambda=5.6$ cm) images in total using the SarScape software. The InSAR data include pairs with less than 300 m perpendicular baseline and temporal baselines with less than 14 month.

Measuring the coseismic surface deformation using InSAR is challenging in this region of high topographic relief. The Pamir-Alay ridge reaches elevations in excess of 7000 m and is covered by snow throughout the year. As a result, extensive loss of interferometric phase coherence occurs in the processed ENVISAT interferograms due to layover and phase decorrelation, which

heavily limits the deformation measurements here.

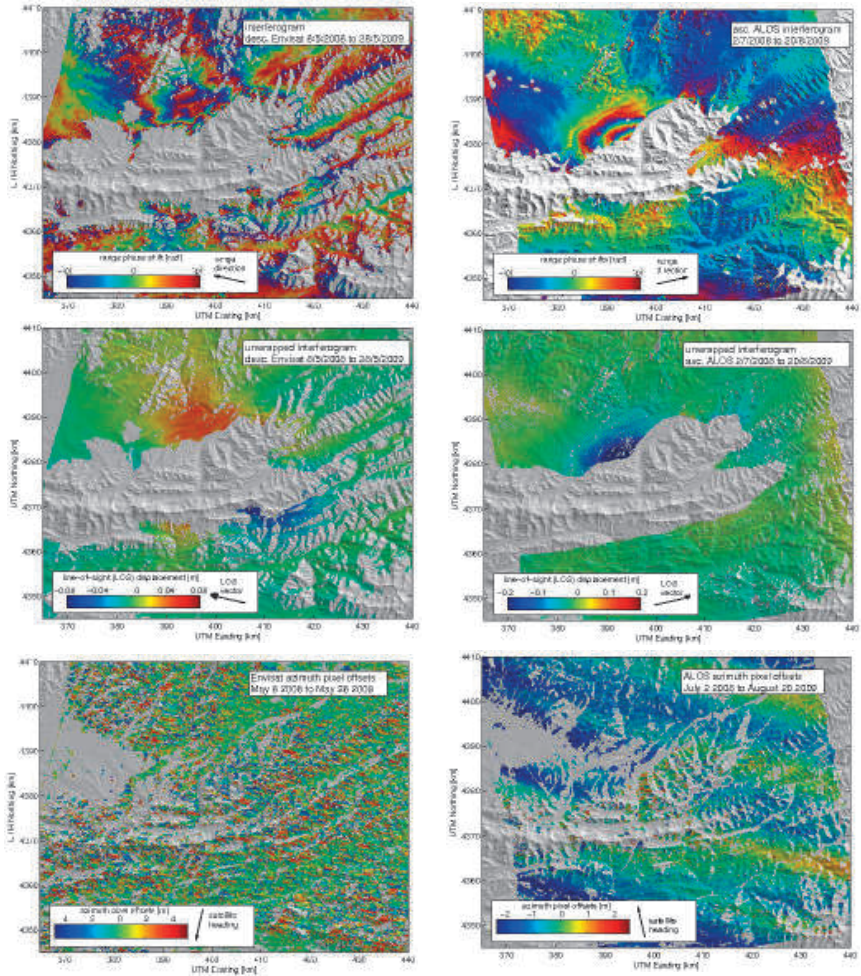


Fig. 3: Surface displacement measurements from SAR products of (right panels) ALOS satellite (L-band sensor, wavelength 23.6 cm) and (left panels) ENVISAT satellite (C-band sensor, wavelength 5.6 cm). Interferograms (top panels) are filtered and areas of incoherent interferometric phase are masked. Middle panels show unwrapped interferograms and right panels azimuth pixel offset measurements, corresponding to horizontal movement on the surface in the satellite's flight direction.

L-band interferograms are less sensitive to small alterations on the Earth surface than C-band SAR data and therefore preserve the coherence of the interferometric phase over longer time spans. Layover is more pronounced in ENVISAT data due to a smaller incidence angle of the radar beam of about ~ 23 degree in contrast to the ~ 39 degree incidence of the ALOS radar beam (Fig.3, top).

For the Nura earthquake, the InSAR technique provides reliable deformation measurements mostly on the footwall of the Main Pamir Thrust in the eastern part of Alai valley (Fig. 3, middle). In particular, the ENVISAT data are strongly suffering from layover over the surrounding area of high topographic relief and steep slopes. In the area close to the epicenter of the Nura earthquake the interferometric phase is highly decorrelated in all interferograms, most likely due to snow coverage.

In the ascending ALOS interferograms we measure north-east of the epicenter at the footwall of the Irkeshtam thrust fault a large and sudden change of negative and positive line-of-sight displacements that amount to about -36 cm and 48 cm, respectively. While in the corresponding descending ENVISAT interferogram there are only in total two fringes visible, which compares to ~ 6 cm line-of-sight displacement. Such large differences in the measured line-of-sight displacements between ascending and descending images are to be expected only for a considerable amount of horizontal deformation. Some far-field deformation can be observed in both interferograms.

Measurements of pixel offsets using the SAR amplitude images is complementing the displacement measurements of InSAR, but are often strongly affected by noise (Fig. 3, bottom). Our offset measurements in azimuth direction (the satellite flight direction) using the ALOS data show a clear left-lateral component of movement at the Irkeshtam thrust fault (Fig. 2, left, bottom). This observation is supported by the azimuth offset measurements using the descending ENVISAT data. Even though their quality is even poorer compared to the results in ALOS data, they also show a clear change in the azimuthal offsets across the Irkeshtam thrust fault. These changes have the opposite sign compared to the ALOS azimuth offsets, which is expected for the nearly opposite flight direction (Fig. 3, right, bottom).

3 Results and discussion

The settlement Nura destroyed by the earthquake is located close to the outcropping of Irkeshtam thrust fault (Fig. 2). The InSAR displacements and the distribution of aftershocks define an active thrust part limited by very prominent topography gradient defined as co-seismic active inverse faults partly with slip components.

The location of the Nura earthquake is the water divide between Tarim and Tadjik west basin. From recent studies of STRECKER et al. (2003), BURTMAN (2000), ARROWSMITH & STRECKER (1999), BURTMAN & MOLNAR (1993), NIKONOV et al. (1983), DAVIDZON et al.(1982) the active closure of the Alai Valey is demonstrated for late Pleistocene to recent times concurrent with GPS data analysis of ZUBOVICH et al. (2010), MOHADJER et al. (2010), REIGBER et al. (2001) and underlines the definition of the most active segment in the Pamir-Alay collisional structure.

At this location we measured the highest structural displacement situated at the footwall of the so

far defined Main Pamir Thrust. Our interpretation of active fault pattern of contractional upthrusting strain may be interpreted as an recently formed active welch and possibly as northward propagation at the eastern termination of the Alai Valey into its footwall.

Ongoing work will focus on detailed analysis of the deformation patterns and on a source model estimation of the Nura earthquake. Such information will support studies of the stress changes caused by the earthquake and analyses of active tectonics in the area.

4 References

- ARROWSMITH, J. R. & M. R. STRECKER (1999): Seismotectonic range-front segmentation and mountainbelt growth in the Pamir-Alai region, Kyrgyzstan (India-Eurasia collision zone), *Geol. Soc. Am. Bull.*, 111, 1665–1683, doi:10.1130/0016-7606(1999)111<1665:SRFSAM>2.3.CO;2.
- BURTMAN, V.S., 2000: Cenozoic crustal shortening between the Pamir and Tien Shan and a reconstruction of the Pamir-Tien Shan transition zone for the Cretaceous and Paleogene: *Tectonophysics*, v. 319, p. 69–92.
- BURTMAN, V.S., & MOLNAR, P., 1993: Geological and geophysical evidence for deep subduction of continental crust beneath the Pamir: *Geological Society of America Special Paper* 281, 76 p.
- DAVIDZON, R.M., KRAIDENKOV, G.P. & SALIBAEV, G.K., 1982: Stratigraphy of Paleogene deposits of the Tadjik Depression and adjacent territories: Dushanbe, Tadjikistan, Donish, 151 p. (in Russian).
- KALMETIEVA Z.A., MIKOLAICHUK A.V., MOLDOBEKOV B.D., MELESHKO A.V., JANTAEV M.M. & ZUBOVICH, A.V., (2009): The atlas of earthquakes in Kyrgyzstan.- CAIAG Bishkek, 2009, 76 p. ISBN 978-9967-25-829-7.
- MOHADJER, S., BENDICK R., ISCHUK, A., KUZIKOV, S., KOSTUK, A., SAYDULLAEV, U., LODI, S., KAKAR, D.M., WASY, A., KHAN, M.A., MOLNAR, P., BILHAM, R. & ZUBOVICH, A., 2010: Partitioning of India-Eurasia convergence in the Pamir-Hindu Kush from GPS measurements: *Geophysical Research Letters*, v.37, L04305, doi:10.1029/2009GL041737.
- NIKONOV, A.A., VAKOV, A.V. & VESELOV, I.A., 1983: Seismotectonics and earthquakes in the convergent zone between the Pamir and the Tien Shan: Moscow, Nauka, 240 p. (in Russian).
- REIGBER, C., MICHEL, G.W., GALAS, R., ANGERMANN, D., KLOTZ, J., CHEN, J.Y., PAPSCHEV, A., ARSLANOV, R., TZURKOV, V.E. & ISHANOV, M.C., 2001: New space geodetic constraints on the distribution of deformation in central Asia: *Earth and Planetary Science Letters*, v. 191, p. 157–165.
- STRECKER, M. R., HILLEY, G.E., ARROWSMITH, J.R. & COUTAND, I., 2003: Differential structural and geomorphic mountain-front evolution in an active continental collision zone: The NW Pamir, southern Kyrgyzstan, *Geol. Soc. Am. Bull.*, 115, 166–181, doi:10.1130/0016-7606(2003)115<0166: DSAGMF>2.0.CO;2.
- Taylor, M. & An Yin (2009): Active structures of the Himalayan-Tibetan orogen and their relationships to earthquake distribution, contemporary strain field, and Cenozoic volcanism.- *Geosphere*; June 2009; v. 5; no. 3; p. 199–214; doi: 10.1130/GES00217.1; 4 figures; 1 supplemental file.
- ZUBOVICH, A., WANG, X., SCHERBA, Y., SCHELOCHKOV, G., REILINGER, R., REIGBER, CH., MOSIENKO, O., MOLNAR, P., MICHAJLJOW, W., MAKAROV., V., LI, J., KUZIKOV, S.,

HERRING, T., HAMBURGER, M., HAGER, B., DANG, Y., BRAGIN., V., BEISENBAEV, R., 2010, GPS velocity field for the Tien Shan and surrounding regions: *Tectonics*, v.29, TC6014, doi:10.1029/2010TC002772.

Ein Systemprototyp zur Unterstützung der Bergrettung auf Basis einer Interaktion zwischen GPS-Tracking und einem digitalen 3D-Felswandmodell

MANFRED BUCHROITHNER¹, GUIDO EHLERT², BERND HETZE³,
HORST KOHLSCHMIDT⁴ & NIKOLAS PRECHTEL⁵

Zusammenfassung: Bergrettung muss möglichst schnell und unter der Prämisse maximal möglicher Sicherheit des Rettungsteams stattfinden. Die Bergung von Personen aus einer Felswand ist extrem erschwert, wenn durch Tageszeit oder Nebel direkter Sichtkontakt verhindert ist. Das hier dargestellte Projekt sucht eine technische Lösung, um unter diesen erschwerten Bedingungen die Ortung des zu Bergenden und die Navigation des Rettungsteams in der Felswand von einer Rettungsleitstelle aus technisch optimal zu unterstützen. Dabei wurden Standardkomponenten wie ein Smartphone mit GPS-Funktionalität, eine Datenkommunikationstrecke auf Client-Server-Basis und VR-Visualisierungssoftware an projektspezifische Anforderungen angepasst. Eine Fernunterstützung der Bewegung im Fels verlangt zudem ein hochpräzises Wandmodell, welches es ortskundigen Experten in der Rettungsleitstelle ermöglicht, die Felsgeometrie und -struktur auf dem Rettungsweg verlässlich einzuschätzen und die nötigen Direktiven an die Retter weiterzugeben. Ein solches Modell wurde für die Dachsteinsüdwand (Österreich) aus Laserscans von verschiedenen Standorten aus aufgebaut und mit digitalen Kameraaufnahmen texturiert. In ca. einjähriger Entwicklungszeit wurden innerhalb eines interdisziplinären Teams an der TU Dresden (Informatik, E-Technik, Kartographie) verschiedene technische Teilmodule des Bergrettungsunterstützungssystems entwickelt (digitales Felswandmodell, optimierte GPS-Datenübertragung zwischen mobilem Gerät, Server und Client, Datenfilterung sowie dynamische Visualisierungskomponente) und integriert. Die Funktionsfähigkeit des Prototyps wurde im Sommer 2011 bei einer Bergrettungsübung unter realistischen Bedingungen erstmalig getestet und konnte bewiesen werden.

1 Motivation und Einordnung des Projektes

Der vorgestellten Anwendung liegt folgendes Szenario zugrunde:

Eine Person oder Gruppe befindet sich in einer Felswand in Bergnot. Die Bergrettung wird alarmiert. Aufgrund eingeschränkter Sichtverhältnisse stellt die schnelle Bergung jedoch sowohl ein technisches wie auch ein Sicherheitsproblem dar. Ein geeignetes Assistenzsystem soll nun erheblich das Sicherheitsrisiko reduzieren und die Bergung beschleunigen, indem die Akteure in einem virtuellen Wandmodell der Einsatzzentrale nahezu in Echtzeit präzise geortet werden können.

¹ Manfred Buchroithner, Institut für Kartographie, TU Dresden, Helmholtzstr. 10, 01069 Dresden

² Guido Ehlert, Ehlert und Beckmann Web-Anwendungen GbR, Hechtstr. 23, 01097 Dresden

³ Bernd Hetze, Zentrum für Informationsdienste und Hochleistungsrechnen, TU Dresden, Helmholtzstr. 10, 01069 Dresden

⁴ Horst Kohlschmidt, Zentrum für Informationsdienste und Hochleistungsrechnen, TU Dresden, Helmholtzstr. 10, 01069 Dresden

⁵ Nikolas Prechtel, Institut für Kartographie, TU Dresden, Helmholtzstr. 10, 01069 Dresden

nen. Gleichzeitig können über eine Lageanalyse im virtuellen Modell den Rettern aus der Zentrale via Sprechfunkkontakt geeignete Navigationshilfen übermittelt werden.

Aus dem Szenario lassen sich Gemeinsamkeiten und Unterschiede zu etablierten Verfahren einer Kombination von GPS-Ortung und Landschaftsmodellen ableiten:

Rettungsunterstützende Systeme, welche in Notsituationen Positionsdaten an Dienstleister senden und mit vorhandenen Geodaten interagieren, haben eine längere Historie. Derartige Applikationen fallen unter den Begriff „Infomobility“. Dabei werden Umfeld-beschreibende Geodaten, dynamische Positionsdaten und eine Visualisierungskomponente gekoppelt. Zugehörige Systeme bestehen typischerweise aus den Modulen Positionsbestimmung, Kommunikation und Visualisierung (KOTSAKIS et al. 2001). Ein beispielhaftes Einsatzfeld stellt die Absicherung von Patienten dar, die bei spontan auftretenden Defekten und Hilflosigkeit automatisch ihre aktuelle Position an Rettungsdienste melden (z.B. HEIMANN et al. 2002). Das Forschungsprojekt PARAMOUNT15 entwickelte 2002 bis 2004 einen Prototypen eines mobilen Informations- und Navigationssystem für Bergwanderer (PARAMOUNT 2005), welches neben touristischer Informationsvermittlung auch im Bereich Search-and-Rescue einsetzbar sein sollte. Mobilseitig wurden Windows-Mobile-PDAs mit GPS-Empfänger oder Smartphones genutzt. Ähnliche Zielsetzungen, aber unter Einbindung weiterer technischer Komponenten (Magnetometer, Beschleunigungsmesser, barometrischer Höhenmesser), verfolgten die Projekte PANORAMA16 und SARFOS17 (LECHNER 2006). Rezente Anwendungen mit bereits semi-operationellem Status finden sich bei Fahrzeugassistenzsystemen, die Unfallsituationen loggen und automatisch unter Positionsangabe Hilfe anfordern (vgl. MARTINEZ et al. 2010).

Im Unterschied zu existenten Anwendungen verknüpfen sich mit dem oben genannten Szenario jedoch partiell andere Anforderungen:

- Beim Klettern ist die vertikale Bewegungsrichtung dominant. Der Z-Komponente der Positionsdaten kommt erhöhte Bedeutung zu.
- Das Visualisierungsmodul kann sich nicht auf ein GIS-Modell stützen, in dem Geobjekte primär aus der Kartensicht gespeichert und visualisierbar sind. Primäre Georeferenz muss ein texturiertes Wandmodell sein.
- Die Positionsübermittlung muss dynamisch und autonom sein. Abschattung in der Felswand erfordert einen autonomen Verbindungsaufbau des Mobilgerätes bei Übertragungsunterbrechungen.
- Gleichzeitig ist die GPS-Positionsbestimmung in der Felswand durch wechselnde Satellitensichten und Multipathing von sehr heterogener Qualität, wodurch eine Nachbearbeitung (Filterung) der Positionsdaten erforderlich wird.

Im Sinne guter Operationalisierbarkeit, aber auch aus Kostengründen wurde das vorliegende prototypische System mit Standardkomponenten realisiert. Gerätetechnisch besteht es aus einem Smartphone mit GPS-Funktionalität, einem Positionsdatenserver und einem handelsüblichen Client-Rechner, dessen 3D-Visualisierungssoftware mit zusätzlichen PlugIns ausgerüstet wurde.

2 Das Systemkonzept

Das zu realisierende System besteht aus den Komponenten der Abbildung 1. Die Komponenten sollen zunächst kurz charakterisiert werden:

(1) Mobiler GPS-Empfänger mit Positionssender

Das Rettungsteam ist über eine permanente Mobilfunkverbindung mit einem zentralen Datenserver verbunden. Die in festen Intervallen bestimmten GPS-Daten werden ohne Nutzerinteraktion über die Mobilfunkverbindung an einen Server versandt.

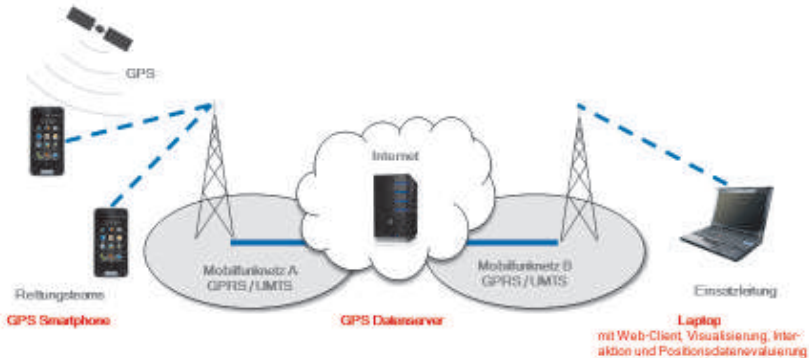


Abb. 1: Das Systemkonzept.

(2) GPS-Datenserver

Dieser zentrale Datenserver verwaltet alle eingehenden Positionsdaten in einer Datenbank. Über die Datenbankschnittstelle findet die notwendige Koordinatentransformation aus dem globalen GPS-Koordinatensystem in das für das Wandmodell benutzte Landeskoordinatensystem (hier Österreichisches Bundesmeldenetz) statt.

(3) Web-Client zur Abfrage dynamischer Positionsdaten

Über das implementierte Webinterface des Datenservers werden in zu definierenden Intervallen die vorhandenen Positionsdaten abgefragt und vom Web-Client, der auf dem Laptop der Einsatzleitung implementiert wurde, zwischengespeichert.

(4) Visualisierungsmodul

Dieser Modul stellt die zentrale Verarbeitungskomponente auf dem mobilen Rechner der Einsatzleitung dar. Die 3D-Darstellung wurde auf Basis des VR-Systems TUCAN realisiert. In das Felswandmodell lassen sich zur besseren Orientierung Kletterrouten einblenden. In diesem Kontext findet auch die Positionsdarstellung der dynamisch abgerufenen GPS-Daten statt. Ein spezielles User-Interface gestattet ein effektives Navigieren.

(5) Positionsdatenevaluierung

Das Positions-Evaluations-Modul prüft und filtert eingehende Positionsdaten. Da dem Modul neben dem Datenstrom der Positionsdaten auch die Modellgeometrie zur Verfügung stehen muss, wurde er als PlugIn zur TUCAN-Software implementiert.

Der Datenfluss innerhalb des Projektes lässt sich in Verbindung mit Abbildung 2 beschreiben: Das offline erzeugte Geländemodell wird mit dem bereitgestellten VR-System angezeigt (1), (2). Die Interaktion mit diesem System erfolgt über eine mittels XML-Datei generierbare Benutzeroberfläche (3). Die vom Smartphone gesendeten Daten werden in der Serverdatenbank angelegt

(4). Das Web-Interface steuert die Datenbereitstellung vom Server (6). Für die angeforderten Daten wird eine Transformation in das Landeskoordinatensystem des Zielgebietes (5) vorgenommen. Die ankommenden GPS-Datensätze durchlaufen einen abschließenden Filterschritt mit dem Ziel, nur solche Daten anzuzeigen, die einer Plausibilitätsprüfung genügen (7), (8).

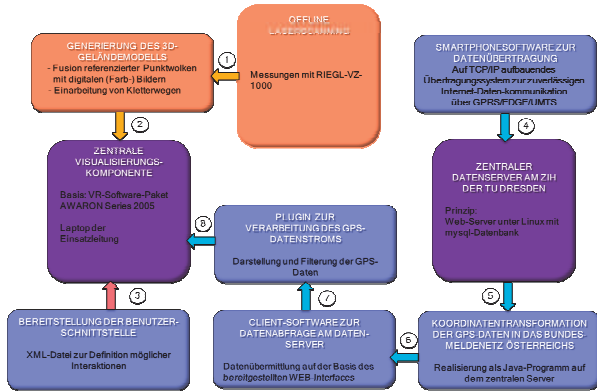


Abb. 2: Datenfluss.

3 Datenfluss im System

Eine sichere und verlustfreie Übertragung der GPS-Positionsdaten zum Server stellt eine wesentliche Komponente dar. Ist die bereitgestellte Software aktiv, erfolgt die Datenübertragung ohne Benutzereingriffe. Besteht temporär keine Mobilfunkverbindung, werden die Daten auf dem Smartphone zwischengespeichert und bei Netzverfügbarkeit automatisch nachträglich versendet. Abbildung 3 zeigt in Anlehnung an das Modell aus Abbildung 1 die verwendeten Softwareplattformen im Bereich des Mobilgerätes und auf dem Server.

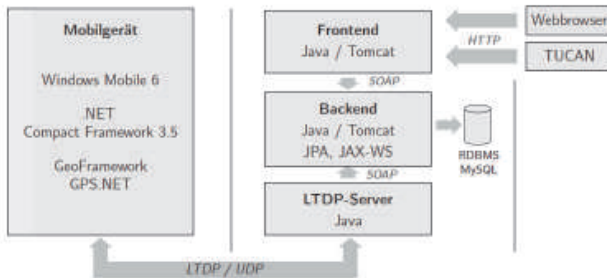


Abb. 3: Implementierung der Einzelkomponenten.

Die dazu notwendigen Entwicklungsarbeiten wurden im Rahmen einer Diplomarbeit am Lehrstuhl Rechnernetze der Fakultät Informatik der TU Dresden durchgeführt (EHLERT 2010).

Für die Implementierung auf der Mobilseite wurde durch die Firma Garmin, Deutschland, ein Smartphone vom Typ Garmin-Asus Nüvifone M10 zur Verfügung gestellt. Die Software auf dem Mobilgerät wurde in C# basierend auf dem .NET Compact Framework 3.5 unter Nutzung der Native Power-Management-API von Windows Mobile und den Bibliotheken GeoFramework 3 und GPS.NET 4 entwickelt. Daraus resultiert die in Abbildung 4 dargestellte Benutzeroberfläche auf dem Mobilfunkgerät.



Abb. 4: Benutzeroberfläche auf dem Mobilfunkgerät: links Hauptbildschirm, rechts Konfigurationsdialog.

Webservices und ein Web-Frontend sind Java-Applikationen, die in Verbindung mit dem Tomcat-Server arbeiten. Das Backend sorgt für die persistente Speicherung der Positionsdaten in einer Datenbank und stellt Schnittstellen zu diesen Daten als Webservices zur Verfügung. Das Frontend greift per SOAP auf die Daten des Backends zu und stellt die Schnittstelle zur 3D-Visualisierung sowie eine Bedienoberfläche im Webbrowser zur Verfügung.

Zur Realisierung der Übertragungsstrecke zwischen dem Mobilgerät des Retters und dem Server wurde ein spezielles UDP-basiertes, optimiertes und bandbreitenminimales Protokoll entwickelt, das als „Location Tracking Datagram Protocol“ (LTDP) bezeichnet wird. Es übernimmt die Codierung und Decodierung der übertragenen Daten und deren Übergabe an die Anwendungsschicht, sichert die Zuverlässigkeit der Datenübertragung und regelt Authentifizierung und Session-Management.

4 Das Felswandmodell

Für die Fernunterstützung der Bewegung in der Wand ist ein präzises 3D-Felswandmodell ein Schlüsselement. Als hervorragend geeignetes Studienobjekt wurde die Dachsteinsüdwand in der Obersteiermark ausgewählt. Sie stellt eine auf einer Breite von mehreren Kilometern über 800 Höhenmeter aufragende Wand dar. Die Wand kulminiert in drei markanten Gipfeln, von West nach Ost Torstein (2948 m), Mitterspitz (2925 m) und Hoher Dachstein (2995 m), und setzt sich bei fallenden Höhen über die Dirndln (2818 m) bis zum Hunerkogel (2687 m) fort.

Konventionelle digitale Geländemodelle können extreme Steilräume nur unzureichend abbilden:

- Sowohl eine aerophotogrammetrische wie auch eine auf flugzeuggestütztem Laserscanning basierende Herstellung führen zu einer starken projektiven Verkürzung, so dass Felswände nur mit wenigen, unsicheren Punkten abgetastet werden.
- Konventionell erstellte Geländemodelle mit vertikaler Sicht auf den Untersuchungsraum können Hinterschneidungen und Überhänge im Fels nicht wiedergeben.

Für die vorliegende Aufgabe kam daher nur eine Neuaufnahme in Frage. Das geometrische Primärmodell wurde so erstellt, dass die südexponierte Wand mit einem terrestrischen Laserscanner von zwei südlich vorgelagerten Gipfeln aufgenommen wurde, dem Mitterstein (2097 m) und dem Marstein (1861 m). Gerätestandorte in mittlerer Wandhöhe (ca. 2400 m) wären ideal gewesen, aber nicht vorhanden. Dennoch konnte näherungsweise ein „Steep Slope Model“ erzeugt werden, bei dem die Aufnahmerichtung an der Normalen der Wandfläche ausgerichtet ist (BUCHROITHNER 2002). Die lokale Topographie erlaubt von oben genannten Punkten eine Aufnahme des Targets in Distanzen bis ca. 2,5 km (z.B. Entfernung Mitterstein – Hoher Dachstein: 1,3 km). Die Oberfläche wird von den Messstandpunkten aus unter Vertikalwinkeln von ca. -10° bis 45° in einem horizontalen Fächer von ca. 90° gescannt. Die sehr spezifischen Anforderungen an die Messungen konnten durch den genutzten Scanner RIEGL LPM 321 erfüllt werden. Das Gerät, welches nach dem Impulslaufzeitverfahren arbeitet, ist für anspruchsvolle Messumgebungen ausgelegt, kann von einer Person ohne PC-Kopplung bedient werden und besitzt eine sehr hohe Reichweite von bis zu 6000 m, die bei Messsystemen auf Phasendifferenzbasis nicht erreicht werden. Zusätzlich zum Scan erlaubte die Gerätekonfiguration eine Bildaufnahme, die im Postprocessing den Laserpunkten RGB-Werte zuordnet. Für die digitalen Photographien der Wand diente eine Nikon D100 mit kalibrierten Objektiven. Die Gerätestandpunkte wurden mit DGPS eingemessen. Zusätzlich konnten weitere Geländepasspunkte genutzt werden, die zuvor mit einem Laser-Tachymeter-Theodolit Wild-Leica TCR 1103 und Prismenreflektoren aufgenommen worden waren. Die Durchführung der Messungen wurde freundlicherweise von Herrn Thomas Geisecker (Fa. Riegl, Horn, Austria) und Herrn Klaus Habermann unterstützt.

Bei weit entfernten Zielpunkten wird die Wandoberfläche mit Laserpunkten von wenigen Dezimetern Durchmesser beleuchtet. Schon aus der geometrischen Konfiguration müssen sich Punkt-lagefehler in dieser Größenordnung ergeben. Eine Alternative zum gewählten Messaufbau, jedoch Aufwand- und Kosten-bedingt verworfen, hätte in einem horizontal orientierten Scan aus einer Hubschrauber- oder Flugzeugbefliegung parallel zur Wand gelegen.

Das Wandmodell konnte nun aus den zwei Scans mit dazugehörigen Bilddaten generiert werden. Die Prozessierung der Daten erfolgte in der firmeneigenen RiProfile-Software. Im Ergebnis wurde ein die Dachsteinsüdwand umgebender Felsbereich mit einer Breite von ca. 3 km und einer Höhererstreckung von ca. 1 km als Geometrie in drei Teilen mit unterschiedlichen Auflösungen im vrml-Format herausgeschrieben.

Dieses Gesamtmodell bestand bei einer Detaillierung von 1 m pro Pixel aus ca. 6 Millionen Polygonen und bei 2 m pro Pixel aus ca. 1 Million Polygonen. Dabei wurden die Scanpunkte des Modells einmal in der Texturfarbe eingefärbt und zusätzlich passfähige Texturkacheln erzeugt.

Der Folgeschritt bestand in der Anpassung des 3D-Wandmodells an rechentechnische Erfordernisse. Am Ende wurde ein Gesamtmodell mit variabler Maschenweite, bestehend aus 2,5 Millionen Polygonen, gewählt, bei dem keine Texturen zum Einsatz kommen und dessen Scenegrph in Hinblick auf nachfolgend beschriebene Auswertalgorithmen optimiert wurde (vgl. Abb. 5).



Abb. 5: Das 3D-Geländemodell (links) im Vergleich mit einer photographischen Aufnahme (rechts).

5 Dynamische Visualisierung der Position des Bergretters

5.1 Bestandteile des Visualisierungsmoduls

Auf dem Laptop der Bergrettung läuft das VR-Programm TUCAN, welches eine API bereitstellt, über die zusätzliche PlugIns implementiert und eingebunden werden können. Applikationsspezifisch wurde ein PlugIn geschaffen, welches die aktuelle Position des Bergretters im Modell darstellt. Die Positionsdaten werden über ein oben beschriebenes Web-Interface vom Server abgeholt. Die Lokalisierung des Retters in nahezu Echtzeit könnte mit der vorgestellten Lösung bei geringem Zusatzaufwand um eine Lokalisierung der zu suchenden Position ergänzt werden, sofern diese Person vor Start der Tour mit einem baugleichen Gerät ausgestattet wird.

Da die Kapazitätsgrenze des VR-Programms durch das geladene Modell bereits erreicht ist, wurde die Kommunikation in ein separat laufendes (Java-)Programm ausgelagert. Dieses ruft die Daten in Intervallen von wenigen Sekunden vom Server ab. Serverseitig werden die GPS-Daten dabei in Koordinaten des Österreichischen Bundesmeldenetzes umgerechnet, in welchem auch das 3D-Modell vorliegt. In diesem Java-Programm werden die Daten nochmals gepuffert, weil bei Wiederherstellung der Verbindung nach Netzunterbrechungen zwischen Nüvifone und Server bzw. Server und Laptop mehrere Datensätze auf einmal eintreffen könnten.

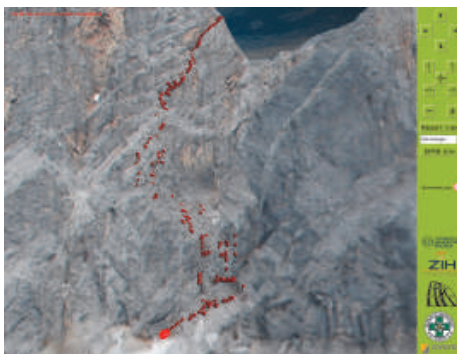


Abb. 6: Modell mit dargestellten GPS-Daten und Bedienoberfläche.

Das PlugIn des VR-Programms ruft über eine lokale Socketverbindung die Datensätze einzeln von dem Java-Programm ab und verarbeitet diese. Ziel ist dabei, einen Marker zu setzen bzw. zu verschieben, der die jeweils aktuelle Position beschreibt. Außerdem werden nach jeweils ca. 10 zurückgelegten Metern weitere kleinere Marker gesetzt, um den bisherigen Weg zu dokumentieren (siehe Abb. 6).

5.2 Plausibilitätstest für die Positionsdaten

Da sich der Retter nicht im freien Gelände, sondern an einer steilen Felswand und zum Teil sogar in Spalten und Kaminen mit starker Horizontabschattung bewegt, kommt es zu nicht modellierbaren Reflexionen und Abschattungen des GPS-Signals, wodurch eine gewisse Anzahl der übermittelten Koordinaten grob falsch ist und diese ausgefiltert werden müssen. Der Filterprozess berücksichtigt in der aktuellen Version zwei Kriterien: absoluten Abstand zur Oberfläche (Felswand) und relative Distanz zu plausiblen Vorgängerpunkten. Zunächst wird der Abstand eines jeden Punktes zur Wandoberfläche ermittelt und bei Überschreiten eines vorgegebenen Grenzwertes ignoriert. Es treten aber Fälle auf, bei denen ein Punkt zwar wandnah, aber fernab der vorherigen Punkte liegt. Deshalb wird überprüft, ob die aktuelle Position in der angegebenen Zeit bei Annahme einer festgelegten maximalen Geschwindigkeit von der vorigen Position aus erreicht werden kann. Ist das nicht der Fall, wird der Punkt ignoriert und der Folgepunkt nach dem gleichen Schema überprüft.

Diese Form einer relativen Positionsprüfung setzt voraus, dass bereits akzeptierte Punkte korrekt ermittelt wurden. Diese Annahme kann zumindest beim Einstieg in die Wand als gegeben angesehen werden, weil hier einige genau vermessene Punkte passiert werden, über die eine korrekte Initialisierung des Tracks verifiziert werden kann. An diesen signalisierten Einstiegspunkten kann softwareseitig zudem eine Kalibrierung der Höhenkoordinate erfolgen. Diese Herangehensweise hat sich in den Praxistests (vgl. Kapitel 6) bewährt.

5.3 Konsistente Darstellung der Positionsdaten

Erfüllt ein Punkt die geometrischen Kriterien, so wird er aufgrund der Modell- und Positionsfehler zumeist nicht exakt auf der Wand liegen. Ein Punkt im Innern des Fels ist zudem im Modell nicht sichtbar. Die Visualisierung bedarf daher eines „Snapping“ auf die Wandoberfläche. Dabei wird jener Punkt auf der Oberfläche ermittelt, welcher der übermittelten Position am nächsten ist. Dieser wird als aktuelle Position dargestellt.

Die Oberfläche des Fels bildet im 3D-Modell ein Polygonnetz. Zur Ermittlung des Punktes auf dieser Fläche, welcher dem übermittelten Punkt am nächsten ist, werden über die API des VR-Programms nacheinander die IDs der Polygone und über diese ihre Knoten abgefragt. Anschließend wird der Fußpunkt des Lotes auf die Polygonflächen, bzw. auf die Seiten des Polygons bzw. der Abstand zu den einzelnen Eckpunkten ermittelt. Bei der Optimierung dieses Prozesses stellte sich heraus, dass die iterative Ermittlung der Polygon-IDs der mit Abstand zeitaufwändigste Teil ist. Aus diesem Grunde wurde dieser Vorgang bereits beim Starten des PlugIn einmalig durchgeführt und die entsprechenden IDs in einen Vektor geschrieben, auf dessen Komponenten schnell zugegriffen werden kann, ohne die API zu bemühen. Dies ist möglich, da sich das Modell der Felswand während der Arbeit natürlich nicht verändert.

Um die Navigation im Modell zu erleichtern, wurde eine Bedienoberfläche eingefügt, welche über Buttons das Verschieben, Drehen und Skalieren und somit die Veränderung des Ansichtspunktes erlaubt. Außerdem ist es möglich, die verschiedenen Kletterrouten ein- bzw. wieder auszublenden.

6 Praxistest des Gesamtsystems

Im August 2011 wurde mit Bergrettern aus Ramsau (Steiermark) unter kritischen Wetterbedingungen eine Rettungsübung in der Dachsteinsüdwand durchgeführt. Der ohne Sicht operierende Retter konnte im virtuellen Modell geortet und von der Einsatzleitung dirigiert werden. In dem vierstündigen Einsatz konnte die Tauglichkeit des Systems in Bezug auf Positionierungsgenauigkeit und Zuverlässigkeit der eingesetzten Hard- und Softwarekomponenten bestätigt werden. Die Möglichkeiten, die ein solches System zur Verbesserung der Sicherheit und Logistik von Bergrettungseinsätzen im Hochgebirge erbringen kann, wurden von allen Beteiligten positiv eingeschätzt.

Neben einer wünschenswerten Verfeinerung des Felswandmodells mittels effizienter Aufnahmetechniken und unter Minimierung des entstehenden Datenvolumens besteht weiterer Forschungs- und Entwicklungsbedarf zur Nachbearbeitung der partiell ungenauen GPS-Signale aus einem Gerät der „Consumer-Klasse“ mit dem Ziel einer verbesserten Positionierungssicherheit.

Das Gesamtprojekt wurde von der SICHTZEIT Film- und TV-Produktion mit der Kamera begleitet. Dabei entstand der für den ORF produzierte 30-minütige Filmbeitrag "Einsatz in der Südwand – die neue Dimension der Bergrettung".

7 Ausblick

Im vorgestellten System wurden erfolgreich anwendungsspezifisch erhobene und aufbereitete Geodaten, dynamische Positionsdaten sowie eine funktional erweiterte Visualisierungskomponente gekoppelt, um ein prototypisches Bergrettungsassistenzsystem zu schaffen. Um den speziellen Anforderungen gerecht zu werden, mussten neue Datengrundlagen (3D-Wandmodell) und neue technische Lösungen geschaffen werden: Software-seitig betrifft das das Smartphone, den Positionsdatenserver, die Visualisierungslösung und die Kommunikation der Komponenten. Der Zielsetzung einer weitestgehenden Verwendung von handelsüblichen Komponenten konnte entsprochen werden. Ebenso ist das System problemlos auf andere Gebiete übertragbar, sofern ein entsprechendes 3D-Wandmodell geschaffen wird und Mobilfunkabdeckung gewährleistet ist. Folgende Systemergänzungen werden als sinnvoll angesehen und angestrebt:

- Möglichkeit des individualisierten Trackings sowohl für Retter als auch für Kletterer (z.B. über die Ausleihe eines konfektionierten Smartphones vor Tourbeginn)
- Ergänzung des Felswandmodells um zusätzliche nicht-bildliche, kategorisierte Objekte (alle Sicherungskomponenten im Fels, günstige Durchstiege, besonders gefährliche Partien z.B. aufgrund Steinschlaggefahr).

Es fehlt aus Zeitgründen bisher auch noch eine valide Prüfung der geometrischen Qualität des 3D-Felswandmodells. Aus der Aufnahmekonfiguration lässt sich eine starke Qualitätsstreuung innerhalb der Modellsegmente vermuten. Aufbauend auf einer systematischen Analyse wären

Modellverbesserungen sinnvoll. Diese könnten in lokalen Modellergänzungen im Bereich sichtbarer Räume, in sekundären Punktlagekorrekturen und lokalen Verdichtungen liegen. Ein solches evaluiertes und verbessertes Wandmodell kann allerdings zahlreiche sinnvolle Anwendungen bedienen: sowohl statische wie animierte Ausgabeformen für Tourismusmarketing, Kletterführer und für Lehrzwecke sind vorstellbar.

8 Literatur

- ABELLÁN, A., VILAPLANA, J.M. & MARTÍNEZ, J. (2006): Application of a long-range Terrestrial Laser Scanner to a detailed rockfall study at Vall de Núria (Eastern Pyrenees, Spain). - *Engineering Geology*, **88**(3-4), S. 136-148.
- BRILL, M. (2009): *Virtuelle Realität, Informatik im Fokus*, Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg, 186 S.
- BUCHROITHNER, M. F. (2002): „Creating the Virtual Eiger North Face“. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, **57**, S. 114-125.
- EHLERT, G. (2010): *Zuverlässige GPS-Datenübermittlung in der alpinen Bergrettung*. Diplomarbeit an der Fakultät für Informatik der TU Dresden, Betreuer: Prof. Dr. A. Schill, 117 S.
- HEIMANN, K., VAJEN, H.-H. (2002): E-Kit. Mobiles Notrufsystem gibt Sicherheit. *DLR-Nachrichten*, **103**(Juli 2002), S. 12-13.
- LECHNER, W. (2006): *Search and Rescue Forward Operation Support System - Status Report*. http://esamultimedia.esa.int/docs/NavigationProjects/SARFOS_FP.pdf.
- MANSFELD, W. (2010): *Satellitenortung und Navigation: Grundlagen, Wirkungsweise und Anwendung globaler Satellitennavigationsysteme*. 3. Auflage. Vieweg+Teubner, 380 S.
- MARTINEZ, F. J., CHAI-KEONG, T., CANO, J.-C., MANZONI, P. (2010): *Emergency Services in Future Intelligent Transportation Systems Based on Vehicular Communication Networks*. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, **6**(Summer 2010), S. 7-20.
- ORLAMÜNDER, D., MASCOLUS, W. (2006): *Computergrafik und OpenGL*, Carl Hanser Verlag München/Wien, 2006, 319 S.
- PARAMOUNT (2005): *PARAMOUNT Project-Homepage*. <http://www.paramount-tours.com/>.

Datenintegration in dienstbasierte 3D-Geovisualisierungssysteme für mobile Geräte

JAN KLIMKE¹ & JÜRGEN DÖLLNER²

Zusammenfassung: 3D-geovirtuelle Umgebungen (3D GeoVE) als eine universelle Repräsentationsform für 3D-Geodaten stellen eine grundlegende technische Komponente von 3D-Geoinformationssystemen dar. Virtuelle 3D-Stadtmodelle bilden die Modellgrundlage für eine wachsende Zahl von Anwendungen in unterschiedlichen Bereichen, wie z.B. Navigation, Stadtplanung, Katastrophenmanagement u.a. In diesem Beitrag stellen wir einen serviceorientierten Ansatz für die Implementierung von interaktiven 3D-Geovisualisierungssystemen für massive, virtuelle 3D-Stadtmodellen auf mobilen Geräten vor. Das besondere Kennzeichen des Ansatzes ist, dass der den Umfang und die Modellkomplexität eines virtuellen 3D-Stadt- und Landschaftsmodells vom Umfang der übertragenen Geodaten und dem clientseitigen Renderingaufwand entkoppelt, so dass eine Nutzung von virtuellen 3D-Stadtmodellen auf mobilen Geräten möglich wird.

Um eine anwendungsgerechte Nutzung eines Visualisierungssystems für virtuelle 3D-Stadtmodelle zu ermöglichen, ist es nötig zusätzliche 2D- und 3D-Fachdaten in die Visualisierung zu integrieren. Die verschiedenen Möglichkeiten solche Datenquellen an ein solches serviceorientiertes Visualisierungssystem anzubinden werden im zweiten Teil des Beitrages erörtert.

1 Einleitung

3D-geovirtuelle Umgebungen (3D GeoVE) sind eine leistungsstarke, universelle Repräsentationsform für 3D-Geodaten; sie stellen eine grundlegende technische Komponente für 3D-Anwendungen und 3D-Geoinformationssysteme dar. Virtuelle 3D-Stadtmodellen bilden dabei im Allgemeinen die Modellgrundlage für eine wachsende Zahl von Anwendungen und Systemen in unterschiedlichen Bereichen, wie z.B. Navigationssysteme, Simulationssysteme, CAD-Systeme oder Desastermanagementsysteme. Heutige 3D-Geovisualisierungssysteme beruhen im Allgemeinen auf clientseitigem 3D-Rendering und erfordern daher für jedes Nutzersystem leistungsstarke 3D-Grafikhardware und halten Modelldaten lokal vor, die z.B. über Streamingverfahren bereitgestellt werden. Die zunehmende Verbreitung von mobilen Geräten wie Smartphones oder Tablet-PCs hat die Art, in der digitale Inhalte heute verbreitet und genutzt werden, maßgeblich beeinflusst. Mehr und mehr Inhalte werden heute neben dem konventionellen Weg über Webbrowser oder Clientanwendungen auch speziell für mobile Geräte bereitgestellt. Mit Blick auf 3D-Geovisualisierungssysteme und virtuelle 3D-Stadtmodelle ist eine solche interaktive Bereitstellung von Visualisierungen auf mobilen Geräten eine besondere Herausforderung, da für diese Geräteklasse Beschränkungen hinsichtlich des verfügbaren Speichers sowie der verfügbaren Prozessor- und Grafikleistung bestehen.

In der Vergangenheit wurden Ansätze für die 3D-Visualisierung von Geodaten auf mobilen Geräten (NURMINEN, 2008, QUILLET 2006, JIANG et al. 2009) vorgestellt. Weitere Ansätze sind wie

1) Jan Klimke, Hasso-Plattner-Institut, Universität Potsdam, Prof.-Dr.-Helmert-Str. 2-3, 14482 Potsdam, jan.klimke@hpi.uni-potsdam.de

2) Jürgen Döllner, Hasso-Plattner-Institut, Universität Potsdam, Prof.-Dr.-Helmert-Str. 2-3, 14482 Potsdam, doellner@hpi.uni-potsdam.de

Google Earth¹, Paris3D² oder upNext³ sind kommerziell für mobile Plattformen verfügbar. Typische Beschränkungen von existierenden Lösungen sind fehlende Nutzung der semantischen Bezüge in virtuellen 3D-Stadtmodellen, die fehlende Nutzung von modernen computergrafischen Verfahren für das Rendering oder eine nicht ausreichende vollständige Interaktivität dieser Systeme. Insofern besteht eine spezielle Herausforderung darin, massive, virtuelle 3D-Stadtmodelle so auf mobilen Geräten bereitzustellen, dass a) dem Nutzer eine computergrafisch hochqualitative Visualisierung der 3D-Geodaten geboten werden kann, b) das Modell für den Nutzer vollständig interaktiv erfahrbar ist und c) die zugrundeliegenden Fachdaten gleichrangig zu den 3D-Geometriedaten visuell repräsentiert werden.

In diesem Beitrag stellen wir einen allgemeinen Ansatz für die Implementierung von 3D-Geovisualisierungssystemen vor, der wesentlich dadurch gekennzeichnet ist, dass er die Komplexität des Modells von der Komplexität der Geodatenübertragung entkoppelt. Das System basiert auf einem 3D-Portrayalservice, der bildbasierte Repräsentationen des virtuellen 3D-Stadt- und Landschaftsmodells in Form virtueller Panoramen erzeugt. Der Service kapselt die Modellhaltung und das 3D-Rendering für die im Allgemeinen massiven Daten eines solchen Modells auf Serverseite. Clientanwendungen werden dadurch von diesen speicher- und rechenintensiven Aufgaben entlastet, da sie ausschließlich auf die generierten virtuellen Panoramen operieren. Dadurch können komplexe virtuelle 3D-Stadtmodelle und 3D-Landschaftsmodelle auch auf mobilen Geräten, bzw. generell auf Geräten, mit stark eingeschränkten Ressourcen, bereitgestellt werden.

Für eine effektive Nutzung von 3D-Geovisualisierungssystemen zur Kommunikation von Geoinformationen ist es von entscheidender Bedeutung, ein solches Visualisierungssystem flexibel mit 2D- und 3D-Fachdaten anzureichern. In Abschnitt 3 gehen wir daher auf Möglichkeiten ein, solche Daten effizient, konfigurierbar und gezielt in die 3D-Visualisierung zu integrieren.

2 Servicebasierte Visualisierung für virtuelle 3D-Stadtmodelle auf mobilen Geräten

Serviceorientierte Architekturen stellen ein Paradigma für das Design und die Implementierung von Softwaresystemen dar. Der grundlegende Gedanke ist ein lose Kopplung der funktionalen Komponenten eines Softwaresystems, den sogenannten Services (PAPAZOGLU et al. 2007). Die funktionale Abgeschlossenheit der Komponenten führt zu einer vereinfachten Wiederverwendung von bestehenden Services und ermöglicht somit eine effizientere Erstellung und einen robusteren Betrieb von Anwendungen auf dieser Basis. Voraussetzung für eine solche Service-Interoperabilität ist die Definition von Standards für deren Schnittstellen und Formate für den Datenaustausch.

¹<http://www.google.com/mobile/earth/>

²<http://www.mobile3dcity.com/>

³<http://www.upnext.com/>

Für den Bereich der Geoinformation wurden hierzu durch das *Open Geospatial Consortium* (OGC) als internationale Standardisierungsorganisation zahlreiche Standards für Schnittstellen und Formate zur Kodierung und zur Arbeit mit Geodaten festgelegt.

Viele durch das OGC standardisierte Services zur Verwaltung von Geodaten (Web Feature Service, WFS), deren Verarbeitung (Web Processing Service, WPS) und 2D-Rendering (Web Map Service, WMS) sind bereits weit verbreitet. Es existiert eine Vielzahl von Implementierungen dieser Service-Schnittstellen, die als Basis für Anwendungen genutzt werden können.

Für die Visualisierung von 3D-Geodaten fehlen solche international akzeptierten und implementierten Standards bislang. Aktuell befinden sich zwei Vorschläge für sogenannte 3D-Portrayal-Services in der Diskussion innerhalb des OGC: Zum einen der Web 3D Service (*W3DS*) (SCHILLING & KOLBE, 2010), der Geometrirepräsentationen von 3D-Geodaten an Clients liefert und zum anderen der Web View Service (*WVS*) (HAGEDORN, 2010) der virtuelle Panoramen (Bildrepräsentationen der unterliegenden Geodaten) liefert. Die beiden Services kapseln jeweils unterschiedliche Teile der Visualisierungspipeline (CARD et al. 1990) für Geodaten. Ein W3DS implementiert die Filterung von Geodaten und das Mapping auf renderbare computergrafische Primitive (z.B. Dreiecke und Texturen). Ein WVS übernimmt zusätzlich das Rendering solcher computergrafischen Primitive und entlastet einen Client somit von dieser ressourcen- und energieintensiven Aufgabe. Insbesondere bei massiven, detailreichen 3D-Stadt- und Landschaftmodellen verlangt ein visuell ansprechendes Rendering von 3D-Geodaten nach leistungsstarker Grafikhardware und -software, um die umfangreichen Textur- und Geometriedaten verarbeiten sowie spezialisierte Shaderprogramme ausführen zu können.

Klassische Ansätze beruhen im Allgemeinen auf einer monolithischen Softwarearchitektur; die daraus resultierenden "schwergewichtigen" Clientanwendungen bringen hier entscheidende Nachteile mit sich:

- Massive 3D-Geodaten können nur mit hohem Aufwand auf Endbenutzersystemen übertragen, gespeichert und verwaltet werden.
- 3D-Renderingtechniken sind beschränkt auf die jeweils spezifischen 3D-Fähigkeiten von Client-Systemen. Sie können daher nicht für alle Nutzersysteme in gleicher Qualität garantiert werden.
- Implementierungen von 3D-Renderingtechniken müssen kompatibel zu einer sehr heterogenen Client-Hardware sein, um weite Verbreitung finden zu können bzw. robust betrieben werden zu können.
- Der Energieverbrauch von Endgeräten wird durch 3D-Rendering massiv erhöht. Dies beeinträchtigt insbesondere die Akkulaufzeit von mobilen Geräten.

Servicebasierte Geovisualisierung stellt deshalb eines der Kernkonzepte für die zukünftige Nutzung von virtuellen 3D-Stadtmodellen im Kontext von mobilen Geräten dar. Konzeptionell wird der Geovisualisierungsprozess so aufgeteilt, dass verschiedene Schritte zusammengefasst und von einem Service gekapselt werden. Auf diese Weise können Visualisierungsanwendungen erstellt werden, die optimal auf die Hardware, Software und Datenzugriffsrechte von verschiedenen Clientplattformen angepasst sind. Der Einsatz der bereits eingeführten 3D-Portrayal-Services bildet hier ein zentrales Element um 3D-Visualisierung von Geodaten effizient auf einer Vielzahl von Hardware- und Softwareplattformen anbieten zu können.

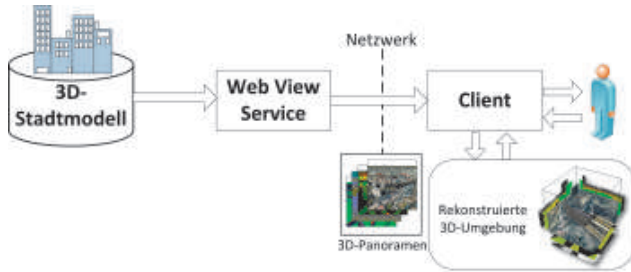


Abb. 1: Überblick über den Systemaufbau des servicebasierten 3D-Geovisualisierungssystems. Der Web View Service kapselt das Datenmanagement und das Rendering des 3D-Stadtmodells. Der Client fragt über ein Netzwerk 3D-Panoramen beim Service an und erstellt daraus eine Rekonstruktion der 3D-Umgebung.

Mobile Geräte wie Smartphones oder Tablet-PCs werden immer leistungsstärker in Hinblick auf ihre Rechen- und Grafikleistung. Dennoch sind viele der oben genannten Probleme gerade für die Visualisierung von sehr großen 3D-Geodaten auf mobilen Geräten ein großes Hemmnis. Bei geometriebasierten Ansätzen für das 3D-Rendering auf Clientseite stellt bei großen Modellen bereits die Übertragung von Geodaten an mobile Geräte eine große Herausforderung dar, da die Menge der übertragenen Geodaten sowie der Aufwand für das 3D-Rendering der Daten direkt abhängig von der Modellkomplexität (u. A. Umfang, Detailreichtum, Genauigkeit) ist. Das heißt, je größer das virtuelle 3D-Stadtmodell, desto mehr Daten müssen auch auf ein Clientsystem übertragen, gespeichert und verwaltet werden. Dies stellt insbesondere bei kabellosen Netzwerken ein Problem hinsichtlich der Zuverlässigkeit und des Datendurchsatzes dar. Weiterhin ist das 3D-Rendering von großen Geometrie- und Texturdaten auf mobilen Geräten besonders energieintensiv und verkürzt damit die Akkulaufzeit der Geräte drastisch. Daher muss es das Ziel beim Entwurf eines Visualisierungssystems sein, die zu übertragende und zu verarbeitende Datenmenge so zu reduzieren, dass ein sehr effizientes 3D-Rendering möglich ist.

Im Folgenden wird ein System vorgestellt, das die oben genannten Probleme löst, indem ein WVS zum Rendern von Panoramaansichten von virtuellen 3D-Stadtmodellen in Kombination mit einer entsprechenden Client-Anwendung verwendet wird, um Nutzern einen vollständig interaktiven Zugang zu 3D-Stadtmodellen auch auf mobilen Geräten zu gewähren. Die Client-Anwendung nutzt hierbei eine aus den virtuellen Panoramen abgeleitete, stark vereinfachte lokale 3D-Repräsentationen des unterliegenden virtuellen 3D-Stadtmodells. Diese leichtgewichtige, bildbasierte Repräsentation des Modells lässt sich sehr effizient rendern. Der wesentliche Aufbau des Gesamtsystems ist in Abb. 1 dargestellt.

2.1 Aufbau und Eigenschaften des WVS-Servers

Der WVS als Basis des Gesamtsystems kapselt den Zugriff auf 3D-Geodaten, deren Abbildung auf computergrafische Primitive und deren Rendering; er erzeugt Panoramen in Form von Cube-Maps. Diese können auf vielfältige Art und Weise konfiguriert werden. Zum einen lassen sich

über so genannte *Layer* (Informationsschichten) die zugrunde liegenden Informationen gezielt auswählen. Zum anderen können virtuelle Panoramen, die der WVS berechnet, auf Grundlage des G-Buffer-Konzepts (SAITO & TAKAHASHI, 1990), mit Zusatzinformationen, wie Tiefen-, Normalen- oder Objektidentitätsinformationen (Abb. 2), angereichert werden. Die Layer der Cube-Maps werden als Bild in Standardformaten, wie z.B. JPEG oder PNG, kodiert. Eine besondere Rolle besitzt der Objektidentitätslayer, da durch ihn im virtuellen Panorama jedes dargestellte Objekt rückverfolgt werden kann. Client-Anwendungen können auf dieser Basis z.B. Objekte interaktiv, z.B. durch Einfärbung, hervorheben.

Die Größe der durch den Renderingserver erzeugten kodierten Bilddaten hängt hauptsächlich von der Auflösung des angefragten Panoramas ab. Die Datenmenge ist jedoch unabhängig von der Komplexität des zugrundeliegenden Modells. Hierin liegt einer der zentralen Vorteile des serverseitigen Renderings: Es entkoppelt die Übertragungskomplexität von der Komplexität der unterliegenden Geodaten.

Die Software- sowie Hardwarekonfiguration des Renderingsservers kann durch den Service-Anbieter festgelegt werden. Dies ermöglicht es einem Anbieter, eine optimale Konfiguration des unterliegenden Systems in Hinblick auf die eingesetzten Renderingtechniken sicherzustellen. Auf diese Weise wird der Entwicklungsaufwand, den es im Allgemeinen bedarf, um eine komplexe Visualisierungstechnik für Endanwender bereitzustellen, stark verringert. Ebenfalls ist eine für den Service-Nutzer transparente Möglichkeit gegeben, weitere Renderingtechniken in ein Gesamtsystem zu integrieren und somit die Möglichkeiten zur Visualisierung zu erweitern, ohne dass die Endanwendung auf Clientseite verändert werden müsste.

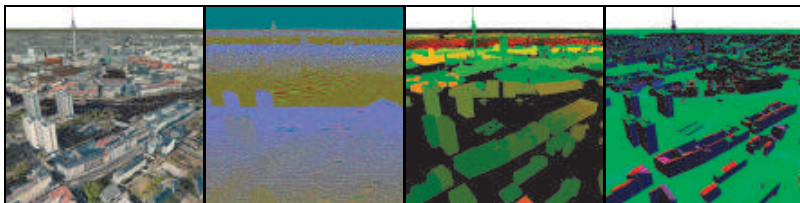


Abb. 2: Verschiedene Informationsschichten eines virtuellen Panoramas des Stadtmodells von Berlin kodiert als Farbinformation. Von links nach rechts: Bildlayer, Tiefenlayer (Entfernung von der virtuellen Kamera), Objektidentitätslayer, Normalen zu den einzelnen Bildpunkten

2.2 Aufbau und Eigenschaften des WVS-basierten Clients

Die Hauptaufgabe des zum WVS zugehörigen Clients besteht darin, die vom WVS gelieferten Panoramen interaktiv zu visualisieren. Der Client rekonstruiert bildbasiert die 3D-Szene aus einem im Client vorhandenen Panorama. In der einfachsten Variante stellt der Client ausschließlich die Cube-Map dar und ermöglicht die standortfixierte Interaktion in Panorama in Analogie zu handelsüblichen Panorama-Viewers. In unserem Ansatz wird eine erweiterte Variante implementiert, die pro Cube-Map-Seite aus den Farb- und Tiefeninformationen ein texturiertes Dreiecksnetz erstellt, sowie Objektidentitätsinformationen nutzt, um eine vollwertige Interaktion des Nutzers mit der bildbasierten Rekonstruktion zu ermöglichen.

Die Nutzerinteraktion des Clients ist weitgehend von der Antwortgeschwindigkeit des Rendering-Servers entkoppelt. Bewegt ein Nutzer die virtuelle Kamera, bewegt er sich in der entsprechend aufbereiteten 3D-Panoramageometrie; es werden während dieser Bewegung keine weiteren Anfragen an den WVS gesendet. Die Darstellung während der Kameranavigation dient dem Nutzer vorrangig zur Orientierung, wobei Abstriche in der Darstellungsqualität hier in Kauf genommen werden, da die vom Server abgerufenen Bildinformationen jeweils nur für den angefragten Kamerastandpunkt optimal sind. Stoppt die Interaktion des Nutzers, wird ein neues Panorama vom WVS-Server angefragt. Sobald das Panorama übertragen wurde, wird die Darstellung aktualisiert. Das heißt, aus Nutzersicht wird die Darstellung nach wenigen Sekunden verfeinert. Dabei ist jedoch jederzeit eine Interaktion mit dem System möglich. Abb. 3 zeigt ein mobiles Gerät mit der Clientanwendung.

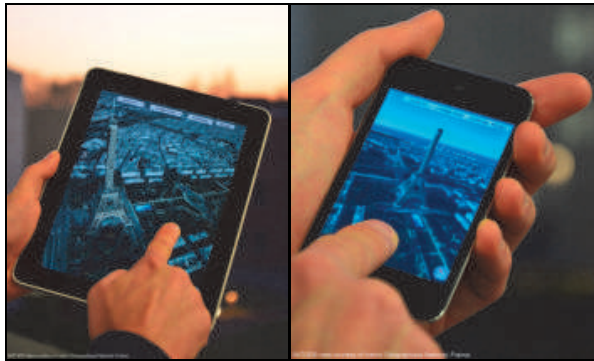


Abb. 3: Die interaktive Clientanwendung auf iPad und iPod touch ermöglicht dem Benutzer ein flüssiges Interagieren mit der leichtgewichtigen Rekonstruktion eines virtuellen 3D-Stadtmodells. Im Bild dargestellt ist das Pariser 3D-Stadtmodell (BATI3D©-Daten sind Eigentum des Institut Géographique National, France.)

3 Dienstbasierte Integration von Fachdaten in 3D GeoVEs

Für fachspezifische Anwendungen von 3D-GeoVEs ist es im Allgemeinen erforderlich, anwendungsspezifische Daten in die 3D-Visualisierung zu integrieren. Typische anwendungsspezifische Daten beinhalten:

- Kartenmaterial zur Texturierung des Geländemodells, bereitgestellt z.B. durch einen WMS;
- 3D-Featuredaten, z.B. Modelle von Planungsalternativen, bereitgestellt z.B. durch einen WFS oder W3DS;
- 2D-Featuredaten, z.B. Points-of-Interest, Flächen- oder Routeninformationen, bereitgestellt z.B. durch Open Location Services oder per WFS;
- Sensordaten, bereitgestellt z.B. durch einen OGC Sensor Observation Service

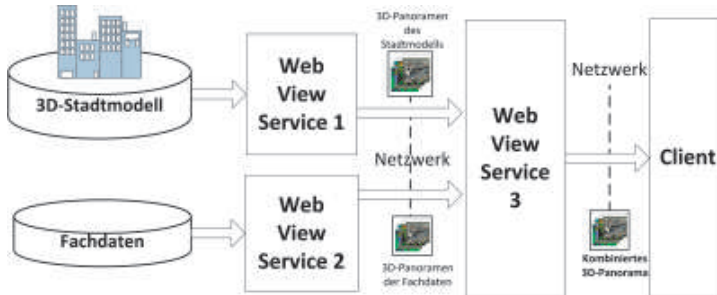


Abb. 4: Systemaufbau zur Datenintegration basierend auf der Nutzung mehrerer WVS-Instanzen und der Kombination von 3D-Panoramen

Die Integration von 2D- und 3D-Fachdaten in ein verteiltes Visualisierungssystem stellt eine Herausforderung dar: Einerseits sollen Fachdaten gezielt in die Visualisierung aufgenommen werden, andererseits müssen die heterogenen Datenquellen und die berücksichtigt werden. Clientanwendungen in unserem Ansatz verfügen nicht über vollständige Modellinformationen (u. a. Geometrie und Texturdaten), sondern basieren auf einer bildbasierten Modellrepräsentation. Dies beschränkt die Möglichkeiten z.B. für Berechnungen zur Platzierung von Beschriftungen oder Geometrirepräsentationen von Fachdaten.

3.1 Serverseitige Integration von Fachdaten in WVS

Die verteilte Architektur des hier vorgestellten Systems ermöglicht die Integration von Fachdaten in den einzelnen Komponenten. Eine Integration in den WVS-Server bietet sich dabei aus Effizienzgründen an. Bereitgestellte Fachdaten können direkt im serverbasierten Visualisierungsprozess für das Basis-Stadtmodell berücksichtigt werden. Da der Server in einer kontrollierten Umgebung operiert, sind Annahmen über die Speicher- und CPU-Ressourcen des Serversystems und über die Qualität der Anbindung an externe Services, die als Fachdaten zuliefern, in weit größerem Maße möglich als dies bei einem herkömmlichen Fat-Clientansatz der Fall ist. Allgemein hat eine serverseitige Integration und Visualisierung von Fachdaten in die ausgelieferten Panoramen den Vorteil, dass existierende Clientanwendungen ohne Modifikationen auch zur Visualisierung dieser Daten genutzt werden können. Es wird für die Anzeige auf Clientseite weder mehr Speicher noch mehr Performance für das 3D-Rendering benötigt. In den Renderingprozess des Servers können so unterschiedliche Fachdaten eingebunden und auf Geometrie des Stadtmodells abgebildet werden; jedoch sind dynamische Daten, wie z.B. Fahrzeugpositionen, weniger geeignet, da bei jeder Wertänderung ein neues Panorama vom Server angefordert werden müsste um den aktuellen Stand zu visualisieren.

Neben der direkten Integration von Fachdaten in den Renderingprozess des Servers ist auch eine rein bildbasierte Komposition mehrerer, separat erzeugter, virtueller Panoramen möglich. Dazu

rendert ein spezieller WVS-Server das Basis-Stadtmodell und ein anderer die Fachdaten (HAGEDORN et al., 2007). Da es sich um 3D-Panoramen dieser Daten handelt, ist jedoch das Problem der Verdeckung beim Verblenden der einzelnen Panoramen zu berücksichtigen. Dies ist möglich, indem zusätzlich zum Farbbild ein Tiefenbild in die Berechnung einbezogen wird: Anhand der jeweiligen Tiefenwerte pro Bildpunkt kann festgestellt werden, welcher der Bildpunkte der Quellbilder die Farbe des jeweiligen Bildpunktes im Zielbild bestimmen soll. Diese Art der Kombination von Daten in einem Panorama stellt eine sehr flexible Art der Datenintegration dar, da weder eine Modifikation des WVS-Servers noch des Clients nötig ist. Jedoch ist diese Art der Kombination von virtuellen Panoramen weniger effizient, da die Einzelpanoramen erst zu einem Kombinationsservice übertragen, dort dekodiert, kombiniert und anschließend wieder kodiert werden müssen (Abb. 4).

Ansätze für die Konfiguration der Visualisierung bei serverseitiger Integration von Fachdaten wurde bereits in der Literatur behandelt (BASANOW et al., 2008, NEUBAUER & ZIPF 2009).

3.2 Clientseitige Integration von Fachdaten

Um Fachdaten in die Visualisierung von 3D-Stadtmodellen aufzunehmen kann auch die Clientanwendung mehrere Panoramen kombinieren, wobei die zu übertragende Datenmenge entsprechend anwächst, was insbesondere bei der Anwendung auf mobilen Geräten problematisch ist. Weiterhin können die Daten nur durch eine erneute Anfrage für die Fachdaten an den WVS aktualisiert werden. Dies behindert auch hier die Visualisierung von dynamischen Daten.

In unserem Ansatz erzeugt der Client eine eigenständige Geometrie, so dass eine approximative geometrische Repräsentation im Client zur Verfügung steht. Der Client kann so Fachdaten auch selbst anfragen und diese visuell repräsentieren. Der Client hat dementsprechend die Möglichkeit, ein eigenes Datenmodell für die Fachdaten zu halten. Diese können dann durch erneute Abfrage der Datenservices aktualisiert werden. Die Integration in die 3D-Visualisierung des Clients mittels clientseitig generierter Primitive ist die einzige Möglichkeit um Animationen von Datenrepräsentationen effizient zu implementieren. Dementsprechend eignet sich diese Variante insbesondere für dynamische Daten wie z.B. Fahrzeugpositionen oder Sensordaten. Ein solches hybrides Rendering, das teils auf Bilddaten und teils auf dem Mapping und Rendering von Rohdaten basiert bietet damit eine größere Flexibilität bezüglich Animation und Interaktion mit den Fachdaten.

4 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

In diesem Beitrag haben wir ein System für die interaktive 3D-Geovisualisierung auf Basis von serverseitigem Rendering vorgestellt. Dieses System mit seiner serviceorientierten, verteilten Architektur bietet Lösungsansätze für die Herausforderungen bei der Visualisierung von virtuellen 3D-Stadtmodellen auf mobilen Geräten. Durch die Beschränkung auf den Austausch von virtuellen Panoramen, die in Standard-Bildformaten kodiert sind, ist es möglich sehr flexible Lösungen für hochqualitative Visualisierung von virtuellen 3D-Stadtmodellen anzubieten, ohne dass Anforderungen an Clientsysteme gestellt werden müssen, die über die Fähigkeiten von Standardhardware hinausgehen. Der implementierte Prototyp für ein solches Visualisierungssystem zeigt, dass eine interaktive Nutzung auf mobilen Geräten möglich ist.

Für 3D-Geoinformationssysteme basierend auf solchen servicebasierten Ansätzen ist es für die Nutzbarkeit weiterhin entscheidend, flexibel Fachdaten aus verschiedenen Quellen zu integrieren. Es wurden Möglichkeiten aufgezeigt, die verschiedenen Arten von Fachdaten in ein solches Visualisierungssystem zu integrieren.

Die durch die verteilte Architektur des Gesamtsystems ermöglichte Nutzung komplexer Panoramen auf mobilen Geräten bietet zugleich einen Skalierungsansatz für 3D-Geovisualisierungsdienste. Der vorgestellte servicebasierte Ansatz kann dabei ein Grundpfeiler für künftige verteilte, skalierbare 3D-Geovisualisierungssysteme darstellen, da er für zentrale Probleme heutiger Geovisualisierungssysteme, wie die Verteilung und Verarbeitung von 3D-Geodaten für die Visualisierung, die Diversität von Hard- und Software auf Clientseite, sowie die Verteilung und Wartung von Client-Anwendungen, Lösungen anbietet.

5 Literaturverzeichnis

- BASANOW, J., NEIS, P., NEUBAUER, S., SCHILLING, A. & ZIPF, A., 2008: Towards 3D Spatial Data Infrastructures (3DSDI) based on Open Standards Experiences, Results and Future Issues, *Advances in 3D Geoinformation Systems*, Springer, 2008, pp. 65-86.
- CARD, S., MACKINLAY, J. D. & SCHNEIDERMAN, B., 1999: *Readings in Information Visualization: Using Vision to Think*. s.l.:Morgan Kaufmann.
- DEL LA BEAUJARDIERE, J., 2004: *OGC Web Map Service Interface*. s.l.:Open Geospatial Consortium.
- HAGEDORN, B., 2010: *Web view service discussion paper*. s.l.:Open Geospatial Consortium.
- HAGEDORN, B., HILDEBRANDT, D. & DÖLLNER, J., 2009: *Towards Advanced and Interactive Web Perspective View Services*. s.l., Springer, pp. 33-51.
- HAGEDORN, B., MASS, S. & DÖLLNER, J., 2007: *Chaining Geoinformation Services for the Visualization and Annotation of 3D Geovirtual Environments*. s.l., s.n.
- HILDEBRANDT, D., KLIMKE, J., HAGEDORN, B. & DÖLLNER, J., 2011: *Service-Oriented Interactive 3D Visualization of Massive 3D City Models on Thin Clients*. New York, New York, USA, s.n.
- JIANG, W., YUGUO, W. & FAN, W., 2009: An Approach for Navigation in 3D Models on Mobile Devices, *Location Based Services and TeleCartography (2009)*, p. 109-114.
- NEUBAUER, S. & ZIPF, A., 2009: *3D-Symbology Encoding Discussion Draft, OpenGIS® Discussion Paper*
- NURMINEN, A., 2008: Mobile 3D City Maps. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 28(4), pp. 20-31.
- PAPAZOGLU, M. P., TRAVERSO, P., DUSTDAR, S. & LEYMAN, F., 2007: Service-Oriented Computing: State of the Art and Research Challenges. *Computer*, 40(11), pp. 38-45.
- QUILLET, J., THOMAS, G., GRANIER, X., GUITTON, P. & MARVIE, J., 2006: Using Expressive Rendering for Remote Visualization of Large City Models, Proceedings of the eleventh international conference on 3D web technology, ACM, New York, USA, pp 27 – 35.
- SAITO, T. & TAKAHASHI, T., 1990. Comprehensible Rendering of 3-D Shapes. *Computer*, 24(4), pp. 197-206.
- SCHILLING, A. & KOLBE, T., 2010: *Draft for Candidate OpenGIS® Web 3D Service Interface Standard*. s.l.: Open Geospatial Consortium.

OpenWebGlobe – Ein quelloffenes Software Development Kit zur Entwicklung virtueller Globen auf Basis von HTML5 und WebGL

BENJAMIN LOESCH¹, MARTIN CHRISTEN¹ & STEPHAN NEBIKER¹

Zusammenfassung: Existierende virtuelle Globen visualisieren gigantische Geodatenmengen und erlauben grundsätzlich auch die Integration eigener Inhalte, wie beispielsweise 3D-Gebäudemodelle. Die Erweiterung dieser kommerziellen Technologien um eigene Geobasisdaten (z.B. verbesserte, hoch detaillierte Höhenmodelle) oder um eigene Funktionalität ist jedoch sehr eingeschränkt. Das quelloffene OpenWebGlobe Software Development Kit (www.openwebglobe.org) ermöglicht die Realisierung massgeschneiderter, leistungsfähiger virtueller Globen mit lokalen bis globalen Geodatensätzen und eigener Funktionalität. Im vorliegenden Beitrag wird aufgezeigt, wie sich auf spezifische Bedürfnisse zugeschnittene 3D Geoportale mit Hilfe des OpenWebGlobe Software Development Kits (SDK) erstellen lassen, welche Inhalte unterstützt und eigene Bild- und Höhendaten integriert werden können. Zur Illustration werden zwei mit der OpenWebGlobe SDK entwickelte Applikationen vorgestellt.

1 Einleitung

Virtuelle Globen erwiesen sich in den letzten Jahren als mächtiges Werkzeug zur Visualisierung von Geobasisdaten wie Orthophotos und Höhenmodellen (NEBIKER, S., BLEISCH S. & GÜLCH E. 2010). Darauf aufbauend lassen sich verschiedenste Anwendungen realisieren, beispielsweise zur Positionüberwachung von Fahrzeugflotten (MARINELINK 2012), für Situationsübersichten im Tourismus (3DREALITYMAPS 2012) oder zur Darstellung geostatistischer Daten (BLEISCH 2011). Häufig werden kommerzielle virtuelle Globen wie Google Earth (GOOGLEEARTH 2012) als Grundlagetechnologie für solche Anwendungen verwendet. Möchte man für eine Anwendung aber eigene Geobasisdaten verwenden, stösst man bei der Integration derselben oftmals an Grenzen. Zwar lassen kommerzielle virtuelle Globen häufig die Verwendung eigener Orthophotos und Höhenmodelle zu, jedoch werden diese Daten immer zusätzlich zu den bestehenden Basisdaten geladen. Die bestehenden Datensätze sind weiterhin vorhanden, was zu Konflikten in der Darstellung führen kann, und ausserdem können die zusätzlichen Datensätze zu erheblich längeren Ladezeiten und schlechterer Performance in der Darstellung führen. Auch bei der Integration neuer auf spezifische Bedürfnisse zugeschnittener Funktionalität ist man eingeschränkt. Der bestehende Funktionsumfang lässt sich oftmals nicht beliebig erweitern oder anpassen. Ausserdem sind für kommerzielle Globen selten Informationen zu Updatezyklen der Daten vorhanden. Man hat daher keine Kontrolle über die Aktualität der Geobasisdaten und kann sich auch nicht darauf verlassen, dass zu einem bestimmten Zeitpunkt immer noch die gleichen Geobasisdaten verwendet werden.

¹ Benjamin Loesch, Martin Christen, Prof. Dr. Stephan Nebiker Fachhochschule Nordwestschweiz, Institut für Vermessung und Geoinformation, Gründenstrasse 40, 4132 Muttenz; E-Mail: {Vorname.Nachname}@fnw.ch

Das OpenWebGlobe Software Development Kit (SDK) bietet sich als alternative Basistechnologie für Anwendungen mit spezifischen Bedürfnissen in Bezug auf die Geobasisdaten und die Funktionalität an. Es ermöglicht einen virtuellen Globus mit eigenen Bild- und Höhendaten in eine eigene 3D-Webanwendung zu integrieren und so auch die Verbreitung zu kontrollieren. Die Datenhoheit der verwendeten Geobasisdaten und weiteren integrierten Informationen bleibt beim Auftraggeber oder Entwickler und die Daten können selbstbestimmt aktualisiert werden. Der Quellcode der SDK ist frei verfügbar. Es lassen sich beliebige eigene Funktionalitäten implementieren oder die bestehende Funktionalität erweitern und anpassen. Eine JavaScript Funktionsbibliothek als Teil der SDK erlaubt die Einbindung eigener Inhalte wie 3D-Modelle, Punktwolken oder Bild-Overlays. Die SDK verwendet die neuen Internet Technologien HTML5 und WebGL (WEBGL 2011). Die entwickelten Anwendungen sind somit plattformunabhängig.

Dieser Artikel stellt das OpenWebGlobe Projekt vor, erläutert die SDK-Architektur und gibt eine Übersicht über die implementierte Basisfunktionalität. Anschliessend werden exemplarisch zwei Anwendungen vorgestellt, welche mit Hilfe der OpenWebGlobe SDK realisiert wurden.

2 Das OpenWebGlobe Projekt

Das OpenWebGlobe Projekt (www.openwebglobe.org) wurde an der FHNW Fachhochschule Nordwestschweiz am Institut für Vermessung und Geoinformatik (IVGI) initiiert. Als Open Source Projekt wurde es im April 2011 gestartet und verfügt über Mitentwickler von anderen Universitäten und aus der Privatwirtschaft. Diese helfen mit den Funktionsumfang des SDKs stetig zu erweitern.

Die Entwicklung des OpenWebGlobe SDK basiert auf der ebenfalls am IVGI entwickelten Vorgängertechnologie i3D, welche in diversen Forschungsprojekten zum Einsatz kam (CHRISTEN, M. & NEBIKER, S., 2010). Im Unterschied zur i3D Technologie steht der Quellcode des OpenWebGlobe SDK unter MIT-Lizenz offen für jedermann zur Verfügung.

Das OpenWebGlobe SDK besteht aus zwei Teilen. Zum einen steht dem Entwickler eine JavaScript-Bibliothek zur Verfügung, welche die Integration des OpenWebGlobe in eigene Web Applikationen ermöglicht. Im Folgenden wird hierfür vom OpenWebGlobe Viewer gesprochen (siehe Kapitel 2.1). Zum anderen stellt das OpenWebGlobe SDK umfangreiche Tools zur Datenprozessierung zur Verfügung – die OpenWebGlobe Processing-Tools (siehe Kapitel 2.2).

2.1 Der OpenWebGlobe Viewer

Im April 2011 wurde der WebGL Standard veröffentlicht. Zusammen mit der neuen HTML Version 5 und JavaScript ist es somit erstmals möglich, 3D-Applikationen direkt im Browser auszuführen. WebGL basiert auf OpenGL ES 2.0 (WEBGL 2011) und erlaubt es, mittels eines Sets von JavaScript-Befehlen die für 3D Darstellungen aufwändigen Berechnungen direkt auf der Grafikkarte auszuführen. Während JavaScript früher unter Entwicklern nicht sehr populär war und generell als unsicher galt, hat es sich in den letzten Jahren zu einer mächtigen Programmiersprache entwickelt. Die Fortschritte in der Typen-Analyse erlauben die Programmierung komplexer Applikationen (JENSEN 2009). Auch die Verwendung des Google Closure Compilers erleichtert die Implementierung von sehr grossen Anwendungen (BOLIN 2010). Daher werden Web-Applikationen heutzutage oft in JavaScript geschrieben und auch für

mobile Anwendungen, beispielsweise iPhone Apps, kann darauf zurückgegriffen werden. Offene, bekannte Frameworks wie jQuery (JQUERY 2012) schliessen Lücken in der JavaScript Sprachdefinition und erlauben auch kompliziertere, objektorientierte Konstrukte. HTML 5, WebGL und JavaScript werden von den meisten gängigen Browsern wie Mozilla Firefox, Google Chrome oder Apples Safari vollumfänglich unterstützt.

2.1.1 Architektur des OpenWebGlobe Viewers

Der objektorientierte Aufbau des OpenWebGlobe Viewers erlaubt es dem Anwender eine beliebige Anzahl eigener Objekte wie POIs (Points of Interest), Punktwolken oder Kameraobjekte zu definieren und darzustellen. Abb. 1 zeigt schematisch die Struktur der Objekte und deren Beziehung zueinander. Zentrales Element ist das Szenen-Objekt (ogScene). Im Szenen-Objekt werden die eigentlichen Inhalte verwaltet. Eigene Inhalte werden in einer entsprechenden Layer-Datenstruktur gruppiert. Dies bietet den Vorteil, dass sich Funktionen für alle, durch den Layer gruppierten Elemente, über einen einzigen Funktionsaufruf ausführen lassen. Für jedes Objekt erhält man bei der Erzeugung eine eindeutige Objektnummer. Objektspezifische Funktionen, beispielsweise das Ein- bzw. Ausblenden oder Verschieben des Objektes, müssen immer mit der entsprechenden Objektnummer aufgerufen werden. Der Applikationsentwickler ist somit nur noch für die Verwaltung dieser Objektnummern zuständig. Die Erzeugung, ortsbezogene Darstellung und gegebenenfalls das Löschen des Objektes wird intern geregelt. In den folgenden Abschnitten werden die wichtigsten Inhalte, die in eine eigene Anwendung integriert werden können erläutert.

Bild- und Höhendaten

Standardmässig werden keine Bild- und Höhendaten mit der OpenWebGlobe SDK mitgeliefert. Für die Anwendungsentwicklung und für Testzwecke stehen SRTM Höhendaten und Landsat Bilddaten auf dem Projekt-Server zur Verfügung. Im Gegensatz zu kommerziellen virtuellen Globen können Bild- und Höhendaten komplett selbst definiert und einfach integriert werden. Das doppelte Nachladen von Geobasisdaten fällt somit weg. Für die flüssige Navigation im Viewer müssen die grossen Datenmengen geeignet strukturiert werden. Mittels des Prozessierungs-Tools der SDK können Bild- und Höhendaten gekachelt und in Pyramiden Struktur auf einem Webserver abgelegt werden (siehe Kapitel 2.2). Dies ermöglicht ein schnelles Nachladen der benötigten Daten. Stehen keine eigenen Bilddaten zur Verfügung, lassen sich auch frei verfügbare Daten beispielsweise von OpenStreetMap (OpenStreetMap 2012) verwenden. Durch die Verwendung semi-transparenter Bildlayer lassen sich auch Layerkombinationen darstellen. Abb. 2 zeigt ein Beispiel einer solchen Layerkombination. Die Geobasisdaten werden mit einem OSM-Strassenlayer überlagert, dies ermöglicht eine bessere Orientierung falls in den Orthophotos Strassen nur schlecht erkennbar sind. Auch dieser Strassenlayer wurde vorgängig mit den Processing Tools aufbereitet und in semi-transparenten Kacheln abgespeichert.

Kamera Objekte

Zur einfacheren Navigation können im OpenWebGlobe vordefinierte Ansichten gespeichert werden. Hierfür wird das Kameraobjekt (ogCamera) verwendet. Hat man mehrere

Kameraobjekte definiert, kann der Benutzer ein 3D Objekt aus verschiedenen vordefinierten und umschaltbaren Ansichten betrachten.

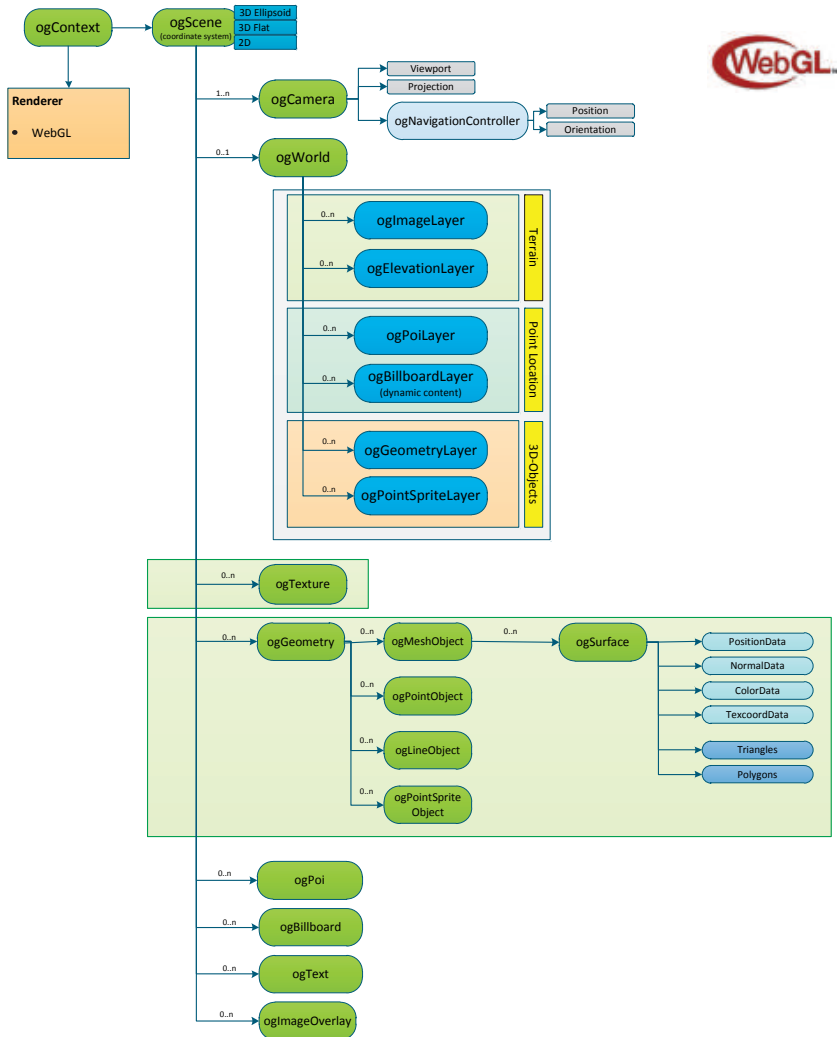


Abb. 1: Architektur des OpenWebGlobe Viewers

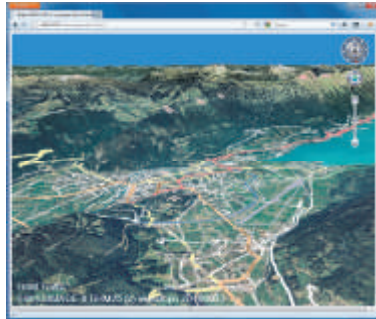


Abb. 2: OpenWebGlobe Viewer mit einem Bilddatenlayer (swissimage), Höhendatenlayer (DHM25) und einem semi-transparenten Strassenlayer (OSM).

POIs

Zur Darstellung von interessanten Orten, beispielsweise Berggipfel, Tankstellen oder Hotels werden üblicherweise POI-Objekte (ogPOI) eingesetzt. Ein POI-Objekt besteht meist aus einem Symbol und einer kurzen Bezeichnung. Abb.3a zeigt verschiedene POIs zur Markierung von Berggipfeln in der Schweiz. POIs werden in einer Layer-Datenstruktur organisiert, wobei für jeden Layer verschiedene Stil-Attribute definiert werden können. Die Vielzahl der Stil-Attribute erlaubt dem Benutzer POIs ganz individuell zu gestalten. So können beispielsweise die Schriftart, Schriftgrösse, Schrift- und Hintergrundfarbe, Ränder und Schattierung beliebig definiert werden. Die Darstellung von Umlauten oder anderen sprachspezifischen Zeichen wird durch die Unterstützung der UTF8 Kodierung gewährleistet. Zudem lassen sich benutzerdefinierte Funktionen beim Klick auf einen POI ausführen.

3D Modelle

Ganze Städte, Gebäude oder andere Geometrien können als 3D-Modell integriert werden. Ein 3D-Modell wird als Geometrie-Objekt (ogGeometry) definiert. Für deren Integration steht eine Vielzahl von Funktionen zu Verfügung. OpenWebGlobe verwendet ein eigenes JSON-Format (JavaScript Object Notation) zur Darstellung der 3D Modelle. Gegebenenfalls muss 3D Modell daher vorgängig in dieses Format konvertiert werden. Solche JSON-Files können dann asynchron in den OpenWebGlobe geladen werden. Der OpenWebGlobe unterstützt sowohl texturierte wie auch kolorierte 3D Modelle sowie transparente Flächen (siehe Abbildung 3b).

Punktwolken

Punktwolken als Variante zur Darstellung von Gebäude- und Stadtmodellen (NEBIKER, S., BLEISCH, S. & CHRISTEN, M. 2010) lassen sich einfach im OpenWebGlobe visualisieren. Hier werden neben einem definierten JSON Format auch herkömmliche xyz-Files unterstützt. Gegebenenfalls müssen die Punktwolken vorgängig ausgedünnt werden. Für diese Ausdünnung bietet das OpenWebGlobe SDK geeignete Algorithmen in den Processing-Tools an (siehe Kapitel 2.2). Ein Beispiel einer Punktwolkervisualisierung findet man in Abb.3c.



Abb.3a,b,c: POIs(a), 3D Modelle(b) und Punktwolken(c) im OpenWebGlobe Viewer

Image Overlays

Als Überlagerung der Geobasisdaten ist es möglich eigene georeferenzierte Bilder zu integrieren. Dies dient zur Visualisierung von zusätzlichen, ortsbezogenen regionalen Informationen beispielsweise zur Markierung von Naturschutzgebieten. Solche Image Overlays sind eine Alternative zur Integration eines ganzen Bildlayers und eignen sich für kleinere, sehr regionale Bereiche. Georeferenzierte Bilder lassen sich als Image Overlays (ogImageOverlay) im OpenWebGlobe darstellen. Verwendet man ein Höhenmodell, so werden diese Overlays als Textur auf das Höhenmodell gelegt.

2.1.2 Einfache Integration in eigene Webanwendungen

Die Einbindung des OpenWebGlobes in eigene Web-Anwendungen lässt sich mit wenigen Zeilen JavaScript realisieren. Abbildung 4 zeigt den dafür erforderlichen JavaScript Quellcode. Im Header der HTML-Seite folgt die Angabe der OpenWebGlobe Bibliothek (Zeile 2). Das HTML5-Canvas Element muss im Body-Bereich der HTML Seite definiert werden und eine eindeutige ID aufweisen (Zeile 20). Diese ID wird bei der Erzeugung des virtuellen Globus als Parameter angegeben (Zeile 7). Mit der Angabe des Bild- und Höhendatenlayers (Zeile 9-15) wird nun der virtuelle Globus erzeugt und im HTML5-Canvas Element angezeigt.

```

1 |<html >
2 |<script type="text/javascript" src="opensehglobe.js"></script>
3 |<script type="text/javascript">
4 |
5 |function main()
6 |{
7 |    var ctx = ogCreateContextFromCanvas("canvas", true);
8 |    var globe = ogCreateGlobe(ctx);
9 |    var imgBlue Marble000
10 |
11 |    [
12 |        url : ["http://www.opensehglobe.org/data/img/"],
13 |        layer : "BlueMarble000",
14 |        width : "1000"
15 |    ];
16 |    ogAddImageLayer(globe, imgBlueMarble000);
17 |}
18 |</script>
19 |</head>
20 |<body onload="main()" >
21 |    <canvas id="canvas"></canvas>
22 |</body>
23 |</html >
    
```

Abb. 4: Integration des OpenWebGlobe Viewers in eine HTML Seite

2.1.3 Erweiterung der Funktionalität

In den vorgängigen Abschnitten wurden die wichtigsten Inhalte des OpenWebGlobe Viewers erläutert. Wenn für eine spezifische Anwendung keine passende Funktion vorhanden ist, so lässt sich diese, dank des offenen Quellcodes der SDK, einfach selbst implementieren und gegebenenfalls in die SDK integrieren. Weitere Informationen, eine Referenz über die verfügbare Funktionen sowie Tutorials die den Einstieg in die OpenWebGlobe SDK erleichtern, findet man auf der Projekt-Homepage unter www.openwebglobe.org.

2.2 Die OpenWebGlobe Processing-Tools

Um ein schnelles Nachladen der Bilddaten im virtuellen Globus zu ermöglichen müssen eigene Bild- und Höhendaten vorgängig gekachelt und in einer Pyramiden Struktur gespeichert werden. Für diesen sehr rechenaufwändigen Schritt wurden die Processing-Tools der OpenWebGlobe SDK entwickelt (CHRISTEN, M. & NEBIKER, S., 2011). Die Processing-Tools wurden in C++ geschrieben und sind konzipiert zur parallelen Ausführung auf mehreren Prozessorkernen für sehr grosse Datenmengen. Da die erforderlichen Berechnungen für grosse Datenmengen sehr lange andauern können, wird am IVGI ein High Performance Computing Cluster dafür eingesetzt. Die Datenaufbereitung lässt sich so auch für grössere Datenmengen effizient durchführen und die verwendeten Algorithmen optimieren. Die Tools der OpenWebGlobe SDK lassen sich aber auch auf jedem handelsüblichen Notebook oder in der Cloud ausführen. Die Tools, inklusive einiger Tutorials zur Prozessierung eigener Daten, stehen unter www.openwebglobe.org zum Download zur Verfügung.

3 Anwendungen basierend auf dem OpenWebGlobe SDK

Zwei grössere Projekte wurden unter Verwendung der OpenWebGlobe SDK umgesetzt. So entstand im Sommer 2011 eine Prototyp-Anwendung zur Darstellung hochauflösender Bild- (25cm/Pixel) und Höhendaten (25m Raster). Auftraggeber war Swisstopo, das Bundesamt für Landestopographie der Schweiz. Abb. 5a zeigt einen Screenshot der entwickelten Anwendung. Zusätzlich zu den Geobasisdaten wurden ausgewählte 3D Stadtmodelle integriert und ein Service zur Ortschaftssuche implementiert.

Zur schnellen 3D Kartierung von Gebäuden wurde in einem zweiten Projekt mit Hilfe des OpenWebGlobe SDK eine weitere Web-Anwendung entwickelt. Als Eingangsdaten dienen Punktwolken, welche in einer OpenWebGlobe-Anwendung visualisiert wurden, siehe Abb. 5b. Zudem stellte sich die Anforderung Echtzeit-Positionsdaten von Personen zu visualisieren. Dies wurde mit der Verwendung von WebSockets (WEBSOCKETS 2011) realisiert, wobei ein 3D Modell eines View-Frustums die Position und Orientierung einer Person im OpenWebGlobe darstellte. Zusammen mit den Punktwolken des Gebäudes konnte man nun erkennen in welchem Stockwerk sich eine Person befand. Die Visualisierung von Punktwolkenfragmenten welche durch ein tragbares Stereo Vision System generiert wurden, konnten in Echtzeit in den virtuellen Globus geladen werden. Somit konnte man die zunächst unbekannte Struktur des Innenraums des Gebäudes erfassen.

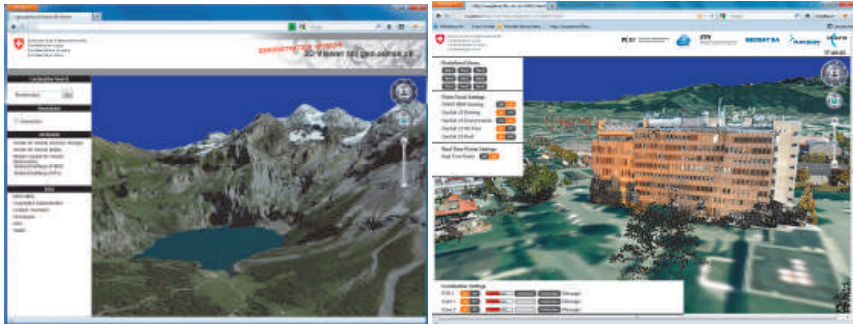


Abb. 5 a,b: Prototyp 3D Viewer der Schweiz (a); Applikation zur 3D Gebäudekartierung (b)

4 Zusammenfassung und Ausblick

Kommerzielle virtuelle Globen ermöglichen eine Reihe von Anwendungen und sind einfach zu bedienen. Wenn jedoch grosse Mengen eigener Daten integriert und spezifische Anwendungen oder Dienstleistungen erstellt werden möchte, stösst man rasch an technische und organisatorische Grenzen. Die quelloffene OpenWebGlobe SDK auf der Basis von HTML5 und WebGL bietet da eine Alternative. Das SDK ermöglicht die massgeschneiderte Erstellung eines virtuellen Globus und der darauf basierenden Anwendung oder Dienstleistung mittels eigener oder frei verfügbarer Geobasisdaten. Die erläuterte Basisfunktionalität der OpenWebGlobe SDK eignet sich für die Aufbereitung verschiedenster Anwendungen wie mit den vorgestellten Beispielen gezeigt wurde. Wenn die derzeit vorhandene Funktionalität für bestimmte Bedürfnisse nicht ausreicht, kann dank des quelloffenen Codes weitere Funktionalität erstellt oder vorhandene angepasst werden. Ausserdem wird das OpenWebGlobe SDK von einer bestehenden Gruppe von Entwicklern und Nutzern stetig weiter ausgebaut. Ein Schwerpunkt zukünftiger Entwicklungen des OpenWebGlobe SDK wird die Implementierung und Erweiterung der Navigationsmöglichkeiten sein. Auch die Prozessierung grosser 3D Stadtmodellldaten und deren Aufteilung in streamfähige Fragmente ist derzeit in Planung.

5 Referenzen

- 3DREALITYMAPS, 2012: 3D Reality Maps, URL: <http://www.alpen3d.net/> (letzter Zugriff: 20.1.2012)
- BOLIN, M., 2010: Closure the Definitive Guide, O'Reily Media Inc.
- BLEISCH, S., 2011: Towards appropriate representations of quantitative data in virtual environments. *Cartographica: The International Journal for Geographic Information and Geovisualization*, 46(4), S. 252-261.
- CHRISTEN, M. & NEBIKER, S., 2010: Neue Entwicklungen im Bereich Virtueller Globen am Beispiel der i3D-Technologie. Dreiländertagung der OVG, DGPF und SGPF. Wien.

- CHRISTEN, M. & NEBIKER, S., 2011: Large Scale Constraint Delaunay Triangulation.
In: T. Kolbe, G. König and C. Nagel (Editors), Lecture Notes in Geoinformation & Cartography (LNGC). Springer, Heidelberg, pp. 57-72.
- GOOGLEEARTH, 2012: URL: <http://earth.google.com> (letzter Zugriff: 20.1.2012)
- JENSEN, S.H., MØLLER A. & THIEHMANN P., 2009: Type analysis for JavaScript. In Static Analysis Symposium (SAS), Lecture Notes in Computer Science. Springer, Heidelberg, pp. 238-255
- JQUERY, 2012: JQuery JavaScript Library. URL: <http://www.jquery.com>
- MarineLink, 2012: URL: <http://www.marinelink.com/news/management-system-google335939.aspx> (letzter Zugriff: 20.12.2012)
- NEBIKER, S., BLEISCH, S. & CHRISTEN, M., 2010: Rich point clouds in virtual globes - A new paradigm in city modeling?. Computers, Environment and Urban Systems, Springer
- NEBIKER, S., BLEISCH, S. & GÜLCH, E., 2010: Virtual Globes. GIM International 24(7), URL: http://www.gim-international.com/issues/articles/id1560-Virtual_Globes.html. (letzter Zugriff: 20.01.2012)
- OPENSTREETMAP, 2012: OpenStreetMap Project Wiki, URL: http://wiki.openstreetmap.org/wiki/Main_Page (letzter Zugriff: 20.12.2012)
- WEBGL, 2011: WebGL Specification, Version 1.0, 10 February 2011. URL: <https://www.khronos.org/registry/webgl/specs/1.0/> (letzter Zugriff: 20.01.2012).
- WEBSOCKETS, 2011: The WebSocket API Editor's Draft 5 December 2011, URL: <http://dev.w3.org/html5/websockets/> (letzter Zugriff: 20.01.2012).

Potenziale und Grenzen einer gemeinsamen Nutzung von In-Situ- und Fernerkundungsdaten für umweltbezogene Gesundheitsanwendungen

SILKE RICHTER¹, KATHARINA PECH², PIERRE KARRASCH¹ & LARS BERNARD¹

Zusammenfassung: Um die Exposition der Bevölkerung gegenüber gesundheitsrelevanten Umweltparametern abzuschätzen, sind flächendeckende Informationen über diese Parameter notwendig. Bodengestützte Messverfahren als auch Satellitenbeobachtungen haben Vor- und Nachteile in der räumlichen und zeitlichen Auflösung der Messungen. Untersucht wurde das Potenzial einer gemeinsamen Nutzung der Daten aus diesen Aufnahmetechniken, am Beispiel der Umweltparameter Temperatur und bodennahes Ozon. Für ausgewählte Tage wurden verschiedene Interpolationsverfahren getestet. Die Ergebnisse zeigen, dass eine Fusion für die Temperatur grundsätzlich realisierbar ist, während sich für bodennahes Ozon noch einige Herausforderungen stellen.

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation

In zahlreichen Studien und Publikationen wurden Zusammenhänge zwischen Luftverschmutzung sowie extremen Wetterereignissen (z.B. Hitze- oder Kältewellen) und negativen Gesundheitseffekten wie Atemwegserkrankungen untersucht und nachgewiesen (vgl. WHO 2004, EEA 2011, SCHWARZ & SEPPELT 2009). Ebenso wird häufig darauf hingewiesen, dass für entsprechende Minderungsmaßnahmen ausreichend präzise sowie zeitlich und räumlich detaillierte Informationen zu meteorologischen Parametern und zu Luftschadstoffkonzentrationen und deren regionaler Verteilung erforderlich sind (WHO 2004b, WHO 2004c, BAKLANOV et al. 2007).

Nach Angaben der Weltgesundheitsorganisation (WHO) und der Europäischen Umweltagentur (EEA) haben die Luftschadstoffe Feinstaub und bodennahes Ozon stark negative Wirkungen auf die Gesundheit des Menschen. Weitere gesundheitsgefährdende Schadstoffe sind Stickstoffoxide, Schwefeldioxide und Kohlenstoffmonoxid (EEA 2010, EEA 2006, WHO 2008, WHO 2004a). Das Vorkommen dieser Schadstoffe ist daher meist Grundlage zur Bestimmung der Luftgüte, etwa durch einen Luftqualitätsindex (vgl. U.S. EPA 2012, CELINE-IRCEL 2012, POLLUTION INFO 2012).

Die Entwicklung von Methoden für eine detaillierte Aussage zur Luftschadstoffkonzentration ist ein Schwerpunkt in dem EU-Projekt *Earth Observation and Environmental Modelling for the Mitigation of Health Risks* (EO2HEAVEN). Der vorliegende Beitrag stellt erste Ergebnisse der Analysen von Luftschadstoffen, als Teil des Projektes EO2HEAVEN, vor. Der Fokus liegt dabei auf der gemeinsamen Nutzung verschiedener Datenquellen.

1) Silke Richter, Pierre Karrasch, Lars Bernard, Technische Universität Dresden, Professur für Geoinformationssysteme, 01062 Dresden; E-Mail: silke.richter@tu-dresden.de

2) Katharina Pech, Technische Universität Dresden, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, 01062 Dresden; E-Mail: katharina.pech@tu-dresden.de

1.2 Gegenstand und Ziel der Untersuchung

Um die Exposition der Bevölkerung gegenüber den Umweltparametern abzuschätzen, sind flächendeckende Informationen über diese Parameter notwendig. Die Erfassung von Informationen zu Luftschadstoffen und Temperatur kann auf unterschiedliche Art und Weise erfolgen. An Bodenmessstationen erhobene In-Situ-Daten haben den Vorteil einer hohen zeitlichen Auflösung (bis zu 30 Minuten), bilden die räumliche Verteilung des Parameters vielfach aber nur ungenügend ab. Demgegenüber stehen Verfahren der Satellitenbeobachtung, die den Untersuchungsraum flächenhaft aufnehmen, deren zeitliche Auflösung aber von den unterschiedlichen Wiederholraten der Systeme (z.B. METEOSAT 15 min und Landsat 16 Tage) und vor allem auch von atmosphärischen Bedingungen, wie beispielsweise der Wolkenbedeckung, abhängt (vgl. u.a. ENGEL-COX et al. 2004, MARTIN 2008).

Ziel des Beitrages ist es, Potenziale und Grenzen einer gemeinsamen Nutzung von bodengestützter Messungen und Fernerkundungsdaten vor dem Hintergrund umweltbezogener, gesundheitlicher Fragestellungen aufzuzeigen. Es werden Anwendungs- und Einsatzmöglichkeiten von Boden- und Satellitenmessungen zur Bestimmung der Luftqualität und Temperatur diskutiert.

2 Datengrundlage

Das Untersuchungsgebiet für den vorliegenden Beitrag ist das Bundesland Sachsen. Es gliedert sich topographisch in Flachland, Hügelland und Mittelgebirge (ca. 80-1214 m NN). Klimatisch liegt Sachsen in der gemäßigten Zone, mit einer kontinentalen Prägung. Die Temperaturschwankungen im Jahr sind im Vergleich zu anderen Bundesländern größer (LFULG 2011a). Der wirtschaftliche Stand und die verkehrsinfrastrukturelle Erschließung entsprechen dem mitteleuropäischen Durchschnitt (vgl. KOWALKE 2000). Die Ozonbelastungen sind in Sachsen auf gleichbleibend hohem Niveau. Die nach der EU-Richtlinie 2008/50/EC erlaubte Anzahl der Tage mit Überschreitungen der Grenzwerte wird an vielen Messstellen überstiegen (LFULG 2007, LFULG 2011b, EUROPEAN PARLIAMENT AND THE COUNCIL OF THE EUROPEAN UNION 2008). Auf Basis der verfügbaren Umwelt- und Gesundheitsdaten wurden für das Jahr 2006 exemplarisch drei Testtage für die Untersuchung gewählt. Die verschiedenen Erfassungsmethoden von Umweltinformationen sollen im Folgenden kurz dargestellt werden.

2.1 In-Situ Messungen

Mit der EU-Richtlinie 2008/50/EC wird die Überwachung und Bewertung der Luftqualität vorgeschrieben. Diese wird mit bodengestützten Messungen, sogenannten In-Situ-Messungen erfasst. Für das Messnetz sind die entsprechenden Ämter der Bundesländer zuständig. In Abb. 1 ist das Immissionsmessnetz für bodennahes Ozon im Untersuchungsjahr 2006 dargestellt. In Sachsen werden zusätzlich zu den Luftschadstoffen an allen Stationen meteorologische Parameter erfasst. Die meisten Parameter stehen als Halbstundenmittelwerte zur Verfügung und werden so auch veröffentlicht. Eine 90-prozentige Verfügbarkeit der Daten, wie in der EU-Richtlinie 2008/50/EC gefordert, wird durchweg eingehalten (LFULG 2007), weshalb diese Messungen eine nachhaltige Datengrundlage gewährleisten.

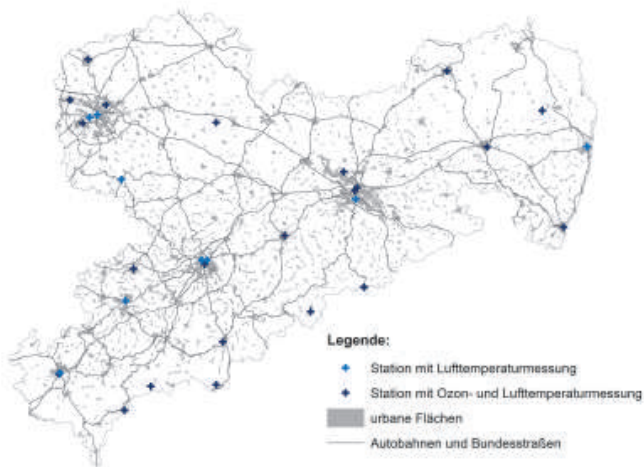


Abb. 1: Immissionsmessnetz für O₃ sowie Messstationen für die Lufttemperatur in Sachsen, Stand 2006 (mittlere Entfernung der O₃-Stationen: 19,7 km; basierend auf der Stationsdatenbank des Umweltbundesamtes)

2.2 Satellitenmessungen

Mit geeigneten Auswerteargorithmen können Spurengase und ihre Verteilung in der Atmosphäre aus Fernerkundungsdaten abgeleitet werden. Bei Gesundheitsanwendungen interessiert hier die Luftqualität in der bodennahen Schicht. Entscheidend für die Nutzung eines Fernerkundungsdatensatzes ist das Prozessierungslevel im Zusammenhang mit weiteren Informationen, insbesondere auch die zeitliche und geometrische Auflösung. Zusätzlich werden Produkte mit bereits abgeleiteten Parametern angeboten, welche aus den Rohdaten auf Basis verschiedener Modelle berechnet werden. Ein solcher Datensatz (Noah Land Surface Model) wird vom Global Land Data Assimilation System zur Verfügung gestellt. Dieser hat den Vorteil, dass bereits die bodennahe Lufttemperatur als Endprodukt geliefert wird. Die räumliche Auflösung dieses Datensatzes beträgt 0,25° (ca. 28×17 km) mit einer zeitlichen Auflösung von 3 Stunden.

Einen geeigneten Fernerkundungsdatensatz für bodennahes Ozon zu finden gestaltet sich schwieriger. In der Regel wird mit Fernerkundungsverfahren der gesamte Anteil an Ozon in der Atmosphärensäule bestimmt. Der größte Anteil Ozon befindet sich dabei in der Stratosphäre (HACKEL 2008, GUDERIAN 2000). Beim Profildatensatz OMO3PR der NASA (National Aeronautics and Space Administration) wird das troposphärische Ozon unter Anwendung verschiedener Algorithmen und zusätzlicher Daten aus dem kompletten Ozongehalt der Atmosphäre abgeleitet. Dieser hat eine zeitliche Auflösung von einem Tag und eine geometrische Auflösung von 13×48 km im Nadir. Weitere Informationen zu den Datensätzen finden sich auf der Internetpräsentation der NASA.

3 Fusion zur gemeinsamen Nutzung von In-Situ Messungen und Fernerkundungsdaten

Vielfach ist es sinnvoll In-Situ- und Fernerkundungsdaten gemeinsam zu nutzen. Eine solche Fusion stellt eine der heutigen Herausforderungen in der integrierten Nutzung von Umweltdaten dar (u.a. DENTENER & BOROWIAK 2006, HUTCHISON 2003, ENGEL-COX et al. 2004, TINKLE et al. 2007).

Der Begriff der Fusion wird aktuell sehr häufig, aber auch sehr unterschiedlich verwendet. Im Bereich der Geodatenanalyse finden sich u.a. Sensor Fusion, Object Fusion, Decision Fusion (PERCIVAL 2010), Image Fusion und Data Fusion (BLEIHOLDER & NAUMANN 2008, MELNICK & EVERITT 2008). Allen Verfahren gleich ist jedoch immer das Ziel der Fusion: eine Verbesserung der Ausgangslage bzw. des Resultats durch eine gemeinsame Nutzung. Dabei ist es von der jeweiligen Untersuchung abhängig, ob das Resultat der Fusion eine höhere Datenqualität oder -quantität zum Ziel hat, oder im Idealfall sogar beides (PERCIVAL 2010, MELNICK & EVERITT 2008). Einerseits kann die Fusion heterogener Datenbestände darin bestehen, für ein und dasselbe Objekt ein besseres Ergebnis zu erzielen, z.B. die geometrische Genauigkeit (BLEIHOLDER & NAUMANN 2008). Andererseits kann aber auch die Aussage ein und desselben Umweltparameters durch Nutzung verschiedener Datenquellen verbessert werden (RANCHIN & WALD 2010, DUNEMANN et al. 2002). Im Sinne dieses Beitrages handelt es sich bei der Verwendung des Begriffes Fusion um eine Informationsverdichtung durch Nutzung heterogener Datenquellen.

Durch die Unterschiede bei der Erfassung bzw. Ableitung der Umweltparameter aus In-Situ- und Satellitenmessungen ist eine direkte Datenfusion mit Vorsicht anzuwenden (RANCHIN & WALD 2010). Die Schwierigkeiten bestehen hier vor allem in der Art der Messung. Während die Daten der In-Situ-Messstationen (im Vergleich zu den Fernerkundungsdaten) weitgehend als punktuelle Informationen interpretiert werden können, repräsentieren die Daten aus Satellitenmessungen Flächen von bis zu mehreren hundert Quadratkilometern.

3.1 Potenziale einer Fusion – Beispiel Temperatur

Extreme Temperaturereignisse wie Hitzewellen können gesundheitliche Auswirkungen in Form von Herz-Kreislaufkrankungen haben (WHO 2009, EEA 2006, SCHWARZ & SEPPELT 2009). Um eine entsprechende Exposition als Grundlage einer potenziellen Gefährdung abzuschätzen, ist es notwendig aus Punktmessungen für die Temperatur flächenhafte Informationen abzuleiten. In der hier vorgestellten Studie wurden zunächst die In-Situ-Messwerte und die der Satellitenmessungen getrennt voneinander untersucht. Anschließend wurde geprüft, ob die Ergebnisse einer gemeinsamen Nutzung zu detaillierteren Ergebnissen in der Verteilung der Temperatur (z.B. Wärmeinseln) erwarten lassen. Für beide Messverfahren wurden die Interpolationsmethoden Inverse Distance Weighted (IDW) und Kriging angewandt (vgl. u.a. BILL 2010, LONGLEY et al. 2005, BURROUGH & McDONNELL 2006).

Die Interpolationen auf Basis der In-Situ-Daten brachten keine plausiblen Ergebnisse. Sowohl bei der Anwendung von IDW als auch bei Kriging (hier: Ordinary Kriging, Spherical Model) lag die Standardabweichung der Temperatur beim Vergleich des Modellwertes und dem tatsächlichen Messwert an der Station bei 2 K (= Root Mean Square Error (RMSE)). Die maximale Abweichung erreichte Werte von bis zu 5 K. Die Fehlermaße wurden mittels Kreuzvalidierung ermittelt. Dabei wurde jeder Eingangsmesswert auf Basis des gewählten Modells aus allen anderen Messwerten geschätzt und anschließend mit dem tatsächlichen Messwert verglichen. Die Interpolation der Fernerkundungsdaten war aufgrund der höheren Anzahl und Verteilung der Messwerte erwartungsgemäß weniger fehleranfällig. Die Spannweite der Daten ist gering (4 K für ganz Sachsen), was darauf schließen lässt, dass keine Extremwerte abgebildet werden.

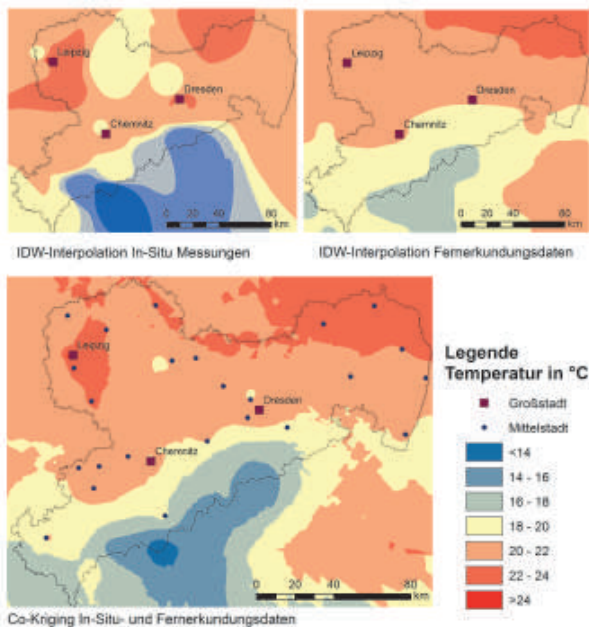


Abb. 2: Vergleich der Interpolationsergebnisse für die Temperatur aus In-Situ-Daten, Fernerkundungsdaten und fusionierten Daten am Beispieltag 06.05.2006

Die Fernerkundungsdaten liefern hier ein über die jeweilige Fläche aggregiertes Maß, lokale Gegebenheiten spiegeln sich aber nicht wider (vgl. Abb. 2, rechts oben). Der RMSE lag hier bei 0,3 K (IDW) bzw. 0,2 K (Ordinary Kriging, Spherical Model). Die maximale Abweichung war mit Werten von unter 1 K deutlich geringer. Auch hier wurden die Fehler mittels einer Kreuzvalidierung bestimmt.

Co-Kriging wird als ein geostatistisches Interpolationsverfahren zur Schätzung eines Parameters unter Hinzunahme eines zusätzlichen Hilfsparameters genutzt. Für die gemeinsame Nutzung der In-Situ- und Fernerkundungsdaten wurde ein Co-Kriging (Spherical Model) durchgeführt. Die In-Situ-Daten bildeten als qualitätsgeprüfte Daten nach EU-Richtlinie EC/2008/50 die Grundlage. Für Flächen an denen keine In-Situ-Messungen vorhanden sind, wurden die Fernerkundungsdaten als zusätzlicher Parameter hinzugezogen. Die Fehlermaße wurden zwar mit dem Co-Kriging gegenüber den Fehlern der Interpolation der Fernerkundungsdaten größer (RMSE 1,7 K und maximale Abweichung von 3 K), aber lokale Gegebenheiten zeichneten sich deutlicher ab (vgl. Abb. 2, unten). Das ist an den Stellen der Fall, wo durch In-Situ-Messungen zusätzliche und genauere Messwerte vorliegen. Gleichzeitig sind für Regionen, die nicht unmittelbar durch In-Situ-Messstationen repräsentiert werden, plausible Aussagen zur Lufttemperatur ableitbar. Selbst die Berücksichtigung einer zusätzlichen, die Temperatur beeinflussende Variable, wie der Höhe ü. NN, führte zu keinen signifikanten Unterschieden (RMSE: 1,7, maximale Abweichung: 4 K). Tabelle Tab. 1 zeigt die Ergebnisse der Interpolationsvarianten für alle Versuchstage. Daraus schlussfolgernd kann eine Interpolation mit dem Co-Kriging-Verfahren in Kombination der In-Situ- und Fernerkundungsdaten als geeignet angesehen werden.

Tab. 1: Fehlermaße für die jeweiligen Interpolationsmethoden pro Versuchstag für die Lufttemperatur (FE: Fernerkundungsdaten, RMSE: Root Mean Square Error, max. Abw.: maximale Abweichung von gemessenem und geschätzten Wert)

Methode	Inputdaten	Beispieltag 25.04.2006		Beispieltag 06.05.2006		Beispieltag 05.07.2006	
		RMSE	max. Abw.	RMSE	max. Abw.	RMSE	max. Abw.
IDW	In-Situ	2,1	5,6	2,3	5,8	2,1	5,7
	FE	0,3	1,0	0,3	1,2	0,3	1,4
Kriging	In-Situ	1,8	5,1	1,9	4,7	1,9	4,8
	FE	0,2	0,8	0,2	0,9	0,2	0,8
Co-Kriging	In-Situ/FE	1,7	3,1	1,7	3,2	1,7	3,3
	In-Situ/FE/DGM	1,5	3,7	1,7	4,0	1,7	3,3

3.2 Grenzen – Beispiel bodennahes Ozon

Gesundheitliche Negativeffekte, die sich auf erhöhte Anteile von bodennahem Ozon zurückführen lassen, sind insbesondere Reizungen der Atemwege.

Wie im Beispiel der Temperatur (vgl. Kap. 3.1) wurden auch für Ozon die In-Situ-Daten und Satellitenbeobachtung im ersten Schritt getrennt analysiert. Aufgrund der hohen räumlichen und zeitlichen Variabilität von bodennahem Ozon, können die Punktmessungen die Konzentrationsverteilung nur ungenügend abbilden (vgl. NAGL & SPANGL 2007, TINKLE et al. 2007). Das spiegelt sich auch in den Interpolationstests wider. Die Schätzwerte ergaben für alle Testtage, dass 2/3 der interpolierten Werte um mindestens 10 µg/m³ abweichen (RMSE). Die maximalen Abweichungen betragen bis zu 40 µg/m³. Die Fehlerberechnungen erfolgten auch hier mit Hilfe der Kreuzvalidierung (vgl. Kap. 3.1). Die Qualität der Interpolation über heterogene Landschaften ist in entscheidendem Maße von der Anzahl und Verteilung der Messpunkte

(Stützstellen des Modells) abhängig. Aufgrund der Charakteristik der Daten war eine kleinräumige Analyse im mesoskaligen Bereich der räumlichen Konzentrationsverteilung wie erwartet nicht möglich. Im konkreten Fall gehen beispielsweise lokale Gegebenheiten wie Mittelzentren mit städtischer Hintergrundkonzentration verloren.

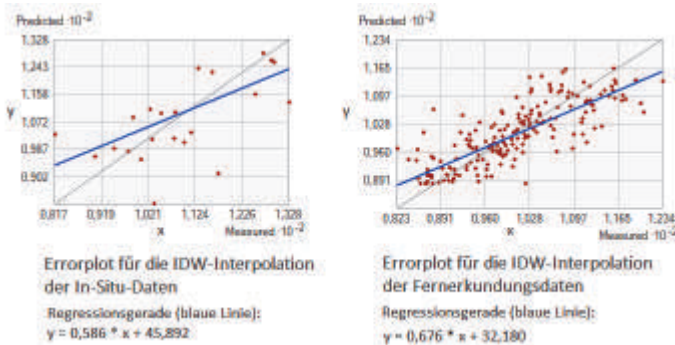


Abb. 3: Errorplots (gemessener und geschätzter Wert) für bodennahes Ozon ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) aus In-Situ-Messungen und Fernerkundungsdaten (Beispieltag 25.04.2006)

In Abhängigkeit der Flugbahn und des Aufnahmeverfahrens ist die tatsächliche geometrische Auflösung des Fernerkundungsdatensatzes für das betrachtete Untersuchungsgebiet wesentlich schlechter als die theoretische geometrische Auflösung im Nadir der Aufnahme (vgl. Kap. 2.2). Auf Grund dieser Einschränkung stehen an den drei Versuchstagen (vgl. Kap. 2) innerhalb der Landesgrenzen maximal sechs Messwerte zur Verfügung. Dies macht, wie mit den In-Situ-Messungen, lokale Analysen unmöglich. Im Vergleich zu den Temperaturdaten war kein Trend für die Konzentrationsverteilung des bodennahen Ozons abzuleiten. Die entsprechenden Errorplots sind in

Abb. 3 dargestellt. Auch die Semivariogramme in Abb. 4 zeigen keinen räumlichen Zusammenhang zwischen den Punktwerten selbst, weshalb eine Interpolation nicht sinnvoll erscheint.

Weiterhin konnten auch im Hinblick auf die Vergleichbarkeit der abgeleiteten Werte aus den Satellitenmessungen mit den Bodenmessungen keine zufriedenstellenden Ergebnisse erzielt werden. Um einen Vergleich vornehmen zu können, mussten zunächst die unterschiedlichen Einheiten Dobson Unit (vgl. HÄCKEL 2008) (OMO3PR) und $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (In-Situ) in die gemeinsame Einheit $\mu\text{g}/\text{m}^3$ überführt werden.

Eine gemeinsame Nutzung der Daten ist derzeit nicht problemlos möglich. Insbesondere der Aspekt der Verbesserung der geometrischen Auflösung wird in Zukunft ein Arbeitsfeld in EO2HEAVEN sein. Aufgrund der geringen räumlichen Abhängigkeit sowohl der In-Situ- als auch der Fernerkundungsmesswerte für bodennahes Ozon (vgl. Abb. 4) und aufgrund einer Korrelation von $r = 0,4$ (bezogen auf das gesamte Jahr 2006) der Datensätze untereinander, wurde von weiteren Interpolationsverfahren wie Co-Kriging abgesehen.

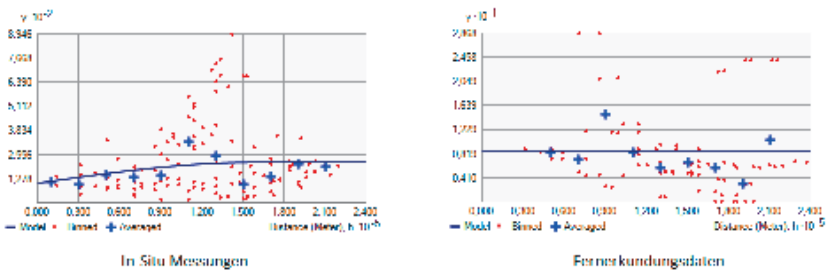


Abb. 4: Semivariogramme für die Werte des bodennahen Ozons aus In-Situ-Messwerten und Fernerkundung (Beispielttag: 25.04.2006) (Model: Funktion zur Modellierung des Semivariogramms, Binned: Semivarianzen aller Punktpaare, Averaged: durchschnittliche Semivarianz)

4 Fazit und Ausblick

Gängige Interpolationsverfahren, basierend auf den Punktmessungen, sind für eine zufriedenstellende Bestimmung der Luftverschmutzung oder Temperaturverteilung nicht ausreichend (vgl. NAGL & SPANGL 2007). Deshalb wurden in der vorliegenden Studie zusätzlich flächendeckende Messungen aus Satellitenbeobachtung herangezogen.

Die aktuellen Ergebnisse zeigen, dass eine Fusion der In-Situ-Daten und abgeleiteten Daten aus Satellitenbeobachtungen für den Umweltparameter Temperatur grundsätzlich realisierbar ist. Die Resultate konnten dahingehend verbessert werden, dass eine differenziertere Darstellung der räumlichen Temperaturverteilung möglich ist, welche vor allem auch durch den Einfluss städtischer Wärmeinseln geprägt ist. Unter zusätzlicher Nutzung von Fernerkundungsdaten lassen sich die Modellierungen der In-Situ-Messwerte auf die Fläche dahingehend verbessern, dass flächendeckend Werte für die Temperatur vorliegen. Da aus Sicht der Gesundheitsanwendungen, z.B. Warnungen vor Extremtemperaturen und deren Auswirkungen auf die Gesundheit, die gefühlte Temperatur der wesentliche Parameter ist, müssen in Zukunft weitere Faktoren wie Luftfeuchte und Windstärke in die Analysen integriert werden.

Aufgrund der hohen zeitlichen und räumlichen Variabilität von bodennahem Ozon konnten für die Konzentrationsverteilung mit den beschriebenen Methoden keine plausiblen Ergebnisse erzielt werden. Bei der Fusion der Daten für den Parameter bodennahes Ozon stellen sich zum gegenwärtigen Zeitpunkt weitere Herausforderungen, u.a. die Verbesserung der Nutzbarkeit der Punktmessungen infolge der niedrigen räumlichen Autokorrelation der Messwerte. Für die Expositionsbestimmung der Bevölkerung gegenüber bodennahem Ozon sind gängige Interpolationsverfahren auf Basis von Messpunkten aus verschiedenen Messverfahren ungeeignet. Ansätze auf Basis der Landnutzung, Topographie und Emissionen von Vorläuferstoffen werden im Rahmen des Projektes EO2HEAVEN ebenfalls untersucht und lassen in Zukunft deutlich bessere Ergebnisse erwarten. Für die im Projekt EO2HEAVEN angestrebten Vorhersagen von Gesundheitsrisiken gegenüber Umweltparametern sind Fernerkundungsdaten zum Teil aufgrund der zeitverzögerten Bereitstellung über das Internet nur eingeschränkt nutzbar.

Danksagung

Diese Arbeit wurde im Rahmen des EU-Projektes *Earth Observation and Environmental Modelling for the Mitigation of Health Risks* (EO2HEAVEN) (Fördernummer: 244100) durchgeführt.

5 Literaturverzeichnis

- BAKLANOV, A., HÄNNINEN, O., SLÖRDAL, L. H., KUKKONEN, J., BJERGENE, N., FAY, B., FINARDI, S., HOE, S. C., JANTUNEN, M., KARPPINEN, A., RASMUSSEN, A., SKOULOUDIS, A., SOKHI, R. S., SØRENSEN, J. H. & ØDEGAARD, V., 2007: Forecasting Urban Meteorology, Air Pollution and Population Exposure. *Air Pollution Modeling and Its Application XVII*. S. 29-40.
- BEELEN, R., HOEK, G., PEBESMA, E., VIENNEAU, D., DE HOOGH, K., & BRIGGS, D. J., 2009: Mapping of background air pollution at a fine spatial scale across the European Union. *Science of The Total Environment*, **407** (6), S. 1852-1867.
- BILL, R., 2010: Grundlagen der Geo-Informationssysteme (5. Aufl.). Wichmann.
- BLEIHOLDER, J., & NAUMANN, F., 2008: Data fusion. *ACM Computing Surveys*, **41**, S. 1-41.
- BURROUGH, P. A. & McDONNELL, R.A., 2006: Principles of Geographical Information Systems. Oxford University Press.
- CELINE-IRCEL: Air Quality Belgian Regions.
http://www.irceline.be/~celinair/english/homeen_java.html (Abgerufen am 12.01.2012)
- DENTENER, F., & BOROWIAK, A., 2006: Remote Sensing of Air Pollution. Workshop Report No. EUR 22330 EN. Institute for Environment and Sustainability, Italy.
- DUNEMANN, O., GEIST, I., JESSE, R., SAAKE, G., & SATTLER, K.-U., 2002: Informationsfusion auf heterogenen Datenbeständen. *Informatik - Forschung und Entwicklung*, **17** (3), S. 112-122.
- EEA (EUROPEAN ENVIRONMENTAL AGENCY), 2006: Environment and health. No. 10/2005). EEA Report. Copenhagen, Denmark.
- EEA (EUROPEAN ENVIRONMENTAL AGENCY), 2010: The European Environment - State and outlook 2010 Air Pollution. Copenhagen, Denmark.
- EEA (EUROPEAN ENVIRONMENTAL AGENCY), 2011: Air quality in Europe - 2011 report. No. 12/2011. Copenhagen, Denmark.
- ENGEL-COX, J. A., HOFF, R. M., & HAYMET, A. D. J., 2004: Recommendations on the use of satellite remote-sensing data for urban air quality. *Journal of the Air & Waste Management Association* (1995), **54** (11), S. 1360-1371.
- EUROPEAN PARLIAMENT AND THE COUNCIL OF THE EUROPEAN UNION, 2008: DIRECTIVE 2008/50/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 21 May 2008 on ambient air quality and cleaner air for Europe.
- GUDERIAN, R., 2000: Atmosphäre - Anthropogene und biogene Emissionen - Photochemie der Troposphäre - Chemie der Stratosphäre und Ozonabbau. *Handbuch der Umweltveränderungen und Ökotoxikologie* (1. Aufl., Bd. 1). Springer Berlin Heidelberg.
- HÄCKEL, H., 2008: Meteorologie (6. Aufl.). Stuttgart.
- HUTCHISON, K. D., 2003: Applications of MODIS satellite data and products for monitoring air quality in the state of Texas. *Atmospheric Environment*, **37** (17), S. 2403-2412.
- KOWALKE, H., 2000: Sachsen. Klett.
- LFULG, 2007: Luftqualität in Sachsen - Jahresbericht 2006.
- LFULG, 2011a: Kompendium Klima.

- LFULG, 2011b: Luftqualität in Sachsen - Jahresbericht 2010.
- LONGLEY, P. A., GOODCHILD, M. F., MAGUIRE, D. J., & RHIND, D. W., 2005: Geographic Information Systems and Science (2. Aufl.). Wiley.
- MARTIN, R. V., 2008: Satellite remote sensing of surface air quality. *Atmospheric Environment*, **42** (34), S. 7823-7843.
- MELNICK, E. L., & EVERITT, B. S., 2008: Encyclopedia of quantitative risk analysis and assessment. Volume 2 D-J (Bd. 2).
- NAGL, C., & SPANGL, W., 2007: Flächenhafte Darstellung von Luftschadstoffen - Machbarkeitsstudie zur Berechnung der PM10-, PM2,5- und NO₂-Belastung in Österreich. Report No. REP-0116. UBA Wien.
- PERCIVALL, G., 2010: OGC® Fusion Standards Study Engineering Report. No. OGC 09-138, Version 0.3.0.
- POLLUTION INFO: Air Pollution Info...aktuelle Luftbelastungsinformationen.
http://www.pollution-info.de/index.php?option=com_content&view=article&id=33&Itemid=339 (Abgerufen am 12.01.2012)
- RANCHIN, T., & WALD, L., 2010: Data Fusion in Remote Sensing of Urban and Suburban Areas. In: *Remote Sensing of Urban and Suburban Areas*. (Hrsg.: Rashed, T. & Jürgens, C.), S. 193-218. Springer.
- SCHWARZ, N., & SEPPELT, R., 2009: Analyzing Vulnerability of European Cities Resulting from Urban Heat Island. Fifth Urban Research Symposium 2009.
- TINKLE, S., GANT, M., HUMBLE, M., FOLEY, G., GARCIA, V., & BOND, A., 2007: Integrated Earth Observation: Applications to Air Quality and Human Health. Workshop Report No. EPA/600/R-07/007. EPA.
- U.S. EPA: Air Quality Index (AQI) - A Guide to Air Quality and Your Health.
<http://airnow.gov/index.cfm?action=aqibasics.aqi> (Abgerufen am 12.01.2012)
- WHO, 2004a: Health Aspects of Air Pollution - Results from the WHO project „Systematic review of health aspects of air pollution in Europe“. No. E83080. Denmark: WHO Europe.
- WHO, 2004b: Zu einem gemeinsamen Informationssystem als Entscheidungshilfe im Bereich Umwelt und Gesundheit in Europa. No. EUR/04/5046267/10. Vierte Ministerielle Konferenz Umwelt und Gesundheit, Budapest.
- WHO, 2004c: Outdoor air pollution - Assessing the environmental burden of disease at national and local levels.
- WHO, 2008: Air quality and health – Fact sheet no. 313.
<http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs313/en/index.html> (Abgerufen am: 03.10.2011)
- WHO, 2009: The European health report 2009. Health and health systems. No. E93103. Copenhagen, Denmark.

Ableitung geochemischer Parameter aus dem Bedeckungsgrad der Pioniervegetation im Braunkohlerevier Sokolov unter Verwendung von Linear Spectral Unmixing

FLORIAN BEYER¹, CHRISTIAN GÖTZE¹, CORNELIA GLÄBER¹ & VERONIKA KOPAČKOVÁ²

Zusammenfassung: Die vorliegende Arbeit untersucht die Eignung etablierter Standardmethoden für die Ableitung geochemischer Parameter im Rekultivierungsbergbau aus hyperspektralen Fernerkundungsdaten. Ziel der Untersuchungen war es, die Pioniervegetation als Zeiger des geochemischen Milieus unterschiedlicher Kippsedimente im Braunkohlerevier Sokolov (Tschechische Republik) zu verwenden. Aus der Kombination einer halb-automatischen Endmemberextraktion und Linear Spectral Unmixing (LSU) konnten Abundanzbilder generiert werden. Diese gingen zusammen mit den Ergebnissen physiko-chemischer Substratuntersuchungen in ein lineares Regressionsmodell ($R^2 = 0,81$) zur Generierung von Verteilungskarten ein. Die vorliegenden Ergebnisse demonstrieren die Eignung von HyMap-Daten zur flächendeckenden Ableitung geochemischer Parameter aus dem Bedeckungsgrad der Pioniervegetation.

1 Einleitung und Problemstellung

Die Technologie der Rohstoffgewinnung im Tagebau und die damit verbundenen tiefgreifenden Materialumlagerungen des Deckgebirges stellen schwerwiegende und irreversible anthropogene Eingriffe in natürliche Ökosysteme dar. Die Sanierung der stillgelegten Tagebaurestflächen ist eine bedeutende Herausforderung. Die Kippsedimente mit ihrer sehr heterogenen Substratverteilung sind Ursache kleinräumig stark variierender geochemischer und hydrologischer Charakteristika. Deshalb erweist sich sowohl die Kartierung der Kippsedimente als auch deren Rekultivierung als problematisch. Die auf den Tagebaurestflächen einsetzende Sukzession der Pioniervegetation wird in hohem Maße durch die stark variablen Substrateigenschaften gesteuert. Neben dem artenspezifischen Aspekt unterliegt insbesondere die Bestandsdichte der Pioniervegetation entsprechenden Schwankungen. Die Verteilung und Dichte der Arten sind deshalb hervorragende Indikatoren für das geochemische Milieu der Standorte. Für das Monitoring des hochdynamischen geochemischen und botanischen Prozessgeschehens sind flächendeckende Informationen notwendig (GLÄBER & BIRGER, 2004; DENK & GLÄBER, 2011). Fernerkundungsdaten unterschiedlichster geometrischer und spektraler Auflösung wurden hierfür im Mitteldeutschen Raum erfolgreich verwendet (BIRGER, 2002; SCHMIDT & GLÄBER, 1996). In Abhängigkeit von der Zielstellung und der Spezifik des Gebietes kann die geometrische Auflösung (GSD) fernerkundlicher Sensorik limitierend wirken. Aufgrund der Heterogenität stehen selbst bei räumlich höher aufgelösten Sensoren kaum reine Pixel von Vegetationsklassen zur Verfügung. Die spektrale Entmischung ist seit längerem

¹Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Institut für Geowissenschaften und Geographie, Fachbereich für Geofernerkundung und Kartographie, Von-Seckendorff-Platz 4, 06120 Halle (Saale),
E-Mail: Florian.Beyer@student.uni-halle.de, Christian.Götze@geo.uni-halle.de,
Cornelia.Glaesser@geo.uni-halle.de

² Tschechischer Geologischer Dienst, Klárov 3 118 21 Praha 1, veronika.kopackova@geology.cz

Gegenstand intensiver Forschung (z.B. ADAMS & SMITH, 1986; SHIMABUKURO & SMITH, 1991; BOARDMAN, 1993; FOODY & COX, 1994; ATKINSON et al., 1997; KESHAVA & MUSTARD, 2002) Die Adaption der Verfahren auf Standorte sehr heterogener Verteilung von Substraten und Pioniervegetation in Bergbaubereichen/Tagebaufolgelandschaften ist deutlich unterrepräsentiert (LÉVESQUE, J. et al., 1997; BIRGER, 2002).

Im Rahmen dieser Arbeit soll die Eignung des Bedeckungsgrades der Pioniervegetation zur Ableitung geochemischer Milieus anhand des pH-Wertes unter Anwendung von Standardmethoden der Bildauswertung hyperspektraler Flugzeugsscannerdaten untersucht werden.

2 Untersuchungsgebiet & Daten

2.1 Untersuchungsgebiet

Das Untersuchungsgebiet (Abb. 1) befindet sich im Egergraben zwischen Cheb und Karlovy Vary (Tschechische Republik) und ist Teil des Braunkohlereviere Sokolov. Die verschiedenen Flächen des stillgelegten Tagebaus haben eine Ausdehnung von 200 km² (KOPACKOVÁ et al., 2009). Im Zentrum des Braunkohlebeckens befindet sich die gleichnamige Bergbaustadt Sokolov. Mit mittleren Jahresniederschlägen von 560 mm und einer Jahresmitteltemperatur von 7,2°C ordnet sich die Region ins vollfeuchte warmgemäßigte Regenklima ein.

Die miozänen und oligozänen Beckenfüllungen bestehen zu 60% aus vulkanischen Auswurfmaterialien und zu 40% aus Sedimenten. Aufgrund hoher geogener Sulfidgehalte ist das gesamte Revier von *Acid Mine Drainage* (AMD) betroffen. Zum einen ist dies auf Pyritverwitterung zurückzuführen. CHEVREL et al. (2008) gibt Pyritgehalte in kohleführenden Schichten von 5 – 8% an. Zum anderen werden hydrothermale Ablagerungen im Kluftsystem des Beckens genannt (ROIJK, 2004; CHEVREL et al., 2008).

Das Untersuchungsgebiet (USG) Litov (Abb. 1) befindet sich am Westrand des Braunkohlereviere. Die Kippersedimente von Litov weisen ein extrem saures Milieu (pH 2,2 – 5,0) auf und zeigen damit korrespondierend hohe Gehalte von sekundären Jarositmineralen sowie geringe Gehalte an organischer Substanz. Im Vergleich zu anderen Flächen des Reviers besitzt Litov geringere Tongehalte (CHEVREL et al., 2008). Die dominanten Korngrößen sind schluffiger Lehm bis stark tonige Schluffe. Als Rekultivierungsmaßnahmen wurden Kiefernstecklinge (*Pinus nigra*) ohne Auftragung organischer Materials ins pure Kippensediment (PÖPPERL, 2001) gepflanzt (Abb. 1).

Die Flächen im nördlichen und teilweise auch südlichen Bereich sind mit Pioniervegetation unterschiedlicher Vergesellschaftungen bestanden (Abb. 1). Das Höhenwachstum von *Calamagrostis epigejos* (Landreitgras) übertrifft im Verlaufe der Wachstumsperiode (ab Juni) alle anderen Pionierpflanzen. Diese Pionierpflanze besitzt einen sehr großen Toleranzbereich gegenüber verschiedenen Stressoren. Insbesondere zeigt sich diese Widerstandsfähigkeit beim pH-Wert. *C. epigejos* verträgt stark saure (bis 2,3) bis basische (bis 8) Milieus. Auf sauren Standorten, ab etwa pH 3, nehmen jedoch die Bestandsdichte und Deckungsausprägung kontinuierlich ab. Im Untersuchungsgebiet bildet *C. epigejos* unterschiedliche Bedeckungsgrade unabhängig von der Hanglage aus, was auf das geochemische Milieu des Substrats zurückgeführt wird. Die restlichen Flächen stellen offene Substrate dar.

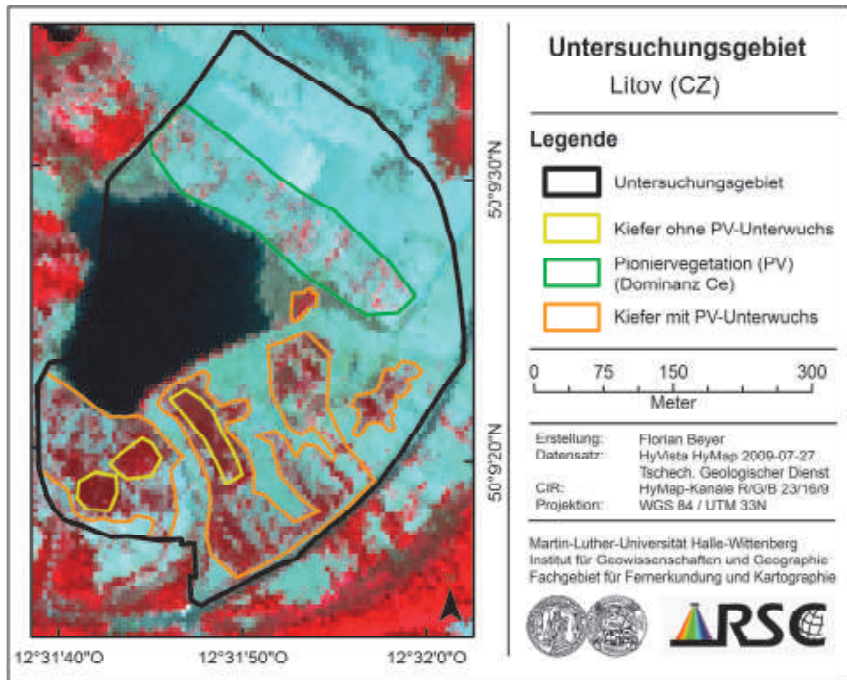


Abb. 1: Untersuchungsgebiet Litov im Braunkohlerevier Sokolov, Tschechische Republik (CZ); (PV = Pionierv egetation ; Ce = Calamagrostis epigejos).

2.2 Daten

2.2.1 Flugzeugscannerdaten HyMap

Im Rahmen der HyEurope Kampagne wurde das Untersuchungsgebiet am 27. Juli 2009 mit dem HyMap-Sensor der Firma HyVista befliegen. Zur vollständigen Gebietsabdeckung wurden neun Flugstreifen aufgezeichnet. Die Daten wurden von J. HANUS (Institute of Systems Biology and Ecology) sowie von S. WEIDE und M. BACHMANN (Deutsches Luft- und Raumfahrtzentrum) mit ATCOR-4 atmosphärisch, topographisch und BRDF korrigiert. Mit Hilfe von PARGE wurden die geometrische Korrektur, Orthorektifikation und Georeferenzierung (WGS84, UTM 33N) realisiert (KOPACKOVÁ, 2010). Nach der Prozessierung weist der Datensatz eine spektrale Auflösung von 125 Kanälen (Wellenlängen(WL)-Bereich 450 – 2.480 nm; Kanalbreite 15 – 20 nm) und eine geometrische Auflösung von 5 m auf.

Kanalbereiche mit starken Abweichungen wurden eliminiert. Dies betrifft die WL-Bereiche der atmosphärischen Wasserbanden zwischen 300 – 1.500 nm (11 HyMap-Kanäle) und 1.800 – 2.050 nm (7 HyMap-Kanäle) sowie einen stark verrauschten Bereich im SWIR von 2.450 –

2.480 nm (3 HyMap-Kanäle). Danach standen noch 104 Kanäle für die Auswertung zur Verfügung. Es folgten eine Rauschreduzierung in Form einer *Minimum Noise Fraction*-Transformation (BOARDMAN & KRUSE, 1994) und die Normierung der Datensätze mit Hilfe des *Continuum Removal*-Algorithmus (KRUSE & LEFKOFF, 1993). Die Normierung arbeitet Absorptionscharakteristika mathematisch heraus.

2.2.2 Feld- & Laborspektrometrie

Im Rahmen des Hyperspectral Sokolov Project (HYPSO) wurden in den Jahren 2009 und 2010 mehrere Feldbeprobungen durchgeführt. Im Juli 2009 erfolgten umfassende reflexionsspektrometrische Messungen parallel zur Befliegung des Gebietes mit dem HyMap-Sensor (HyEurope 2009). Die Messungen erfolgten sowohl im Gelände als auch im Labor. Zum Einsatz kam ein FieldSpec Pro FR von Analytical Spectral Devices (ASD). Das Spektrometer arbeitet im WL-Bereich von 350-2.500 nm. Eine Spektralbibliothek wurde erstellt, die 230 gemittelte Spektren von verschiedenen Substratoberflächen, Pionierpflanzen und aufgefosterter Vegetation aus dem gesamten Braunkohlerevier beinhaltet.

Die Bibliothek, bestehend aus den ASD Spektren mit 2.151 Bändern, wurde auf das Kanalsetting von HyMap resampled. Die Spektrenvorverarbeitung erfolgte analog dem Vorgehen bei den HyMap-Datensätzen. Neben der Entfernung stark verrauschter Bereiche wurden alle Spektren der *Continuum Removal*- Normierung unterzogen.

2.2.3 Chemische Analysen

Das Substrat im USG wurden nach DIN 19730 geochemisch auf die Parameter pH, Fe, S und K analysiert. Die Proben wurden 2010 während zweier umfangreicher Feldkampagnen akquiriert. Die Entnahme erfolgte unterhalb des Hauptwurzelraums, in circa 15 cm Tiefe. In Litov wurden 15 Proben unter verschiedenen Pflanzenarten und Bodenbedeckungsgraden genommen. Zum einen sind das Substrate unter Pioniervegetation mit Dominanzbestand von *C. epigejos*, zum anderen unter Kiefernforst (*Pinus nigra*). Die Punkte- und Testflächenkartierung erfolgte mit Hilfe eines differenziellen GPS.

3 Methodik

3.1 Halb-Automatische Endmemberextraktion

Zur Extraktion möglichst repräsentativer Endmember (EM) wurde ein drei-stufiges Verfahren entwickelt. Zunächst kommt ein fünfstufiger Entscheidungsbaum zur Vorklassifizierung zum Einsatz. Mischpixel aus Substrat und Vegetation, sowie Wasser- und AMD-Flächen wurden damit maskiert. Dafür wurden engbandige normalisierte Indizes zur Differenzierung dieser Oberflächentypen in entsprechend charakteristischen spektralen Bereichen angewendet. Für die Substrate wurde eine für Tonminerale typische Bande bei 2.200 nm, für Vegetation der *Red Edge*-Bereich und für die AMD-Flächen die Eisenbanden im VNIR selektiert. Die verbleibenden Pixel repräsentieren weitestgehend reine Oberflächensignaturen.

Im zweiten Schritt wurden potentielle Endmember mit Hilfe des *Sequential Maximum Angle Convex Cone*- Algorithmus (SMACC) gesucht. Diese *Residual Minimization*-Methode wurde von GRUNNIGER et al. (2004) entwickelt. Es erfolgt automatisiert eine schrittweise Selektion potentieller EM. Ein Vektorraum (*Convex Cone*) spannt im n-D-Raum (n Kanäle) einen Bereich spektral extremer Pixel auf, was den ersten EM repräsentiert. Von dort wird ein zweiter

Convex Cone mit dem maximal möglichen Winkel, abhängig von der im Datensatz vorhandenen spektralen Variabilität, projiziert. Dieser zweite Vektorraum repräsentiert den zweiten EM. Der dritte EM stellt also die größte Distanz zu den schon existierenden EM dar. Der Vorgang wird solange wiederholt, bis ein schon existenter EM wieder selektiert wird, oder eine bestimmte Anzahl von vorgegebenen EM erreicht ist.

Da die gefundenen EM noch keiner Oberflächenklasse zugeordnet werden können, muss ein dritter Bearbeitungsschritt zur Identifikation folgen. Dafür kommt die *Spectral Library* zum Einsatz, in der 230 Labor- und Feldspektren aus den Feldkampagnen 2009 bis 2011 eingepflegt sind. Die Identifikation erfolgt mit den zwei Ähnlichkeitsmaßen *Spectral Angle Mapper* (SAM) und *Spectral Feature Fitting* (SFF) (KRUSE et al., 1993; CLARK et al., 1990). Jeder EM wird mit jedem der 230 Vergleichsspektren mit Hilfe dieser Maße verrechnet. Daraus ergibt sich eine Rangordnung, aus dem der Typ des jeweiligen EM ablesbar ist.

3.2 Lineare Entmischung

Basierend auf der Annahme, dass ein Pixelspektrum eine Linearkombination der spektralen Charakteristika aller im Pixel repräsentierten Objekte darstellt, können die jeweiligen Abundanzen berechnet werden (BOARDMAN, 1989; BACHMANN, 2007; YANG, 2007). Ein Pixelspektrum wird mathematisch folgendermaßen beschrieben:

$$R_{mix} = R_1 * f_1 + R_2 * f_2 + R_n * f_n \quad (1)$$

R_{mix} stellt das Mischspektrum aller Endmember (EM) dar, R_n das Reflexionsspektrum von EM n und f_n die Abundanz von EM n . Unter Berücksichtigung von Gleichung (1) gilt nach TSENG (2000) und BACHMANN (2007) für einen Datensatz mit m Bändern (\vec{b}) und n Endmember (α)

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_m \end{pmatrix} \quad (2)$$

wobei a_{mn} der Reflexionswert für Endmember n in Band m ist und x_n die Abundanz von Endmember n darstellt. Nach den gesuchten Abundanzen (x) umgestellt, gilt vereinfacht:

$$x = A^{-1} * b \quad (3)$$

Somit ergibt sich ein einfaches Gleichungssystem mit einer quadratischen Matrix A , wobei gilt $m = n$. Bei hyperspektralen Daten ist jedoch ein überbestimmtes Gleichungssystem der Normalfall, demnach gilt $m \gg n$. Da sich die Invertierung einer nicht-quadratischen Matrix nur mit Hilfe der Pseudo-Inversen A^+ umsetzen lässt, ergibt sich eine Näherungslösung der Kleinsten-Quadrate-Methode nach Moore-Penrose-Invertierung (BACHMANN, 2007)

$$x = A^+ * b \quad (4)$$

wobei:

$$A^+ = (A^T A)^{-1} A^T$$

Außerdem existieren Faktoren wie Sensorrauschen und Überstrahlungseffekte vom Nachbarpixel, so dass gilt:

$$\sum_{j=1}^n x_j \leq 1 \quad \text{für alle } j \in n, \quad (5)$$

Standardmäßig wird zum Entmischungsmodell der *Root Mean Square-Error (RMSE)* pro Bildpixel berechnet, was dem Gesamt-Modellierungsfehler entspricht (BACHMANN, 2007):

$$RMSE_{\text{Mischungsmodell}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (b_i - b_i^*)^2}{m}}, \quad (6)$$

wobei b dem gemessenen und b^* dem modellierten Signal in m Kanälen entspricht.

Die Entmischung mittels LSU wird optimiert und der *RMSE* minimiert, je besser die EM die vorkommenden reinen Objektklassen im hyperspektralen Datensatz repräsentieren.

3.3 Beziehung zwischen den geochemischen Analysen und Abundanzwerten der Pioniervegetation

Zwischen den Werten aus dem Abundanzbild der Pioniervegetation sowie den zugehörigen chemischen Analysewerten punktuell beprobter Standorte im Gelände wurde der statistische Zusammenhang mittels Korrelationskoeffizienten (R) nach Spearman ermittelt. Diese Variablen gingen weiterhin in ein Regressionsmodell (PLS) ein, um die Einzelresultate flächenmäßig auf die HyMap-Daten zu übertragen. Zur Überprüfung der Ergebnisse wurde eine Cal/Val-Validierung (2:1) durchgeführt.

4 Ergebnisse

4.1 Halb-Automatische Endmemberextraktion

Mit dem Entscheidungsbaum wurden für das Untersuchungsgebiet die zentrale Wasserfläche, zwei großräumige AMD-Flächen und weitestgehend alle Pixel mit Mischspektren aus Vegetation und Substrat ausmaskiert. Auf den verbleibenden Flächen wurde mit Hilfe des SMACC fünf potentielle EM generiert. Drei der fünf Pixel Spektren konnten mittels SAM und SFF eindeutig als Substrat, Pioniervegetation und Kiefer identifiziert werden (Abb. 2). Zwei Pixelspektren wurden für die weitere Betrachtung ausgeschlossen. Die Identifikationswerte von SAM und SFF lagen nah bei null. Da der SMACC Pixelspektren mit der höchsten spektralen Variabilität sucht und als EM deklariert, werden auch einzigartige Pixel selektiert. Makroskopisch betrachtet waren die zwei ausgeschlossenen Spektren verrauschte Fehlpixel im Übergang zum zentralen Gewässer des Untersuchungsgebietes.

Der gefundene Substrat-EM (Abb. 2) zeigt spektral eine für Tonminerale typische Bande bei 2.200 nm (SWIR). Dies ist über das gesamte Untersuchungsgebiet uniform. Größere Abweichungen zeigen sich im VNIR, wo Schwankungen von Eisen (II) und Eisen (III) unterschiedliche Bandentiefen verursachen (HUNT et al., 1971; JARMER, 2005). Durch die Vorklassifizierung während der EM-Extraktion wurden Extremstandorte mit hohem Eisen (II)- und Eisen (III)-Gehalten ausmaskiert. Dies betrifft vor allem die AMD-Flächen, die aufgrund ihrer hohen Acidität kein Pflanzenwachstum zulassen. Die Absorption von Eisen (II) im Blau ist beim gefundene Substrat-EM erkennbar. Dagegen sind deutliche Absorptionsfeatures im Bereich zw. 700 und 850 nm, verursacht von Eisen (III) nicht nachweisbar (BURNS, 1993). Ein weiteres Spektrum (Abb. 2) wurde als Pioniervegetation identifiziert. Aufgrund des Dominanzbestandes

von *C. epigejos* haben die Ähnlichkeitsmaße die höchsten Trefferquoten bei reinen Laborspektren für diese Pflanze angezeigt. Zum Zeitpunkt der Befliegung befand sich die Pflanze phänologisch im Übergang vom Hoch- zum Spätsommer. Die Stängel und Blütenstände waren durch Austrocknung gelb-braunfarbig verfärbt. Spektral lässt sich das deutlich im *Red Edge*-Bereich erkennen. Die Abschwächung der Rotabsorption (675 nm) und Reflexion im nahen Infrarot (775 nm) sind typische Merkmale. Das Kieferspektrum zeigt hingegen den typischen Verlauf eines immergrünen Nadelbaums (Abb. 2, dunkelgrüner Graph).

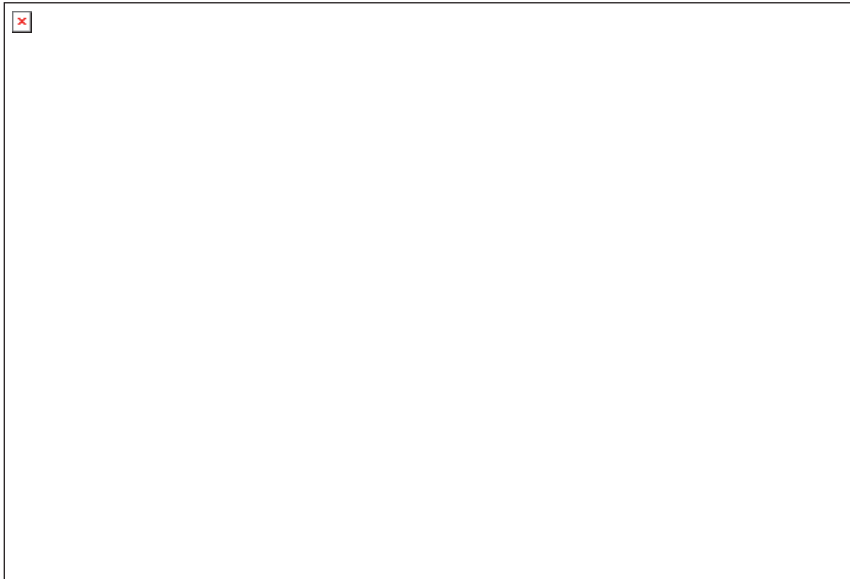


Abb. 2: Endmember die für die Entmischung verwendet wurden: Substrat, Pioniervegetation und Kiefer.

4.2 Lineare Entmischung

Als Produkt der Entmischung erhält man vier Abundanzbilder (Abb. 3), jeweils eines für jeden Endmember und ein Fehlerbild (*RMSE*). Die im Gelände aufgenommenen Bedeckungsgrade und die dementsprechenden Abundanzen aus dem HyMap-Datensatz zeigen höchstsignifikante Übereinstimmungen ($R^2= 0,9$). Den größten Fehler (*RMSE* 3-8 %) zeigt der Algorithmus dort, wo sich Kiefern mit einem hohen Flächenanteil toter organischer Substanz befinden (Abb. 3). Dieser Oberflächentyp ging nicht in die Berechnung ein. Zur besseren Betrachtung des Abundanzbildes der Pioniervegetation, wurden diese Bereiche geschwärzt. Unter dem Gesichtspunkt der natürlichen Sukzession ist vor allem der nördliche Teil des Untersuchungsgebietes interessant. Dort befinden sich ausschließlich Flächen der Pioniervegetation mit einzelstehenden Bäumen (z.B. *Betula*). Der *LSU-RMSE* beträgt auf diesen Flächen durchschnittlich 1,5 % (STABW 0,5 %).

Der Vergleich der LSU-Abundanzen mit einer SAM-Klassifikation auf Basis der EM als Ausgangsdaten zeigt, dass besonders die Flächen der Pioniervegetation unterschiedlich dargestellt werden. Aufgrund der starken Mischung zwischen Pioniervegetation und Substrat kann der SAM die Mischspektren nicht eindeutig zuordnen. Demgegenüber entmischt das LSU diese Pixel.

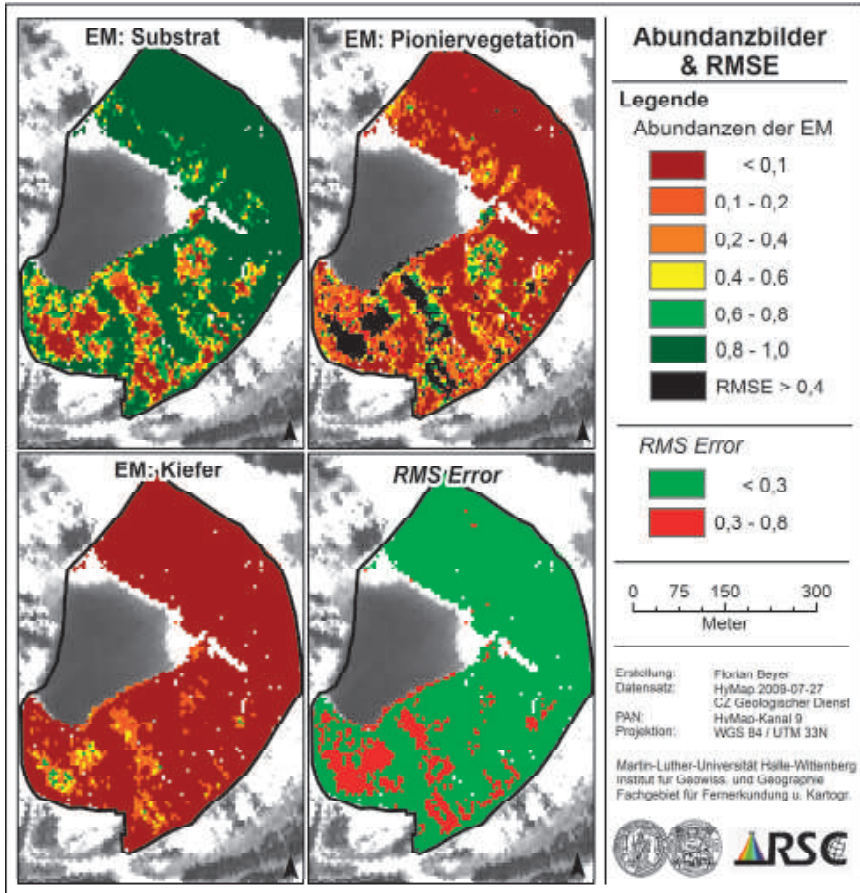


Abb. 3: Mit Linear Spectral Unmixing generierte Abundanzbilder der Endmember (EM) und Root Mean Square Error (RMSE).

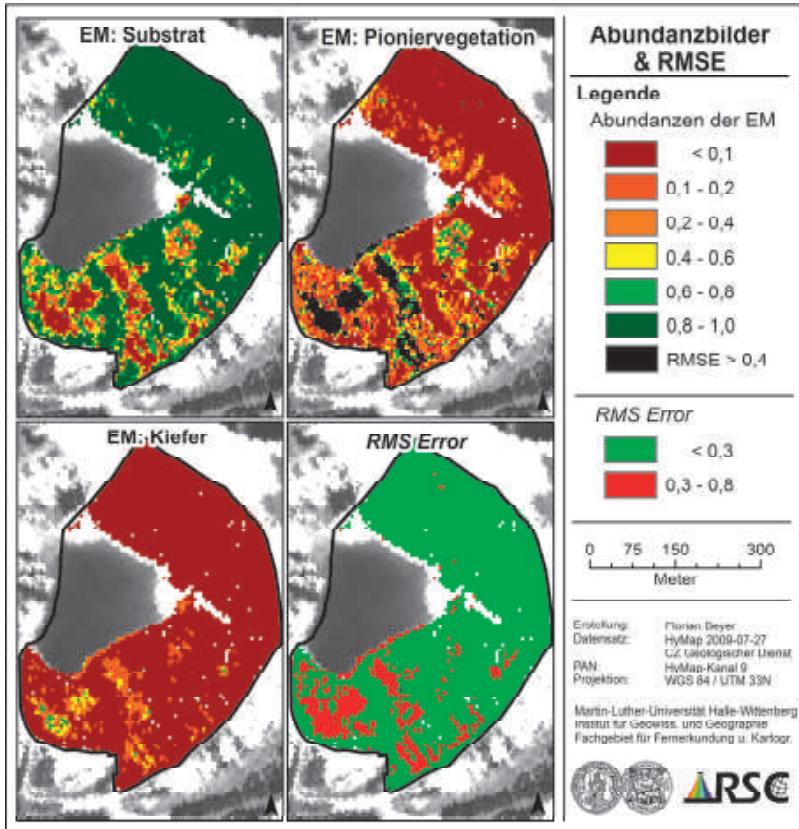


Abb. 4: pH-Wert-Verteilungskarte des Substrats im Untersuchungsgebiet Litov, generiert aus dem *Linear Spectral Unmixing* - Abundanzbild der Pioniervegetation.

4.3 Beziehung zwischen Geochemie und Abundanz der Pioniervegetation

In das Regressionsmodell gingen die an 15 Punkten ermittelten pH-Werte sowie die Kohlenstoff-, Schwefel-, Eisen- und Kaliumgehalte ein. Die Korrelation (Tab. 1) nach Spearman zeigt für alle untersuchten Parameter höchstsignifikante Zusammenhänge zum Bedeckungsgrad der Pioniervegetation.

Tab. 1: Korrelation zwischen geochemischen Parametern und den LSU-Abundanzen für Pioniervegetation (nach Spearman).

N=15		pH	S	Fe	K
Abundanzen	r	,870	-,678	-,834	,879
	Sig. (2-seitig)	,000	,005	,000	,000

Mit Hilfe der generierten Gleichung der Regressionsgerade wurde eine pH-Wert-Verteilungskarte (Abb. 4) erzeugt. Basierend auf den höchstsignifikanten Ergebnissen wurde die Stichprobe in ein Kalibrierungs- und Validierungsdatensatz (2:1) aufgeteilt. Das Kalibrierungsmodell für den pH-Wert und die Abundanzen zeigt ein $R^2 = 0,81$, die Validierung $R^2 = 0,68$.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die Methoden der vorliegenden Arbeit zeigen, dass von *Linear Spectral Unmixing* generierte Abundanzbilder der Pioniervegetation zur Ableitung geochemischer Parameter verwendet werden können. Durch gezielte und präzise Ausmaskierung nicht-relevanter Oberflächentypen, die Anwendung einer automatisierten EM-Extraktion mittels SMACC und die Selektion finaler EM anhand spektraler Ähnlichkeitsmaße konnte eine deutlich Verbesserung der Ergebnisse erzielt werden.

Für zukünftige Arbeiten ist die Übertragung der Methodik auf weitere Rekultivierungsflächen vorgesehen. Dabei stehen insbesondere Standorte mit stark variablen geochemischen Milieus im Forschungsfokus. Des Weiteren sollen einzelne Kompartimente des vorgestellten Workflows mit anderen Methoden ausgetauscht werden, um weitere Verbesserungen zu ermöglichen.

6 Danksagung

An dieser Stelle sei unseren Projektpartnern vom Institute of Systems Biology and Ecology J. HANUŠ sowie vom Deutschen Luft- und Raumfahrtzentrum S. WEIDE und M. BACHMANN für die Bereitstellung der vorprozessierten und korrigierten Hymap-Daten gedankt. (Projekt: "Assessment of Mining Related Impacts Based on Utilization of ARES Airborne Hyperspectral Sensor", GACR No. 205/09/1989)

7 Literaturverzeichnis

- ADAMS, J. B. & SMITH, M. O., 1986: Spectral mixture modeling: a new analysis of rock and soil types on the Viking Lander 1 Site. *Journal of Geophysical Research*, 91, S. 8098–8112.
- ATKINSON, P., CUTLER, M. & LEWIS, H., 1997: Mapping sub-pixel proportional land cover with AVHRR imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 18(4), S. 917–935.
- BACHMANN, M. U. R., 2007: Automatisierte Ableitung von Bodenbedeckungsgraden durch MESMA-Entmischung. Dissertation, Julius-Maximilians-Universität Würzburg.
- BIRGER, J., 2002: Multisensorale und multitemporale Fernerkundungsdaten zur Erfassung, Differenzierung und Veränderungsanalyse ausgewählter Vegetationsstrukturen der Bergbaufolgelandschaft Mitteldeutschlands. Dissertation, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg.
- BOARDMAN, J. W., 1993: Automating spectral unmixing of AVIRIS data using convex geometry concepts. *AVIRIS Proceedings*.
- BOARDMAN, J. W. & KRUSE, F. A., 1994: Automated spectral analysis: a geological example using AVIRIS data, north Grapevine Mountains, Nevada. *ERIM Tenth Thematic Conference on Geologic Remote Sensing*, S. I-407 - I-418.

- BURNS, R., 1993: Mineralogical Applications of Crystal Field Theory, Second Edition, Cambridge University Press, Cambridge.
- CLARK, R. N., GALLAGHER, A. J. & SWAYZE, G. A., 1990: Material absorption band depth mapping of imaging spectrometer data using the complete band shape least-squares algorithm simultaneously fit to multiple spectral features from multiple materials: Proceedings of the Third Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS) Workshop, JPL Publication, **54**, S. 176 - 186.
- DENK, M. & GLÄBER, C., 2011: Reflexionsspektrometrische Erfassung von Stoffausträgen aus Kalihalden am Beispiel der Bergbaufolgelandschaft bei Teutschenthal. 31. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF, S. 303-310.
- DIN 19730 (1997-06): Soil quality - Extraction of trace elements from soil using ammonium nitrate solution.
- FOODY, G.M. & COX, D.P., 1994: Sub-pixel land cover composition estimation using a linear mixture model and fuzzy membership functions. *International Journal of Remote Sensing*, **15**(3), S. 619-631.
- GLÄSSER, C. & BIRGER, J., 2004: Integriertes Langzeitmonitoring der Bergbaufolgelandschaften – Möglichkeiten und Grenzen. In: GLÄBER, C. (Hrsg.): Nachhaltige Entwicklung von Folgelandschaften des Braunkohletegbaus – Stand und Perspektiven in Wissenschaft und Praxis. Sonderband der Zeitschrift für Angewandte Umweltforschung. Sonderheft **14** S. 276-285.
- GRUNINGER, J, RATKOWSKI, A. J. & HOKE, M. L., 2004: The Sequential Maximum Angle Convex Cone (SMACC) Endmember Model. *Proceedings SPIE, Algorithms for Multispectral and Hyperspectral and Ultraspectral Imagery*, **5425** (1), S. 1-14.
- HANUŠ, J., 2010: Data processing report for pre-processing of hyperspectral HyMap data acquired during HypSo 2009 flight campaign. Unveröffentlicht, Academy of Sciences of the Czech Republic.
- HUNT, G. R., SALISBURY, J. W. & LENHOFF, C. J., 1971: Visible and near infrared spectra of minerals and rocks. III. Oxides and hydroxides. *Modern Geology*, **2**, S. 195-205.
- JARMER, T. (2005): Der Einsatz von Reflexionsspektrometrie und Satellitenbilddaten zur Erfassung pedochemischer Eigenschaften in semi-ariden und ariden Gebieten Israels. Dissertation, Universität Trier, Trierer Geographische Studien, **29**.
- KESHA, N. & MUSTARD, J.F., 2002: SPECTRAL UNMIXING. *IEEE SIGNAL PROCESSING MAGAZINE*, S. 44-57.
- KOPACKOVÁ, V., BOURGUIGNON, A., CHEVREL, S., KOUBOVÁ, M. & ROJIK P., 2009: Effect of mineralogical and geochemical properties on reflectance properties of waste from Sokolov open pit lignite mine. In: FOURIE, A.B. & TIBBETT, M. (Hrsg.), 2009: Mine Closure 2009, Australian Centre for Geomechanics Fourth International Conference, S. 569–580.
- KOPACKOVÁ, K., ALBRECHTOVÁ, J., LHOTÁKOVÁ, Z., HANUŠ, J., MALENOVSKÝ, Z., JUNG, A., GLÄSSER, C., CHEVREL, S., BURGON, A. & SALBACH, C., 2010: HYPISO (Hyperspectral Sokolov): A multidisciplinary hyperspectral Project, Assessing mining related impacts by means of images spectrometry. ESA (Hrsg.): Hyperspectral 2010 Workshop.
- KRUSE, F. A., LEFKOFF, A. B., BOARDMAN, J. B., HEIDEBRECHT, K. B., SHAPIRO, A. T., BARLOON, P. J. & GOETZ, A. F. H., 1993: The Spectral Image Processing System (SIPS) - Interactive Visualization and Analysis of Imaging spectrometer Data. *Remote Sensing of the Environment*, **44**(2-3), S. 145-163.

- KRUSE, F. A. & LEFKOFF, A. B., 1993: Knowledge-based geologic mapping with imaging spectrometers: Remote Sensing Reviews, Special Issue on NASA Innovative Research Program (IRP) results, 8, S. 3-28.
- LÉVESQUE, J., SZEREDI, T., STAENZ, K. & BOLTON, V.S.D., 1997: Spectral unmixing for monitoring mine tailing site rehabilitation copper cliff mine, Sudbury, Ontario. Twelfth International Conference and Workshops on Applied Geological Remote Sensing, 1, S. 340-347.
- PÖPPERL, J., 2001: Bodenschutz und Rekultivierung im Kohlenrevier von Sokolov. Stadt Marktredwitz (Hrsg.), 2001: 2. Marktredwitzer Bodenschutztage, Umsetzung der Bodenschutzgesetze und Flächenressourcen-Management, S. 92-95. Internet: http://www.lfu.bayern.de/boden/bodenschutztage_mak/doc/mbt_2001.pdf Abruf am 15. März 2011.
- ROJIK, P., 2004: New stratigraphic subdivision of the Tertiary in the Sokolov Basin in Northwestern Bohemia. Journal of the Czech Society, 49 (3-4), S. 173-187.
- SHIMABUKURO, Y.E. & SMITH, J.A., 1991: The least-squares mixing models to generate fraction images derived from remote sensing multispectral data. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 29, S. 16-20.
- SMALL, C., 2001: Estimation of urban vegetation abundance by spectral mixture analysis. International Journal of Remote Sensing, 22 (7), 1305 – 1334.
- TSENG, Y.-H., 2000: Spectral unmixing for the classification of hyperspectral images. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 23, S. 1532-1538.
- YANG, C.; EVERITT, J. H. & BRADFORD, J. M., 2007: Using multispectral imagery and linear spectral unmixing techniques for estimating crop yield variability. American Society of Agriculture and Biological Engineers, 50(2), S. 667-674.

Sparseness Inducing Initialization for Nonnegative Matrix Factorization in Hyperspectral Data

WOLFGANG GROSS¹ & WOLFGANG MIDDELMANN²

Spektrales Unmixing, also die Zerlegung des gemessenen Spektrums in seine Grundbestandteile, hat aufgrund der geringen räumlichen Auflösung hyperspektraler (HS) Sensoren in den letzten Jahren stark an Bedeutung gewonnen. Die Nichtnegative Matrix-Faktorisierung (NMF) wird zum Unmixing von HS-Datensätze verwendet, wodurch eine Datenreduktion und somit eine einfachere Interpretierbarkeit erreicht wird. Die hier vorgestellte Sparseness Inducing Initialization (SII) schränkt das nichtlineare Optimierungsproblem, das dem Unmixing zugrunde liegt, auf dünn besetzte Lösungen ein und ermöglicht eine vereinfachte Auswertung. Das Verfahren sucht mittels wiederholter Orthogonalprojektionen die Spektren, die einen möglichst großen Kegel im Merkmalsraum der HS-Kanäle aufspannen. Die Ergebnisse bekannter Initialisierungsmethoden werden im Hinblick auf Approximationsfehler, Sparseness und Realitätstreue, anhand simulierter Hyperspektraldaten, mit der neuen Methode verglichen. Es wird gezeigt, dass die SII für rauschfreie Daten die Endmember, also reine Materialien, die nicht durch Mischungen beschrieben werden können, mit Sicherheit findet. Für den Fall verrauschter Daten liegen die von der SII gefundenen Endmemberkandidaten immer noch in der Nähe der tatsächlichen Endmember. Somit wird durch die nachfolgende NMF ein physikalisch plausibles, dünn besetztes Unmixing berechnet.

1 Introduction

The Nonnegative Matrix Factorization (NMF) follows the assumption that every spectrum in a hyperspectral (HS) data set is a linear combination of its base materials with nonnegative coefficients. Here, the data is factorized into an endmember matrix, containing the spectra of pure materials and the abundance matrix with the corresponding fractions. The NMF provides inherent advantages, such as sparse results and a feasible representation of the underlying natural laws. It is also a low rank approximation of HS data, which is essential for complex classification algorithms.

There are other methods to reduce dimensionality, but with respect to the physical properties of HS data the frequently used Principle Component Analysis (PCA) is flawed. The N-FINDR by WINTER is also dismissed, as dimensionality reduction must be performed before the actual endmembers are selected. Thus, critical information may be lost.

To warrant acceptable results, a good initialization to NMF is crucial. In this paper, a new approach is compared to the commonly used methods in terms of approximation error, sparseness and abundance fit of the unmixing. The proposed method is called Sparseness Inducing Initialization (SII) and is based on the idea of orthogonal subspace projection (OSP).

¹Wolfgang Groß, Fraunhofer Institut für Optronik, Systemtechnik und Bildauswertung, Gutleuthausstr. 1, 76275 Ettlingen; E-Mail: wolfgang.gross@iosb.fraunhofer.de

²Wolfgang Middelman, Fraunhofer Institut für Optronik, Systemtechnik und Bildauswertung, Gutleuthausstr. 1, 76275 Ettlingen; E-Mail: wolfgang.middelmann@iosb.fraunhofer.de

The SII determines the vertices of the HS data cloud via subsequent orthogonal projections along the line segments connecting the already chosen endmember candidates. When the data is not degraded by noise, these endmembers are extreme directions of the smallest convex cone containing the mixed spectra.

In order to test the performance of the different initialization methods under controlled conditions, a HS data set is simulated from a set of manually chosen normalized reflectance spectra. Each initialization is followed by NMF computation to analyze their general performance and behavior.

2 Basics of spectral unmixing

The most popular algorithm for computing a NMF is the multiplicative update rule by LEE & SEUNG. It is essentially an alternating steepest descent algorithm with embedded step size calculation, which prevents coefficients to drop below zero. In this paper, only a brief description of the algorithm is given. Additional information regarding its convergence and performance can be found in BERRY. As neighboring spectra are not taken into account by this kind of unmixing, the usual HS data cube is considered to be a nonnegative $m \times n$ matrix A , where m is the number of bands and n the number of recorded spectra. To determine a rank k approximation (usually $k \ll m$ CHANG ET AL) of A , the following nonlinear optimization problem occurs:

$$\begin{aligned} \min \|A - WH\|_F^2, \\ \text{s.t. } W, H \geq 0 \text{ component-wise.} \end{aligned} \tag{1}$$

Here, the $m \times k$ matrix W contains the endmember spectra in each column. The columns of H hold the abundances, which are the fractions of each endmember in the corresponding sample. The multiplicative update is performed as follows (LEE):

$$H^{(t+1)} = H^{(t)} * \frac{W^{(t)T} A}{W^{(t)T} H^{(t)}}, \tag{2}$$

$$W^{(t+1)} = W^{(t)} * \frac{A(H^{(t)})^T}{W^{(t)} H^{(t)}}, \tag{3}$$

where t is the iteration index and $*$ and $/$ denotes multiplication/division per element. ϵ is a small, strictly positive value to prevent division by zero.

3 Initialization methods

There are a number of commonly used initialization methods for NMF. The most popular are explained below. In general, initialization should be fast to compute and robust. Otherwise, the whole algorithm has to be performed multiple times and each result has to be evaluated separately.

3.1 Initialization of W

This section contains short descriptions of the standard initialization methods used for NMF. Additional information and examples for implementation can be found in WILD, LANGVILLE, PLAZA, CHAUDHRY & BOUTSIDIS.

Random & Random Acol Initialization: The random methods are among the fastest and easiest to code. W is initialized as a dense matrix with random numbers between 0 and 1 or by averaging random samples for every candidate. According to WILD, these initializations have the potential to outperform every other method in terms of approximation error.

Spherical k -means Clustering: More expensive in terms of computing time are clustering algorithms. It is only possible to use them for initialization, if the sample size and/or the dimension of the samples is reduced. Also, for rare materials, where the signature to neighboring spectra is very similar, clustering might not give satisfying results. Often, a better representation of the data sample can be achieved in terms of mean squared error, when a large cluster is split in two and no cluster is assigned to the rare material.

In this paper, the spectral angle is used as a metric for clustering. A reasonable choice, as spectra of identical mixtures should be treated identical, regardless of their intensities. The algorithm, which is very similar to conventional k -means clustering, can be found in WILD et al.

Maximin-distance algorithm: This approach was first mentioned in TOU and is very easy to code. It usually starts by choosing the spectrum with maximal intensity as the first candidate. In case of unmixing, a temporary spectrum should be chosen, which is discarded once the first real candidate has been found.

A metric like the Euclidean distance or the spectral angle is used to determine the spectrum, where the minimal distance towards all other endmember candidates is maximal.

Pixel Purity Index (PPI): The PPI algorithm used for endmember extraction can be found in CHAUDHRY. The basic idea is to calculate the convex hull of a high dimensional data set. This is a feasible approach, as the minimal convex cone containing the data also contains the convex hull of that data. For that, the data is projected onto so called skewer vectors and the spectra with maximal and minimal values are saved. After a set number of projections the algorithm stops. Usually, more than k candidates are found at that point.

There are several methods to reduce the amount of candidates without computing the volume of every k -dimensional cone from the possible candidates. One method is to compute the correlation matrix of the candidates and iteratively discarding those, where the line total is maximal, until only k candidates are left.

Singular value decomposition (SVD) based initialization: The SVD based initialization is explained in BOUTSIDIS and has the great advantage of containing no random elements. The initialization always computes the same endmember candidates if performed on the same data set. Thus, the results of unmixing are reproducible.

3.2 Sparseness Inducing Initialization (SII)

The method proposed in this paper is motivated by orthogonal subspace projection. It guarantees to find the correct endmember candidates in noiseless data and also gives good estimates for endmembers in real HS data, if the noise variance of distinct materials isn't dominating the spectral information. Similar to the SVD approach, it uses no random methods, which results in a reproducible NMF.

The algorithm operates on $\|\cdot\|_2$ -normalized data to prevent unwanted discriminations of spectra with varying intensities. That means, all m -dimensional spectra lie in the m 1-dimensional hyperspace containing the Euclidean unit vectors. Thus, line segments between two spectral vectors will never leave that space and no further correction is necessary.

The basic idea is to consecutively find the vertices of the HS point cloud. The spectra corresponding to the vertices are the ideal endmember candidates as they cannot be generated

through linear combination of other samples. Mathematically, they are extreme directions of the minimal convex cone containing the data points.

The algorithm takes an iterative approach as follows:

1. Given the data $m \times n$ matrix A , the number of endmembers k , the $m \times k$ zero matrix W and the $m \times (k - 1)$ zero matrix L :
2. Let $A_{:1}$ be the first column of A
3. $\text{idx} = \text{argmax}_i \|A_{:1} - A_{:i}\|_2, i = 1, \dots, n$
4. $W_{:1} = A_{:\text{idx}}$
5. $\text{idx} = \text{argmax}_i \|w_{:1} - A_{:i}\|_2, i = 1, \dots, n$
6. $W_{:2} = A_{:\text{idx}}$
7. $L_{:1} = W_{:2} - W_{:1}$
8. **for** $j = 3: k$
9. Calculate space $S^{(j-2)}$ orthogonal to L
10. Project all spectra onto $S^{(j-2)}$
11. $\text{idx} = \text{argmax}_i \left\| \left\| W_{:1}^{(j-2)} - A_{:i}^{(j-2)} \right\|_2 \right\|, i = 1, \dots, n$
12. $W_{:j} = A_{:\text{idx}}$
13. $L_{:j-1} = W_{:j} - W_{:1}$
14. **end**

Here, $A_{:i}$ denotes the i th column of A and $A_{:i}^{(j)}$ is the i th column of the matrix A projected to $S^{(j-2)}$.

In steps 3 and 4, the sample with maximal distance to the starting point is computed. In a convex set, $W_{:1}$ must be a vertex. $W_{:2}$ is determined in the same manner. In step 7, the first line segment between the two endmember candidates is determined. Every iteration of the for loop starts with the calculation of an $m - (j - 2)$ -dimensional subspace, which is orthogonal to the columns in L . During the repeated projection to the orthogonal subspaces $S^{(j-2)}$ of descending dimension, all spectra, which are mixtures of $W_{:1}, \dots, W_{:j-1}$ theoretically have identical coordinates. If the computation accuracy for $S^{(j-2)}$ isn't worse than the distinction of the endmembers, the following steps find another vertex of the point cloud. Thus, the distance from the endmembers to all other samples is computed in $S^{(j-2)}$. The index of the sample with maximal distance is saved (step 11) and the corresponding sample in the original m -dimensional space is appended to W (step 12). Finally, the line segment between $W_{:2}$ and $W_{:j}$ is saved in L for further iterations.

3.3 Initialization of H

For the abundance matrix H , there exist only a small number of initialization methods. Tests have shown that initializing H with random positive values leads to good results in terms of approximation error. Unfortunately, comparing the results to the real abundances in a simulated data set, major discrepancies occur, which disqualify random initialization completely. As the unmixing algorithm utilizes the direction of steepest descent, the method used should already give a rough estimate to real abundances.

The proposed method can be found in KWAN and is performed after every initialization of W . Given W , whether it contains the real endmembers or only endmember estimates from any initialization method, the abundances in H are calculated as

$$H_{it} = W_{it}^T P_{OSP}^{-1} \quad (4)$$

where W_{it} is the i th column of W , I is the unit matrix of suitable dimension and W_{-i} is the endmember matrix W without the i th endmember. $P_{OSP}^{-1} = (I - W_{-i}(W_{-i}^T W_{-i})^{-1} W_{-i}^T)A$ is the fraction of A orthogonal to $\text{span}(W_{-i})$.

This is done for every column W_{it} and the resulting abundance estimates are normalized per sample, according to $\|\cdot\|_1$. To evaluate the different initialization methods for W , the latter initialization for H is used for every analyzed method.

4 Experiments and Discussion

To compare the different initialization methods with respect to their final unmixing results, two HS data sets with known abundances were simulated. In both cases, seven distinct spectra were manually chosen from a real HS image and 10,000 samples were generated.

The actual endmembers were included in the sample set to make sure the initializations have a chance to find them. Every sample was generated using at most three endmembers with random abundances, respecting the sum-to-one constraint. This was done to model a situation where unmixing is necessary due to the spatial resolution of HS sensors.

The first setup was generated to test the performances in the noiseless case, where every sample can be reconstructed without residual. The other setup was generated to model real data and noise was included. The noise boundaries were determined by separately computing the variance of the chosen endmember materials in the original data set. After generating A according to $A = WH$, the individual samples were degraded by noise with respect to the used endmembers and their noise boundaries.

To compute the NMF, every initialization was followed by 2,000 iterations of the multiplicative update. The features **abundance fit**, **approximation error** (eq. 1), **sparseness** (eq. 5) and **initialization time** are depicted in Table 1 and Table 2 for the ideal and the noisy case. Only five tests were performed per initialization method as the results showed minor variances.

The order in which the endmembers are chosen during initialization didn't necessarily mirror the real endmember order. Thus, the abundances after unmixing had to be compared to the original by finding the best possible permutation. Using a rank k approximation, there are $k!$ possible permutations to test for best abundance fit. The correlation between the reference and the calculated abundances were computed per sample and accumulated. That means the abundance fit lies in the interval between 0 and 10,000.

The sparseness measure used in these tests is based on the relationship between the L_1 norm and the L_2 norm and is computed as

$$\text{spar}(A_{it}) = (\sqrt{n} - (\|A_{it}\|_1 / \|A_{it}\|_2)) / (\sqrt{n} - 1), \quad (5)$$

where A_{it} is the i th row of A and n the number of samples. The function interpolates smoothly between 0 (dense) and 1 (sparse). Further discussion of this sparseness measure can be found in HOYER, where a combination of the NMF with a sparseness projection step is introduced.

The reference data had a sparseness of 0.55 in the ideal case. Giving the reference sparseness when noise is involved is pointless, as the NMF tries to approximate the noisy data, not the reference.

Table 1: Results of 7 endmembers without noise

	random	random Acol	spherical k-means	maximin-distance	PPI	SVD-based	SII
abundance fit	5642	6615	7366	6649	6627	4890	9983
approx. error/ 10^{-6}	8.70	6.30	4.46	12.01	4.19	35.75	0.70
sparseness	0.14	0.27	0.25	0.15	0.17	0.44	0.55
init. time	0.052	0.070	0.951	0.185	75.208	0.871	3.056

Table 2: Results of 7 endmembers with noise

	random	random Acol	spherical k-means	maximin-distance	PPI	SVD-based	SII
abundance fit	6306	6353	7469	4828	8145	4531	8511
approx. error/ 10^{-6}	8.41	5.88	4.16	13.51	4.28	53.61	4.05
sparseness	0.17	0.30	0.39	0.15	0.46	0.45	0.54
init. time	0.052	0.071	1.010	0.198	80.394	0.937	3.145

In Table 1 and Table 2 the test results are shown. The SII performs remarkably well in all categories, whether the data is ideal or contains noise. When no noise is involved, the endmembers chosen by SII are exactly the reference endmembers. Thus, the final discrepancies in the results are caused by the initialization of \mathbf{H} . As all HS data is degraded by noise, only that case is discussed thoroughly.

The SII has the highest correlation to the real abundances. When noise is involved, abundance fit measure has to be treated carefully, as no endmembers exist in the data sample, which could be used to fully approximate every sample. The SII also achieves the lowest approximation error with $4.05 \cdot 10^{-6}$ per sample.

The averaged sparseness over all abundance images of SII is nearly identical to the sparseness of the reference data in the ideal case. In conjunction with the high abundance fit, it follows that no major discrepancies occurred. Computation length for the SII is considered subordinate, regarding the improvement towards other methods, but it's still faster than PPI or spherical k -means clustering if the whole data set is analyzed.

The disadvantages of the other initialization methods become apparent when looking at the results. The random methods don't resemble the actual endmembers and the resulting unmixing has no reference to the real abundances. The cluster centers of spherical k -means clustering can never be the actual endmembers and no proof exists that NMF can compensate that. The maximin-distance algorithm performs well, when the endmembers are spread out equally, but if one or more endmembers are similar, candidates in the midst of the HS point cloud are chosen instead. For the PPI, the biggest variances occurred in the results. This is due to the random choice of skewer vectors. It cannot be guaranteed that all vertices of the data cloud are found once the algorithm terminates. Also, the SVD approach fails to find the real endmembers and

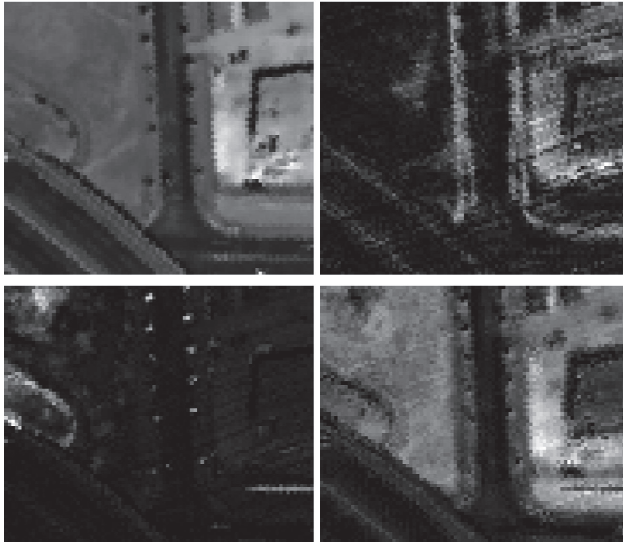


Image 1: Intensity image of a real data set (upper left image) and abundance images

most of the data is approximated with only one candidate. The abundances of the other endmembers are very sparse and only account for small deviations and noise. The good sparseness is futile when compared to its other attributes.

Finally, some abundance images of a real data set are shown in Image 1. The upper left image depicts the intensity image of a real data set. In the next image, mainly the bikeway is visible, which is a different kind of concrete than the street. The lower left image predominantly shows the abundances of small trees along the street, but also other vegetation areas. The fourth image tries to model the remaining vegetation. The visible distortions in the abundance images are the results of interpolation during georeferencing, which must be taken into account, when the best possible unmixing must be achieved.

5 Conclusion and future research

In this paper, a new initialization method based on the idea of sequential orthogonal subspace projection is proposed. During the experiments, only the proposed method reliably found the endmember spectra in the case of noiseless, simulated data. If the data is degraded by noise, it still performs superior in comparison to the other initialization methods. Also, the algorithm uses no random computation, which results in a reproducible factorization of the data. It achieves the best results in terms of approximation error, sparseness and abundance fit when compared to the state of the art initialization algorithms.

In future works, the Sparseness Inducing Initialization will be modified to automatically stop selecting new endmember candidates according to the progression of step 11 in the SII algorithm. Thus, unmixing can be performed without a priori knowledge about the number of distinct materials in a HS data set.

The NMF has been discussed with respect to the Frobenius norm. Other possibilities for setting up the optimization problem should be studied.

6 References

- BERRY, M., BROWNE, M., LANGVILLE, A., PAUCA, V. & PLEMMONS, R., 2007: Algorithms and applications for approximate nonnegative matrix factorization. *Computational Statistics & Data Analysis*, **52**, S. 155–173.
- CHANG, C., 2005: Orthogonal Subspace Projection (OSP) Revisited: A Comprehensive Study and Analysis, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, **43** (3), S. 502-518.
- CHANG, C. & DU, Q., 2004: Estimation of Number of Spectrally Distinct Signal Sources in Hyperspectral Imagery, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, **42** (3), S. 608-619.
- CHAUDHRY, F., WU, C., LIU, W., CHANG, C. & Plaza, A., 2006: Pixel purity index-based endmember extraction for hyperspectral data exploitation, *Image Processing*, **661** (2), S. 29–62.
- HOYER, P., 2004: Non-negative Matrix Factorization with Sparseness Constraint, *Journal of Machine Learning Research*, **5** S. 1457–1469
- KWAN, C., AYHAN, B., CHEN, G., WANG, J., JI, B. & CHANG, C., 2006: A novel approach for spectral unmixing, classification, and concentration estimation of chemical and biological agents, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, **44** (2), S. 409–419.
- LANGVILLE, A., MEYER, C. & ALBRIGHT, R., 2006: Initializations for the Nonnegative Matrix Factorization, *Proceedings of the Twelfth ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*.
- LEE, D. & SEUNG, H., 2001: Algorithms for Non-negative Matrix Factorization. *Adv. Neural Info. Proc.*, **13**, S. 556–562.
- MASALMAH, Y. & VÉLEZ-REYES, M. 2007: The impact of initialization procedures on unsupervised unmixing of hyperspectral imagery using the constrained positive matrix factorization, *Proc. SPIE 6565*, 6565B, doi:10.1117/12.719779.
- PLAZA, A. & CHANG, C.-I., 2006: Impact of initialization on design of endmember extraction algorithms. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, **44** (11), S. 3397–3407.
- TOU, J. & GONZALEZ, R., 1974: *Pattern Recognition Principles*, Reading, MA: Addison-Wesley, S. 92–94.
- WILD, S., 2003: Seeding non-negative matrix factorizations with spherical k-means clustering, Master's Thesis, <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.88.1623>.
- WILD, S., CURRY, J. & DOUGHERTY, A., 2004: “Improving Non-negative Matrix Factorization Through Structured Initialization”, *Pattern Recognition*, vol. 37, no. 11, pp 2217-2232.
- WINTER, M., 1999: N-FINDR: an algorithm for fast autonomous spectral end-member determination in hyperspectral data. *Proc. SPIE*, **3753** (266), doi: 10.1117/12.366289.

Hyperspektraldaten zur Erfassung des organischen Kohlenstoffs landwirtschaftlicher Böden

THOMAS JARMER¹, HOLGER LILIENTHAL², MANFRED EHLERS¹,
SASCHA KLONUS¹ & PABLO ROSSO³

Zusammenfassung: In der vorliegenden Studie wird die räumliche Erfassung des organischen Kohlenstoffs landwirtschaftlicher Böden mittels Hyperspektraldaten vorgestellt. Der Gehalt des organischen Kohlenstoffs wurde mittels Partial Least Squares Regression (PLSR) mit sehr hoher Genauigkeit ($r^2_{cv} > 0.85$) aus Laborspektren und daraus simulierten HyMap-Spektren geschätzt. Die besten Ergebnisse ergaben sich dabei auf Basis der Originalspektren ohne eine Spektrenvorverarbeitung. Die Übertragung des entwickelten PLSR-Modells auf HyMap-Bilddaten ermöglichte die räumliche Erfassung des organischen Kohlenstoffs. Die geschätzten Gehalte des organischen Kohlenstoffs lagen im Konzentrationsbereich der Laboranalytik und spiegelten die räumlichen Gegebenheiten des Ackers wider.

1 Einleitung

Die spektrale Reflexion von Böden wird maßgeblich durch bodeninhärente spektrale Eigenschaften, wie unterschiedliche Kombinationen mineralischer Komponenten, organischer Substanz und Bodenfeuchte beeinflusst (BAUMGARDNER et al. 1985). Die Beziehung zwischen spektraler Reflexion und organischer Substanz wurde bereits in vielen Studien untersucht (z. B., BEN-DOR & BANIN 1995; UDELHOVEN et al. 2003; VISCARRA ROSSEL et al. 2006; JARMER et al. 2008; JARMER et al. 2010). Obwohl einige dieser Studien ihr Potential unter Laborbedingungen belegten, sind Anwendungen für bildgebende hyperspektrale Systeme jedoch selten und auf kleine Gebiete beschränkt (SELIGE et al. 2006; GOMEZ et al. 2008).

Neben ihrer Bedeutung für den Bodenschutz ist die Erfassung und Kartierung organischen Kohlenstoffs (C_{org}) auch bei der Entwicklung von Strategien zur Minderung der globalen Erwärmung von großer Bedeutung (JONES et al. 2005), da Böden im Vergleich zur Vegetation oder der Atmosphäre mehr als doppelt so viel Kohlenstoff speichern (BATES 1996) und so zu einer CO_2 -Reduzierung beitragen können.

Die fernerkundliche Erfassung des C_{org} im Boden besitzt ein großes Potential für ein bodenbezogenes Betriebsmanagement. Eine besondere Bedeutung gewinnt diese vor dem Hintergrund der schnellen Entwicklung neuer hyperspektraler Fernerkundungssensoren.

- 1) Thomas Jarmer, Manfred Ehlers, Sascha Klonus, Institut für Geoinformatik und Fernerkundung, Universität Osnabrück, Barbarastrasse 22b, D-49076 Osnabrück; E-Mail: tjarmer@iqf.uni-osnabrueck.de, mehlers@iqf.uni-osnabrueck.de, sklonus@iqf.uni-osnabrueck.de
- 2) Holger Lilienthal, Institut für Pflanzenbau und Bodenkunde, Bundesallee 50, D-38116 Braunschweig; E-Mail: holger.lilienthal@jki.bund.de
- 3) Pablo Rosso, Product Development Group, RapidEye AG, Molkenmarkt 30, D-14776 Brandenburg an der Havel; Email: rosso@rapideye.de

2 Material und Methoden

2.1 Untersuchungsgebiet

Das Untersuchungsgebiet befindet sich in der Nähe des Ortes Engter zehn Kilometer nördlich von Osnabrück im südwestlichsten Teil Niedersachsens ($52^{\circ}23'N / 8^{\circ}02'E$; Abb. 1). Die mittlere jährliche Niederschlagsmenge im Untersuchungsgebiet liegt bei etwa 700 mm. Der untersuchte landwirtschaftliche Schlag („Faldieke“) erstreckt sich 300 m in West-Ost-Richtung und 120 m in Nord-Süd-Richtung mit einer Größe von ca. fünf Hektar. Bei den Böden des untersuchten Ackers handelt es sich um nährstoffarme Gleye und Pseudogleye.



Abb. 1: Lage des Untersuchungsgebietes

2.2 Material und Methoden

Um die räumliche C_{org} -Variabilität zu berücksichtigen, wurde nach der Ernte im Oktober 2009 eine 30 x 30 m-Rasterbeprobung durchgeführt ($n = 39$). An jeder Rasterposition wurde eine integrative Oberbodenprobe des obersten Zentimeters des Bodenprofils auf einer Fläche von ca. 1 m² genommen. Jede Beprobungsstelle wurde mit einem differenziellen GPS exakt verortet. Die Bodenproben wurden im Labor luftgetrocknet, vorsichtig zerkleinert und auf 2 mm gesiebt und anschließend für die chemische Analyse gemörsert. Die C_{org} -Bestimmung wurde am RC612 (Temperaturgesteuerter Kohlenstoff/Wasser-Phasenanalysator) der Firma LECO Instrumente GmbH vorgenommen.

Im Labor wurde die bi-direktionelle Reflexion der gesiebten Bodenproben mit einem ASD FieldSpec-III Spektorradiometer (Analytical Spectral Devices Inc.) in 1 nm-Auflösung im Wellenlängenbereich 350 - 2.500 nm gemessen. Als Reflexionsstandard wurde Spectralon® verwendet. Die Reflexionsmessungen erfolgten in Nadir-Position des optischen Sensors in einem Abstand von zehn Zentimetern zur Bodenprobe. Referenzpanel und Bodenproben wurden mit einer 1000 W Videolampe aus ca. einem Meter Entfernung unter einem Einstrahlungswinkel von 45 Grad beleuchtet.

Die Berechnung absoluter Reflexionsspektren erfolgte durch Multiplikation der gemessenen Reflexion mit der zertifizierten Reflexion des Spectralons. Für die folgenden Untersuchungen fand nur der Spektralbereich 400 - 2.300 nm Verwendung, um die stark verrauschten Wellenlängenbereiche der Reflexionsspektren auszuschließen. Die Spektrenvorverarbeitung

umfasste unterschiedliche Vorverarbeitungstechniken (Min-Max-Normierung, 1. Ableitung, Vektornormierung), um die Auswahl des am besten geeigneten Vorverarbeitungsverfahrens für die Quantifizierung relevanter pedochemischer Parameter zu bestimmen.

Die Quantifizierung von C_{org} aus den Reflexionsspektren wurde mittels Partial Least-Squares Regression (PLSR) in Kombination mit den verschiedenen Spektrenvorverarbeitungsverfahren vorgenommen. Die maximale Anzahl der latenten Variablen (Rank) wurde auf zehn begrenzt. Die Ergebnisse der PLSR wurden nach der 'leave-one-out'-Methode Kreuzvalidiert (cross validated, cv). Das Bestimmtheitsmaß (r^2), der Quadratwurzelfehler (RMSE) und das Verhältnis des Standardfehlers der Vorhersage zur Standardabweichung (RPD) wurden als Maße für die Schätzgenauigkeit bestimmt (MALLEY et al. 2004). Eine Ausreißerdetektion erfolgte entsprechend der $\pm 2,5$ fachen standardisierten Residuen (PELL 2000).

2.3 Bilddaten

Der Hyperspektraldatensatz wurde mit dem flugzeuggestützten HyMap während der HyEurope Kampagne 2009 am 19. August 2009 zwischen 11.00 h und 11.30 h lokaler Zeit aufgenommen. Der Sensor zeichnete Spektren im Wellenlängenbereich 420 - 2.480 nm in 125 Spektralbändern mit einer geometrischen Bodenauflösung von ungefähr 5 m im Nadir auf. Durch das DLR wurde eine Vorverarbeitung der Bilddaten inklusive Across-Track-Beleuchtungskorrektur, Atmosphärenkorrektur und parametrischer Geocodierung durchgeführt.

3 Ergebnisse und Diskussion

Die untersuchten Bodenproben weisen im Mittel $11,6 \text{ g kg}^{-1} C_{\text{org}}$ (Std.-Abw.: $4,9 \text{ g kg}^{-1}$) auf und variierten dabei zwischen $6,3 \text{ g kg}^{-1}$ und $26,9 \text{ g kg}^{-1} C_{\text{org}}$. Auf Grund der Überrepräsentation niedriger Werte lagen die C_{org} -Gehalte nicht normalverteilt vor. Da auch nach Logarithmieren keine Normalverteilung gegeben war, wurden die C_{org} -Werte aufsteigend sortiert und jede 4. Probe im Konzentrationsbereich unter 10 g kg^{-1} ausgeschlossen. Nach diesem Vorgehen war die Normalverteilung gegeben. Durch dieses Vorgehen erhöhte sich der Mittelwert für C_{org} auf $12,1 \text{ g kg}^{-1}$ während die Anzahl der Proben auf 31 sank.

Bei einer ersten Schätzung des C_{org} mit der PLSR wurde eine Bodenprobe als Ausreißer erkannt und von den folgenden Analysen ausgeschlossen. Diese Bodenprobe weist mit annähernd $26,9 \text{ g kg}^{-1}$ den höchsten C_{org} -Gehalt auf und liegt mehr als 6 g kg^{-1} über der Bodenprobe mit der nächsthöchsten C_{org} -Konzentration.

Die besten C_{org} -Schätzungen lieferte die PLSR für die Originalspektren und mit Einschränkungen für die Spektren der 1. Ableitung, während sowohl für min-max-normierte als auch für vektornormierte Spektren deutlich schlechtere Ergebnisse erzielt wurden (Tab. 1). Für die PLSR-Schätzung auf den Originalspektren wurde ein r^2_{cv} von 0.893 (RMSE_{cv} = 1.474; RPD = 3.07) mit sieben latenten Variablen erreicht. Die Güte der C_{org} -Schätzung aus den Spektren der 1. Ableitung war mit einem r^2_{cv} von 0.837 (RMSE_{cv} = 1.806; RPD = 2.51) noch immer hoch, erreichte aber nicht die Qualität der C_{org} -Prognose für die Originalspektren. Allerdings wurde in diesem Fall nur eine latente Variable im PLSR-Modell benötigt. Auch für die mäßigen Schätzungen aus den vektornormierten und min-max-normierten Spektren war jeweils nur eine latente Variable nötig. Es scheint, dass in den Originalspektren spektrale Unterschiede vorliegen, die eine Extraktion einer höheren Anzahl latenter Variablen für eine optimale Schätzung

bedingen. Der RPD erreichte sowohl für die Originalspektren als auch für die Ableitungsspektren einen Wert von über 2,5 und lag damit deutlich über dem von DUNN et al. (2002) für Bodenanalysen als Untergrenze vorgeschlagen Wert von 2,0 für exzellente Schätzungen.

Tab. 1: PLSR-Ergebnisse der C_{org} -Schätzung für unterschiedliche Spektrenvorverarbeitung

Vorverarbeitung	Rank	r^2_{cv}	RMSE $_{cv}$	RPD
keine	7	0,893	1,474	3,07
vektornormiert	1	0,727	2,333	1,94
min-max-norm.	1	0,763	2,169	2,09
1. Ableitung	1	0,837	1,806	2,51

In Abbildung 2 sind die kreuzvalidierten C_{org} -Schätzungen aus den Ableitungs- und Originalspektren dargestellt. Während der Zusammenhang zwischen gemessenen und geschätzten Konzentrationen auf Basis der Originalspektren für den untersuchten landwirtschaftlichen Schlag keinen signifikanter Offset erkennen lässt und die Regressionsgerade sehr nahe der 1:1-Linie liegt, ist für die Schätzungen aus den Ableitungsspektren eine erhebliche Abweichung von der 1:1-Linie erkennbar. Die Steigung der Regressionsgeraden weist in diesem Fall mit 0,801 eine erheblich von 1 abweichende Steigung auf, die durch eine Unterschätzung der C_{org} -Gehalte im höheren Konzentrationsbereich verursacht wird. Die Scatterplots zeigen außerdem, dass keine Standorte mit C_{org} -Gehalten zwischen 11 g kg^{-1} und 15 g kg^{-1} beprobt wurden mit der Folge einer Lücke in der Datenverteilung.

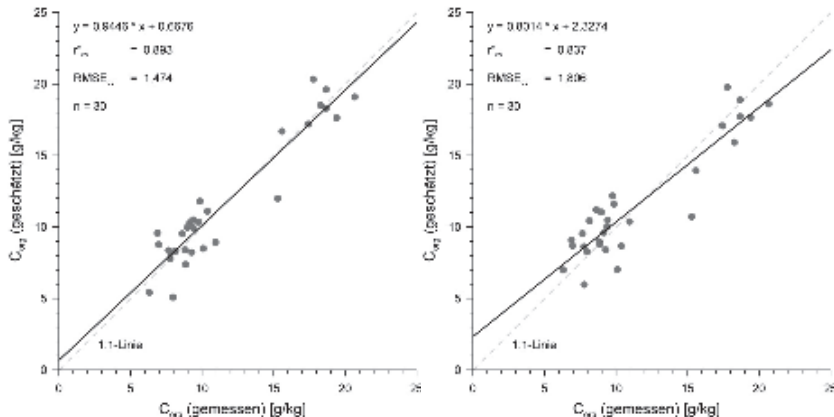


Abb. 2: Scatterplots der PLSR-Schätzungen (kreuzvalidiert) für C_{org} aus Originalspektren (links) und Ableitungsspektren (rechts)

Im Anschluss wurden die Spektren auf die spektrale Auflösung des HyMap-Sensors reduziert. Die resultierenden PLSR-Modelle waren den ursprünglichen Modellen in der Schätzgüte sehr ähnlich, wobei die Originalspektren ($r^2_{cv} = 0,869$; $RMSE_{cv} = 1,617$) und die Ableitungsspektren ($r^2_{cv} = 0,878$; $RMSE_{cv} = 1,562$) fast identische Ergebnisse lieferten (Tab. 2). Das Ergebnis der

Kreuzvalidierung ist in Abbildung 3 dargestellt. Das Scattergramm der geschätzten und gemessenen C_{org} -Konzentrationen zeigt, dass das Modell zu einer leichten Unterschätzung im höheren Konzentrationsbereich tendiert.

Tab. 2: PLSR-Ergebnisse der C_{org} -Schätzung aus Spektren aus simulierten HyMap-Spektren für unterschiedliche Spektrenvorverarbeitung

Vorverarbeitung	Rank	r^2_{cv}	RMSE _{cv}	RPD
keine	2	0,869	1,617	2,80
vektornormiert	1	0,730	2,320	1,95
min-max-norm.	1	0,765	2,161	2,16
1. Ableitung	4	0,878	1,562	2,90

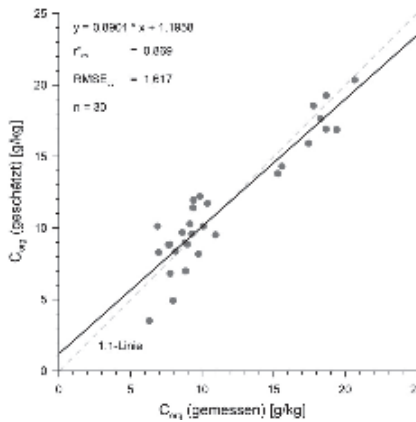


Abb. 3: Scatterplot der PLSR-Schätzung (kreuzvalidiert) für C_{org} aus Originalspektren in simulierter HyMap-Auflösung

Die hohe Prognosequalität erlaubte eine direkte Übertragung auf die HyMap-Daten. Hierzu wurde das PLSR-Modell für die Originalspektren in simulierter HyMap-Auflösung verwendet, da dieses bei fast gleicher Modellgüte auf nur zwei latenten Variablen basiert. Die Übertragung des entwickelten Modells auf die HyMap-Daten ermöglichte die räumliche Erfassung der Gehalte organischen Kohlenstoffes für den Acker „Faldiecke“ (Abb. 4).

Ein Vergleich der im Labor gemessenen C_{org} -Konzentrationen mit den aus den HyMap-Daten geschätzten Gehalten zeigte eine hohe Übereinstimmung in den statistischen Kenngrößen Mittelwert, Minimum, Maximum und Standardabweichung (Tab. 3). Allerdings wurde in den Bilddaten der mittlere C_{org} -Gehalt mit $13,9 \text{ g kg}^{-1}$ mehr als 2 g kg^{-1} höher als in den Labordaten ($11,7 \text{ g kg}^{-1}$) geschätzt. Das aus den Bilddaten geschätzte C_{org} -Minimum war im Vergleich zu den Laboranalysen $1,4 \text{ g kg}^{-1}$ höher während das Maximum um fast 1 g kg^{-1} niedriger geschätzt wurde.

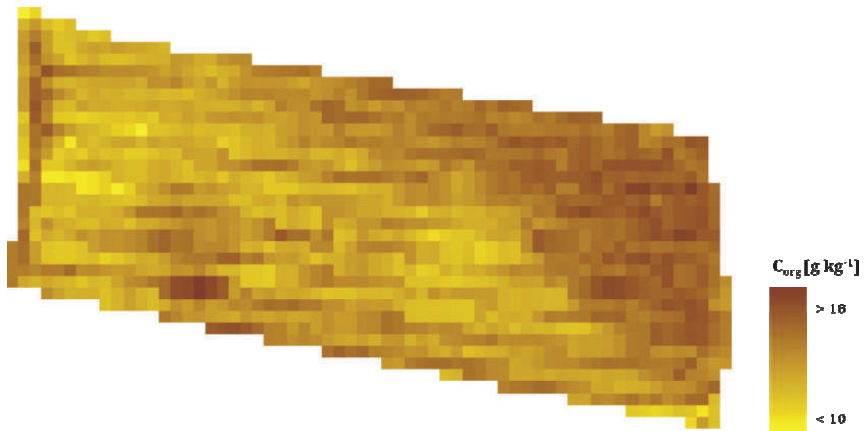


Abb. 4: Räumliche Schätzung der C_{org} -Konzentrationen aus den HyMap-Daten

Tab. 3: Deskriptive Statistiken der C_{org} -Gehalte der Bodenproben der chemischen Laboranalyse und der aus den HyMap-Daten geschätzten

C_{org} [$g\ kg^{-1}$]	Min	Max	Mw.	Std.-Abw.
Laboranalyse	6,3	20,7	11,7	4,9
Bildschätzung	7,7	19,8	13,9	2,3

Die höchsten Werte in der Karte der geschätzten C_{org} -Konzentrationen traten in der nord-östlichen Ecke des Feldes auf. In diesem Bereich wurden Konzentrationen von über $18\ g\ kg^{-1}$ prognostiziert. Areale mit niedrigem C_{org} -Gehalt unter $10\ g\ kg^{-1}$ wurden meistens vereinzelt im westlichsten Teil des Feldes geschätzt.

Um die Genauigkeit der bildbasierten Schätzungen zu überprüfen, wurden die aus den Bilddaten geschätzten C_{org} -Gehalte mit denen der im Gelände genommenen Bodenproben validiert. Das Ergebnis der Validierung ist in Abbildung 5 dargestellt.

Obwohl Tabelle 3 zeigt, dass die geschätzten und gemessenen C_{org} -Gehalte sich fast im gleichen Konzentrationsbereich befanden, zeigte die Validierung der einzelnen Pixelwerte gegen die im Labor gemessenen Bodenproben signifikante Unterschiede. Während Proben mit C_{org} über $15\ g\ kg^{-1}$ mit hoher Genauigkeit geschätzt wurden, erfolgte eine Überschätzung von Proben mit Gehalten unter $10\ g\ kg^{-1}$ um durchschnittlich ca. $3\ g\ kg^{-1}$. Diese Unterschiede könnten auf Up-Scaling Effekte zurückzuführen sein. Während die Bodenproben im Gelände von einer ca. $1\ m^2$ großen Fläche genommen wurden, repräsentiert ein HyMap-Pixel $25\ m^2$. Dies könnte zu einer Abschwächung kleinräumiger C_{org} -Extremwerte durch Mittelung geführt haben. Allerdings konnten diese Glättungseffekte für höhere Konzentrationen nicht beobachtet werden, so dass von anderen standortspezifischen Einflussfaktoren für die Überschätzung ausgegangen werden muss.

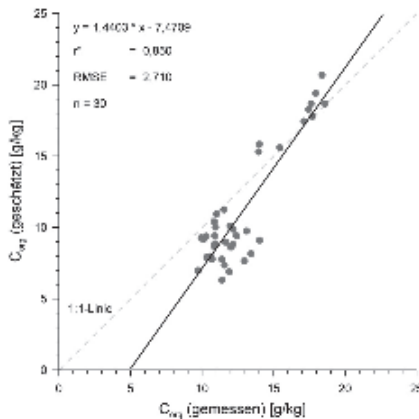


Abb. 5: Scatterplot der Validierung der PLSR-Schätzung aus den HyMap-Bilddaten

Die klaren räumlichen Unterschiede innerhalb des Feldes mit einem Dreieck hoher C_{org} -Konzentrationen im nord-östlichen Teil könnten auf Texturunterschiede zurückzuführen sein, die unterschiedlich starke Mikroschatten zur Folge haben. Außerdem beeinflusst die Textur die Aggregation von Bodenpartikeln und den Bodenfeuchtegehalt, die im Zusammenhang mit der Bodenreflexion stehen. So zeigten RICHTER et al. (2009) den Einfluss der Textur auf die Prognosegüte von Eisenoxiden auf. Selbst die luftgetrockneten Bodenproben wiesen noch geringe Unterschiede der Bodenfeuchte auf und zeigten für die Nord-Ost-Ecke Bodenfeuchtegehalte von über drei Prozent (Abb. 6). Während Unterschiede der Aggregation und des Bodenfeuchtegehalts für die Schätzungen aus den Laborspektren (auf 2 mm gesiebt, luftgetrocknet) minimiert werden konnten, ist dies für die Bilddaten nicht gegeben.

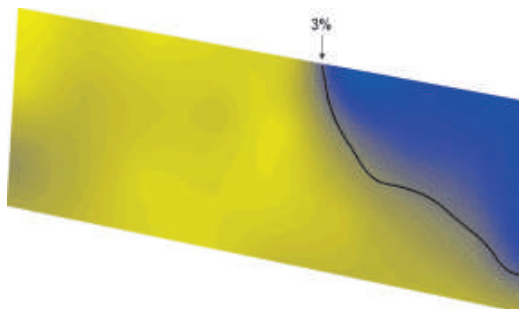


Abb. 6: Interpolierte Bodenfeuchtegehalte des untersuchten Ackers

4 Abschließende Bewertung und Ausblick

Die C_{org} -Schätzung mittels PLSR lieferte sowohl aus Laborreflexionsspektren als auch simulierten HyMap-Spektren verlässliche Ergebnisse. Die Übertragung des PLSR-Modells auf die HyMap-Bilddaten ermöglichte die Erfassung der räumlichen C_{org} -Variabilität mit ausreichender Genauigkeit. Allerdings zeigte die Validierung eine gewisse Überschätzung im niedrigen Konzentrationsbereich auf. Ursache hierfür könnten Texturunterschiede sein. Daher werden aktuell Texturanalysen der Bodenproben vorgenommen, um diese Annahme zu überprüfen.

Danksagung

Diese Studie wurde durch das Bundesministerium für Bildung und Wissenschaft finanziell gefördert. Die Autoren danken Martin Bachmann und Sebastian Weide von der DLR für Organisation und die Möglichkeit der Teilnahme an der HyEurope Kampagne 2009. Ganz besonders möchten wir uns bei dem Landwirt des untersuchten Schlages für seine Kooperation und Unterstützung bedanken.

5 Literaturverzeichnis

- BATJES, N. H., 1996: Total carbon and nitrogen in the soils of the world. *European Journal of Soil Science*, **47**, p. 151-163.
- BAUMGARDNER, M. F., SILVA, L. F., BIEHL, L. L. & STONER, E. R., 1985. Reflectance properties of soils. *Advances in Agronomy*, **38**, p. 1-44.
- 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), p. 364-372.
- GOMEZ, C., VISCARRA ROSSEL, R. A. & MCBRATNEY, A. B., 2008: Soil organic carbon prediction by hyperspectral remote sensing and field vis-NIR spectroscopy: An Australian case study. *Geoderma*, **146** (3-4), p. 403-411.
- JARMER, T., VOHLAND, M., LILIENTHAL, H. & SCHNUG, E., 2008: Estimation of some chemical properties of an agricultural soil by spectroradiometric measurements. *Pedosphere*, **18** (2), p. 163-170.
- JARMER, T., HILL, J., LAVÉE, H. & SARAH, P., 2010: Mapping soil organic carbon in semi-arid and arid ecosystems of Israel. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, **75** (1), p. 85-94.
- JONES, R. J. A., HIEDERER, R., RUCO, E. & MONTANARELLA, L., 2005: Estimating organic carbon in the soils of Europe for policy support. *European Journal of Soil Science*, **56**, p. 655-671.
- MALLEY, D.F., MARTIN, P.D. & BEN-DOR, E., 2004: Application in analysis of soils. Near-infrared spectroscopy in agriculture, **44**, p. 729-783.
- PELL, R.J., 2000: Multiple outlier detection for multivariate calibration using robust statistical techniques. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, **52** (1), p. 87-104.
- RICHTER, N., JARMER, T., CHABRILLAT, S., OYONARTE, C., HOSTERT, P & KAUFMANN, H., 2009: Free iron oxide determination in Mediterranean soils using diffuse reflectance spectroscopy. *Soil Science Society of America Journal*, **73**, p. 72-81.
- UDELHOVEN, T., EMMERLING, C. & JARMER, T., 2003: Quantitative analysis of soil chemical properties with diffuse reflectance spectrometry and partial-least-square regression: A feasibility study. *Plant and Soil*, **251** (2), p. 319-329.

VISCARRA ROSSEL, R. A., WALVOORT, D. J. J., MCBRATNEY, A. B., JANIK, L. J. & SKJEMSTAD, J. O., 2006: Visible, near infrared or combined diffuse reflectance spectroscopy for simultaneous assessment of various soil properties. *Geoderma*, **131**, p. 59–75.

Erzeugung von Bilddaten aus bodengestützten hyperspektralen Feldmessungen

HOLGER LILIENTHAL¹, NICOLE RICHTER¹, BASTIAN SIEGMANN², THOMAS JARMER²,
THOMAS SELIGE³ & BERNHARD HÖFLE⁴

Zusammenfassung: Spektrale Geländemesskampagnen sind meist an Strahlungswetterlagen gebunden. Außerdem nimmt die Erhebung von terrestrischen Spektraldaten und den dazugehörigen Referenzparametern sehr viel Zeit in Anspruch, so dass meist nur kleine Flächen oder ausgewählte Plots erfasst werden können. Das mobile Penta-Spek System, eine Entwicklung des Julius Kühn-Instituts, erfasst Spektraldaten nahezu witterungsunabhängig und durch Kopplung mit einem GPS zudem hochgenau geokodiert. Das Spektralsystem besteht aus sechs Spektrometern. Ein Spektrometer dient der permanenten Messung des einfallenden Sonnenlichtes, die anderen fünf werden zur Vermessung des Bestandes eingesetzt. Die vorgestellten Ergebnisse zeigen, dass die generierten Bilddaten des Penta-Spek Systems eine gute Ergänzung zu anderen bildgebenden hyperspektralen Verfahren darstellen können. Durch seine Witterungsunabhängigkeit kann das System Spektraldaten zudem mit hoher Flexibilität bereitstellen, was gerade für landwirtschaftliche Fragestellungen von hoher Bedeutung ist.

1 Einleitung

Spektrale Sensortechnik hält immer mehr Einzug in die praktische Landwirtschaft. Bisher kommen hauptsächlich Systeme (z.B. Yara N-Sensor[®], GreenSeeker[®], Crop Circle[™]) zum Einsatz, die auf Basis von Spektralmessungen Indices ableiten, um die Düngermenge teilschlagsspezifisch anzupassen. Die dabei verwendeten Vegetationsindices, wie zum Beispiel der NDVI, können aber ab einem Blattflächenindex (LAI) von 3 zur Sättigung führen und erfassen dann keine Bestandesunterschiede mehr (BARET & GUYOT, 1991). Allen verfügbaren terrestrischen Systemen ist gemein, dass sie nicht direkt einen Vegetationsparameter (z.B. Biomasse oder LAI) messen, sondern indirekt über einen spektralen Index eine Beziehung zum Nährstoffbedarf ableiten. Wie das genau geschieht ist oft Firmengeheimnis und ist damit eine Blackbox. Ein weiteres Problem ist der räumliche Meßbereich, indem die Spektraldaten erfasst werden.

- 1) Holger Lilienthal & Nicole Richter, Julius Kühn Institut, Institut für Pflanzenbau und Bodenkunde, Bundesallee 50, 38116 Braunschweig;
E-Mail: holger.lilienthal@jki.bund.de; nicole.richter@jki.bund.de
- 2) Bastian Siegmann & Thomas Jarmer, Institut für Geoinformatik und Fernerkundung, Universität Osnabrück, Barbarastrasse 22b, 49076 Osnabrück;
E-Mail: bsiegmann@igf.uni-osnabrueck.de; tjarmer@igf.uni-osnabrueck.de
- 3) Thomas Selige, TU München, Lehrstuhl für Bodenökologie, Ingolstädter Landstrasse 1, 85764 Neuherberg; E-Mail: selige@wzw.tum.de
- 4) Bernhard Höfle, Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg, Geographisches Institut, Berliner Straße 48, 69120 Heidelberg; E-Mail: hoefle@uni-heidelberg.de

Die Messung erfolgt meist nur einige Meter rechts und links der Fahrgasse. Da sich aber die Arbeitsbreiten in der Landtechnik stetig verbreitern (derzeit 24 – max. 54 m), kann die räumliche Variabilität des Vegetationsbestandes nicht hinreichend erfasst werden. Die Entwicklung neuer kostengünstiger hyperspektraler Sensoren bietet jedoch die Möglichkeit, Boden- und Pflanzenparameter direkt im Feld nicht-destruktiv zu bestimmen. Damit stehen völlig neue Möglichkeiten zur Verfügung, die den Schritt von der qualitativen hin zur quantitativen Bestimmung von Vegetationsparametern erlauben.

Die praktische Landwirtschaft stellt sehr hohe Anforderungen an die zeitliche Verfügbarkeit von Fernerkundungsdaten, da sich einerseits die Spektralsignatur aufgrund der phänologischen Entwicklung ständig verändert und andererseits die Reaktionsmöglichkeit des Landwirtes auf wenige Termine in der Vegetationsperiode beschränkt ist. Die klassische satelliten- und flugzeuggestützte Fernerkundung kann aufgrund der langen Vorverarbeitungszeiten und der unsicheren Datenverfügbarkeit nicht operationell in der praktischen Bestandesführung eingesetzt werden. Daher entwickelt das Julius Kühn Institut (JKI) derzeit das terrestrische Penta-Spek System, mit dem räumlich und spektral hochaufgelöste Reflexionsdaten im Feld gewonnen werden können. Ein wesentlicher Vorteil des Systems sind die geringen Vorverarbeitungszeiten, da aufwendige geometrische und atmosphärische Korrekturen entfallen können. Am Beispiel des LAI wird das Potenzial des Penta-Spek Systems den Daten des hyperspektralen Sensors AISA-DUAL (Airborne Imaging Spectrometer for Application) gegenübergestellt. Der LAI ist ein interessanter Bestandesparameter, da er für physiologische und ökologische Prozesse, wie zum Beispiel Lichtinterzeption, Photosynthese und Evapotranspiration von großer Bedeutung ist (WILHELM 2000, COOPS et al. 2004) und ein integratives Maß für die biotischen und abiotischen Einflussbedingungen darstellt (BOEGH et al. 2002).

2 Material und Methoden

2.1 Das Penta-Spek System

Das mobile hyperspektrale Aufnahmesystem Penta-Spek besteht aus sechs einzelnen Spektrometern (Ocean Optics Inc.), die in zwei Modulen gruppiert sind. Die technischen Daten sind in Tabelle 1 dargestellt:

Tab. 1. Technische Daten des Penta-Spek-Systems.

Eigenschaften	Modul 1 (VIS-NIR)	Modul 2 (UV-NIR)
Gesamter Spektralbereich [nm]	340 - 1026	188 – 1036
Volle Auflösung	2048 Kanäle @ 0,34 nm	2048 Kanäle @ 0,42 nm
Effektiver Spektralbereich [nm]	400 -850	400 -850
Effektive Auflösung	46 Kanäle @ 10 nm	46 Kanäle @ 10 nm
Minimale Erfassungszeit	3 msec	3 msec

Fünf-Spektrometer sind nach unten gerichtet, um Boden- oder Pflanzenbestände zu vermessen. Das sechste Spektrometer wird als Einstrahlungsreferenz verwendet, um die anderen fünf Spektrometer zu korrigieren (LILIENTHAL & SCHNUG, 2010). Somit kann direkt im Feld die spektrale Reflexion bestimmt werden (Abbildung 1).

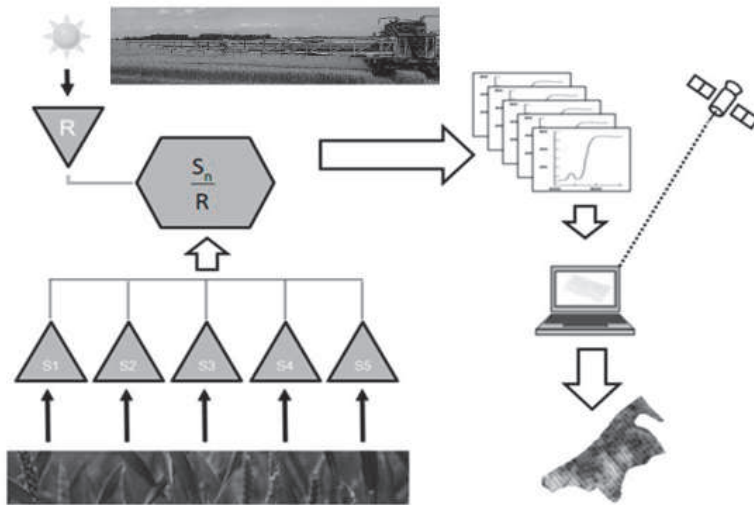


Abb. 1: Schematischer Aufbau des Penta-Spek-Systems.

Die geometrische Auflösung des Systems wird einerseits durch die Fahrgeschwindigkeit des Geräteträgers, andererseits durch die Sensorabstände entlang des Meß-Auslegers bestimmt. Neben der minimalen Fahrgeschwindigkeit (bei einem Traktor etwa 0,5 km/h) wird die räumliche Auflösung auch durch die maximale Frequenz des GPS-Signals (eine Koordinate pro Sekunde) bestimmt. Unter diesen Voraussetzungen kann eine maximale geometrische Auflösung von ca. 0,15 m in Fahrtrichtung erreicht werden. Die Auflösung in Richtung des Meß-Auslegers wird auch vom Sichtfeld der Optik (hier 45°) und der Entfernung zum Objekt bestimmt. Ein Setup mit einem Sensorabstand von 1 m zum Objekt erlaubt die Erfassung einer Fläche von 0,82 m² pro Sensor.

2.2 Datenauswertung

Für die Auswertung von Hyperspektraldaten eignen sich multivariate Methoden wie zum Beispiel die Partial Least Squares Regression (PLSR) (HÖSKULDSSON, 1988). Hierbei werden durch lineare Transformation aus einer großen Anzahl von Original-Deskriptoren (Spektralkanälen) neue orthogonale Faktoren (latenten Variablen) berechnet. Die latenten Variablen werden so ausgewählt, dass sie eine maximale Korrelation mit der abhängigen Variable (hier LAI) aufweisen.

2.3 Kalibrierungsdatensatz

Für die Entwicklung stabiler Vorhersagemodelle ist eine Kalibrierung notwendig, die den zu untersuchenden Parameter (LAI) in einer Vielzahl unterschiedlicher Ausprägungen beinhaltet. Aus diesem Grund wurde im Jahr 2011 in Braunschweig, Deutschland (52,29° N; 10,43° E) ein Feldversuch mit Winterweizen (*Triticum aestivum*) unter Bewässerung und unter Trockenstress durchgeführt. An mehreren Meß-Terminen vor der Blüte wurde im Gelände die bidirektionale Bestandesreflexion mit einem ASD FieldSpec Pro VNIR Spektroradiometer (Analytical Spectral Devices, Inc.) gemessen. Die Reflexionsspektren haben eine Auflösung von 1 nm, decken den Wellenlängenbereich von 350 bis 1100 nm ab und wurden auf einen Reflexionsstandard (Spectralon®) kalibriert. Anschließend wurden die Daten auf 10 nm resampled, und auf einen Wellenlängenbereich von 450 - 850 nm ausgeschnitten, um zu den Penta-Spek Daten kompatibel zu sein.

Parallel zu den Spektralmessungen wurde im Gelände der LAI mit einem Sunscan Gerät (Delta-T Devices Ltd) bestimmt. Der daraus resultierende Kalibrierdatensatz besteht aus 64 spektralen Signaturen und den dazugehörigen LAI-Messungen für vier verschiedene Meß-Termine. Tabelle 2 stellt die deskriptive Statistik dar.

Tab. 2. Deskriptive Statistik der LAI Messungen in Braunschweig 2011.

	LAI KW 16		LAI KW 19		LAI KW 20		LAI KW 23	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Winterweizen	0,69	1,95	2,95	5,15	1,48	5,44	0,00	4,34

	N	Min	Max	Mean	Median	Std	Var
LAI	64	0,00	5,44	2,52	2,68	1,46	2,13

KW: Kalenderwoche

2.4 Bilddaten

Am 22. Juni 2011 wurden auf einem 45 ha großen Winterweizen Schlag in der Nähe von Köthen (51,80° N; 11,91° E) Penta-Spek Daten erhoben. Das Penta-Spek System war auf einem Düngerstreuer mit 36 m Arbeitsbreite montiert. Die fünf Spektrometer wurden im Abstand von 3,75 m auf dem 18 m langen linken Ausleger montiert. Durch zweimalige Überfahrt in entgegengesetzter Richtung konnte eine vollständige Abdeckung des Feldes erreicht werden.

Die spektralen Daten wurden in voller Auflösung aufgezeichnet. Da Hyperspektraldaten aber eine hohe Multikollinearität aufweisen, konnte die Bandbreite auf 10 nm reduziert werden, um den LAI noch mit einer ausreichenden Genauigkeit vorherzusagen (JARMER et al., 2010). Der Resampling-Prozess führt zu einer Glättung der Daten und reduziert dabei den Rauschanteil. Zur Übertragung in einen räumlichen Kontext wurde ein regelmäßiges Raster mit einer Zellgröße von 10 m über das Feld gelegt. Im nächsten Schritt wurde ein Mittelwertspektrum pro Zelle berechnet, das alle Reflexionsspektren berücksichtigt, die vollständig innerhalb der Zelle liegen.

Am 28. Juni 2011 fand eine Befliegung des gleichen Untersuchungsgebietes mit dem flugzeuggetragenen Hyperspektralsensor AISA-DUAL (Specim) des UFZ Leipzig statt. Die

Aufzeichnung der Bilddaten erfolgte in 367 Spektralkanälen mit einer geometrischen Auflösung von 3 m. Die geometrische und atmosphärische Prozessierung der Daten erfolgte analog, wie bei SIEGMANN et al. (2012) in diesem Tagungsband beschrieben.

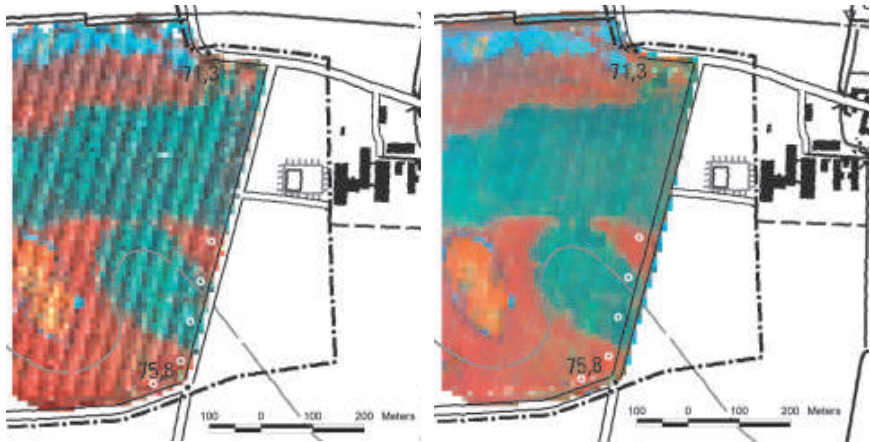


Abb. 2: (l) Penta-Spek Aufnahme vom 22.6.2011 (r) AISA-DUAL Aufnahme vom 28.6.2011 (R/G/B = 850/550/450). Hintergrund: Topographische Karte 1: 25.000 (Quelle: Bundesamt für Kartographie und Geodäsie).

Für den Vergleich zwischen den Datensätzen wurden die AISA-DUAL Daten auf die Auflösung des Penta-Spek Datensatzes (10 m Bodenauflösung, 10 nm Spektralkanäle) resampled (Abbildung 2). Anschließend wurde der Zielparameter (LAI) auf Basis des PLSR Kalibrationsdatensatzes aus Braunschweig berechnet.

3 Ergebnisse

Aus den Penta-Spek Punktmessungen (24.000 Einzelmessungen) wurde ein Bilddatensatz mit 10 m Pixelgröße generiert, der genauso wie die angepassten AISA-DUAL Daten als Eingangsdaten für die LAI Schätzung genutzt wurde (Abb. 3). Die streifige Textur (Abb. 3 links) in den Penta-Spek Daten (Abb. 2 links) ergibt sich aus den Fahrgassen, da die Sensoren 3,75 m von der Mitte der Spur montiert wurden. Das führt zu einem 7,5 m breiten Bereich, der nicht von einem Spektrometer erfasst wurde.

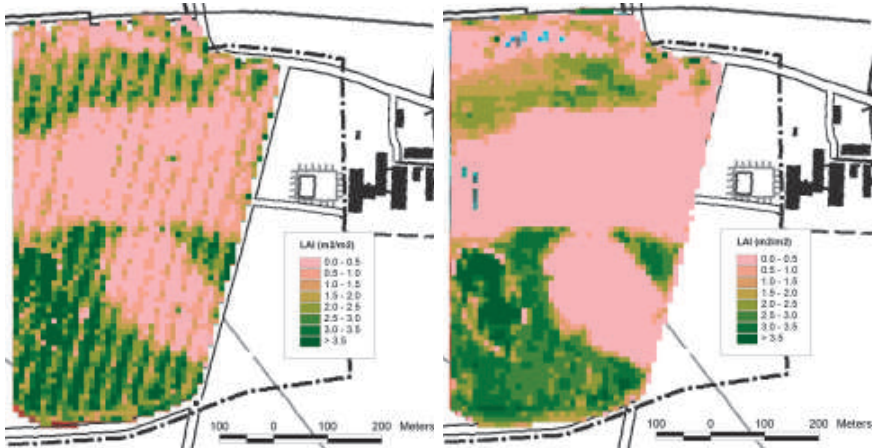


Abb. 3: (l) LAI aus Penta-Spek Daten vom 22.6.2011 (r) LAI aus AISA-DUAL Daten vom 28.6.2011.

Die aus den AISA-DUAL Daten geschätzten LAI Werte (Abb. 3 rechts) liegen im Wertebereich etwas niedriger als die geschätzten LAI Daten des Penta-Spek Systems (Abb. 3 links). Da zwischen den Aufnahmetermen ein zeitlicher Abstand von einer Woche liegt, sind diese Unterschiede auf das Abreife-Verhalten innerhalb der Vegetationsperiode zurückzuführen. Die Validierung der geschätzten LAI-Werte aus den Penta-Spek-Daten wurde unter Verwendung von acht LAI Referenz-Messungen im Feld durchgeführt. Für die AISA-DUAL Daten ist leider keine Validierung möglich, da zum Aufnahmezeitpunkt in diesem Feld aufgrund des späten Entwicklungsstandes der Vegetation keine Referenzmessungen mehr durchgeführt wurden. Der Validierungssatz für die Penta-Spek Daten sehr klein ist ($n = 8$), zeigt aber, dass sich der LAI aus dem Kalibrierdatensatz aus Braunschweig vorhersagen lässt (Abb. 4).

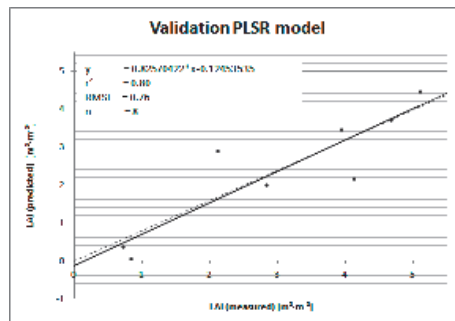


Abb. 4: Validierung der LAI Prognose für die Penta-Spek Daten basierend auf Feldmessungen.

Durch die Trockenphase im Frühsommer 2011 kam es in Köthen zu starken Schäden durch Trockenstress, was dazu führte, dass der LAI in großen Teilen des Schlages nur einen Wertebereich von 1 – 2 erreichte. Gerade dieser Wertebereich ist aber bei den Kalibrierdaten in Braunschweig nur unzureichend erfasst worden (Tab. 2).

Im visuellen Vergleich bilden aber das Penta-Spek System und die AISA-DUAL Daten die gleichen räumlichen Strukturen ab. Damit ist nun ein System verfügbar, mit dem sehr schnell Hyperspektraldaten im Gelände erhoben werden können.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Die Ergebnisse zeigen, dass die generierten Bilddaten des Penta-Spek Systems eine gute Ergänzung zu anderen bildgebenden hyperspektralen Verfahren darstellen können. Durch die Witterungsunabhängigkeit kann das System zudem Spektraldaten mit hoher Flexibilität bereitstellen, was gerade für landwirtschaftliche Fragestellungen von großer Bedeutung ist.

Terrestrische hyperspektrale Fernerkundung ist ein Werkzeug, mit dem die zeitliche und räumliche Variabilität verschiedener Vegetationsparameter ermittelt werden kann. Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen, dass die Vorhersage des LAI mit Hilfe der hyperspektralen Reflexionsmessungen des Penta-Spek-Systems möglich ist. Weitere Vegetationsparameter (z.B. Biomasse, Chlorophyllgehalt etc.) werden derzeit kalibriert, indem während der kommenden Vegetationsperioden regelmäßig Vegetationsbestände spektral vermessen und destruktiv beprobt werden. Es ist das Ziel, mittelfristig spektrale Kalibrierdaten für unterschiedliche Vegetationsparameter und Anbaukulturen bereit zu stellen.

Aufgrund der sehr hohen Messdichte können die Spektraldaten des Penta-Spek Systems ohne Interpolation auf die Fläche umgerechnet werden. Das Penta-Spek System kann im Gegensatz zu bisher verfügbaren terrestrischen Sensoren in der Landwirtschaft Bilddaten produzieren, die die räumliche Variabilität der Bestände erfassen kann. Damit stehen für inhaltliche Auswertungen der Daten neben den chemometrischen Verfahren auch alle Techniken der hyperspektralen Bildverarbeitung zur Verfügung. Besonders interessant ist das Penta-Spek System für die landwirtschaftliche Bilddatenerfassung zu Zeitpunkten, in denen die klassische Fernerkundung selten Daten liefern kann. Aufnahmen im frühen Frühjahr eignen sich zum Beispiel zur Erfassung der Bestandesentwicklung nach dem Winter und zur Dokumentation von Auswinterungsschäden.

Mit dem Penta-Spek-System steht eine kostengünstige Technologie für die Erfassung von Hyperspektraldaten im Gelände zur Verfügung. Durch die kontinuierliche Messung der einfallenden Strahlung werden Beleuchtungsunterschiede direkt kompensiert, so dass das System nahezu unabhängig von den Wetterbedingungen arbeiten kann. Für die landwirtschaftliche Fernerkundung ergeben sich aus der Kombination von flugzeug-, satellitengestützten und terrestrischen Systemen wichtige Synergieeffekte, die den Einsatz dieser Technologie in der praktischen Landwirtschaft zukünftig unterstützen können.

Danksagung

Die Arbeit wurde im Rahmen des EnMap Vorbereitungsprogramms durchgeführt und durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) im Rahmen des Projektes ‚Hyland‘ (FKZ 50EE1014) finanziert.

5 Literaturverzeichnis

- BARET, F., GUYOT, G., 1991: Potentials and limits of vegetations indices for LAI and APAR assessment, *Remote Sensing of Environment*, **35**, S. 161-173.
- BOEGH, E., SOEGAARD, H., BROGE, N., HASAGER, C. B., JENSEN N. O., SCHELDE, K., THOMSEN, A., 2002: Airborne multispectral data for quantifying leaf area index, nitrogen concentration, and photosynthetic efficiency in agriculture, *Remote Sensing of Environment*, **81** (2–3), S. 179–193.
- COOPS, N.C., SMITH, M.L., JACOBSEN, K.L., MARTIN, M. & OLLINGER, S., 2004: Estimation of plant and leaf area index using three techniques in a mature native eucalypt canopy. *Austral Ecology*, **29**, S. 332-341.
- HÖSKULDSSON, A., 1988: PLS Regression Methods. *Journal of Chemometrics*, **2**, S. 211-228.
- JARMER, T., LILIENTHAL, H., EHLERS, M., ROSSO, P., 2010: Die Erfassung organischen Kohlenstoffs des Oberbodens mittels Hyperspektraldaten, *Bornimer Agrartechnische Berichte*, **73**, S. 94-103.
- LILIENTHAL, H., SCHNUG, E., 2010: Bodengestützte Erfassung räumlich hochaufgelöster Hyperspektraldaten. Das Penta-Spek System. *Bornimer Agrartechnische Berichte*, **73**, S.86-93.
- SIEGMANN, B., JARMER, T., LILIENTHAL, H., RICHTER, N., SELIGE, T, HÖFLE, B., 2012: Die Ableitung des Blattflächenindex von Weizenbeständen aus abbildenden Hyperspektraldaten, *DGPF Tagungsband 21 /2012*.
- WILHELM, W.W., RUWE, K. & SCHLEMMER, M.R., 2000: Comparison of three leaf area index meters in a corn canopy. *Crop Science*, **40**, S. 1179-1183.

Einsatz von hyperspektraler Messtechnik in der Pflanzenzüchtung

NICOLE RICHTER¹, HOLGER LILIENTHAL¹, LORENZ KOTTMANN¹,
SIEGFRIED SCHITTENHELM¹, BRIGITTA SCHMIEDCHEN², PEER WILDE²

Zusammenfassung: Das Hyperspektralsystem Tri-Spek stellt ein Werkzeug zur mobilen, bodengestützten Spektralvermessung dar, das den hohen technischen Anforderungen gerecht wird, welche die Pflanzenzüchtung an ein nicht-destruktives Messverfahren stellt. Das System hat eine spektrale Auflösung von 400-850 nm mit 450 Spektralkanälen. Die nur 5 m² umfassenden Parzellen erfordern in ihrer Bestimmung eine sehr hohe Lagegenauigkeit, damit die Spektralmessungen korrekt zugeordnet werden können. Durch eine automatische Korrektur der Einstrahlung sind die Messungen weitestgehend witterungsunabhängig durchführbar.

Die züchterische Auslese basiert auf dem Prinzip der großen Zahl. In der Vegetationsperiode 2011 wurden 3760 Einzelparzellen auf der Zuchtstation Petkus in Brandenburg spektral vermessen. Methodik und erste Ergebnisse der Datenauswertung werden vorgestellt.

1 Einleitung

Die Untersuchung von Zuchtmaterial in der Pflanzenzüchtung erfordert einen hohen personellen Aufwand und einen großen Probendurchsatz, da die züchterische Auslese auf dem Prinzip der großen Zahl beruht (BECKER 2011). Deshalb ist es zur Vorhersage verschiedener Bestandesparameter erstrebenswert ein zerstörungsfreies Verfahren zu entwickeln, welches zu einer deutlichen Arbeitserleichterung führen kann. Die Fernerkundung stellt eine solche Messtechnik bereit, allerdings haben klassische flugzeuggestützte Verfahren das Problem einer zu geringen räumlichen Auflösung. Die Versuchsparzellen in den Zuchtgärten sind oft nur ca. 5m² groß, so dass mit herkömmlichen Verfahren die Spektralsignaturen der Einzelparzelle nicht aufgelöst werden können und es zur Mischpixelproblematik kommt (CRACKNELL 1998). Des Weiteren ist die klassische Fernerkundung auf Strahlungswetterlagen angewiesen. Unter den mitteleuropäischen Witterungsverhältnissen ist damit ein operationeller Einsatz in der Pflanzenzüchtung ausgeschlossen. Zur Lösung derartiger Probleme wird auf mehreren Versuchsstandorten das vom Julius Kühn-Institut (JKI) entwickelte Tri-Spek System eingesetzt. Dieses erlaubt es, Hyperspektraldaten zu erheben, aus denen verschiedene züchtungsrelevante Pflanzenparameter abgeleitet werden können. Beim Tri-Spek handelt es sich um ein bodengestütztes Online-System, welches in der Lage ist, nahezu witterungsunabhängig hochauflösende Reflexionsdaten im Feld zu erheben. Ein züchterisch interessanter Bestandesparameter ist beispielsweise der Blattflächenindex (LAI), da er für physiologische und ökologische Prozesse,

1) Julius Kühn-Institut, Institut für Pflanzenbau und Bodenkunde, Bundesallee 50, 38116 Braunschweig
E-Mail: nicole.richter@jki.bund.de, holger.lilienthal@jki.bund.de, lorenz.kottmann@jki.bund.de,
siegfried.schittenhelm@jki.bund.de

2) KWS LOCHOW GMBH, Ferdinand-von-Lochow-Straße 5, 29303 Bergen;
E-Mail: brigitta.schmiedchen@kws-lochow.de, peer.wilde@kws-lochow.de

wie zum Beispiel Lichtinterzeption, Photosynthese und Evapotranspiration von großer Bedeutung ist (WILHELM 2000, COOPS et al. 2004).

2 Messverfahren

Das vom JKI konzipierte Tri-Spek System besteht aus drei Einzelspektrometern, die in einem Modul zusammengefasst sind (Tab. 1).

Tab. 1: Technische Angaben zum Tri-Spek System

Eigenschaften	Eingesetztes Modul
Spektralbereich [nm]	340-1026
Volle Auflösung	2048 Kanäle @ 0,34 nm
Effektiver Spektralbereich [nm]	400-850
Effektive Auflösung	450 Kanäle @ 1 nm
Maximale Aufzeichnungsgeschwindigkeit	3 msec

Die Spektrometer decken einen effektiven Wellenlängenbereich von 400-850 nm ab und messen somit in 450 diskreten Kanälen mit 1 nm Bandbreite.

Zwei Spektrometer sind nach unten gerichtet und messen die Reflexion des Bodens bzw. des Pflanzenbestandes. Das dritte Spektrometer hingegen dient als Einstrahlungsreferenz, ist nach oben gerichtet und misst das einfallende Licht. Da die gemessene Einstrahlung simultan mit den anderen beiden Spektrometern verrechnet wird, kann der spektrale Reflexionsgrad direkt im Feld bestimmt werden (Abb. 1).

Diese Vorgehensweise bietet einen klaren Vorteil gegenüber anderen nicht-destruktiven Messverfahren. Durch die permanente Korrektur der Einstrahlungsbedingungen können Beleuchtungsunterschiede, die während der Meßphasen auftreten können, kompensiert werden. Somit stellen beispielsweise durchziehende Wolken kein Problem mehr dar und die spektrale Vermessung der Bestände ist nicht mehr auf Strahlungswetterlagen beschränkt.

Damit eine räumliche Lokalisierung der Meßpunkte gewährleistet werden kann, ist das System mit einem Real Time Kinematic (RTK)-GPS-Empfänger mit einer Positionsgenauigkeit von $\pm 2,5$ cm gekoppelt. Die räumliche Auflösung der Messdaten hängt von mehreren Faktoren ab und variiert in Fahrtrichtung und Aufnahmebreite.

In Fahrtrichtung betrachtet wird die räumliche Auflösung sowohl durch die Fahrgeschwindigkeit als auch durch die Signalfrequenz des GPS bestimmt. So ergibt sich beispielsweise bei einer Fahrgeschwindigkeit von ca. 0,5 km/h (minimale Fahrgeschwindigkeit eines Schleppers) und einem empfangenen GPS-Signal im Sekundentakt eine theoretische maximale Auflösung von 0,15 m in Fahrtrichtung.

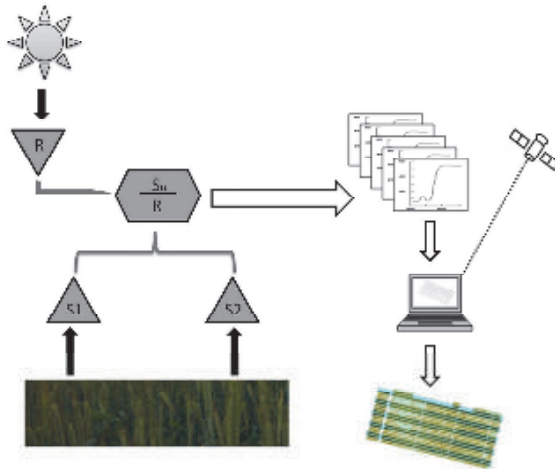


Abb. 1: Schematischer Aufbau des Tri-Spek Systems

Die Aufnahmebreite hängt vom Öffnungswinkel der verwendeten Spektraloptik und vom Abstand des Sensors zum Objekt ab. Bei den durchgeführten Messungen wurde eine Spektraloptik mit einem Öffnungswinkel von 45° verwendet. Bei einem angenommenen Sensorabstand von 1m zum Bestand wird somit pro Sensor eine Fläche von etwa $0,82 \text{ m}^2$ spektral vermessen (Abb. 2).

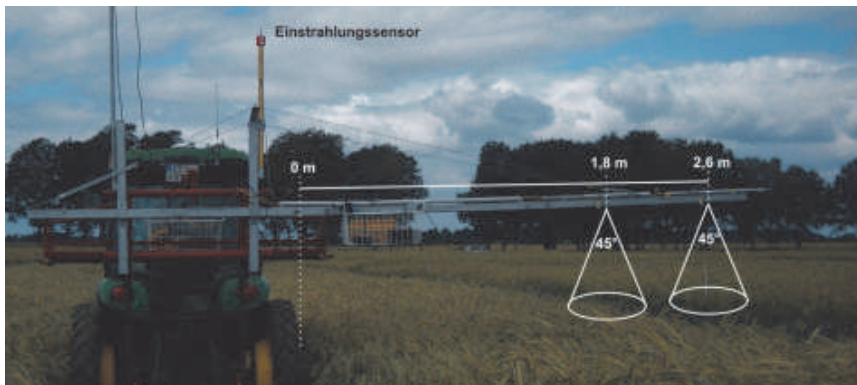


Abb. 2: Einsatz des Tri-Spek Systems im Zuchtgarten

Nach der Georeferenzierung der Spektraldaten und der damit einhergehenden eindeutigen Zuordnung zu den einzelnen Parzellen steht ein hyperspektraler Datensatz zur Auswertung bereit. Mit Hilfe von Partial Least Squares Regressionsmodellen (PLSR) lassen sich verschiedene Bestandesparameter mit einer hohen Genauigkeit vorhersagen. Im Folgenden wird das Verfahren exemplarisch am Beispiel des LAI vorgestellt.

3 Auswertung

Das vorgestellte Messverfahren liefert eine sehr große Datenmenge. Bevor die gemessenen Spektraldaten georeferenziert werden können, müssen sowohl die Spektraldaten als auch die Raumdaten separat aufbereitet werden. Eine schematische Darstellung des Aufbereitungsprozesses zeigt Abb. 3.

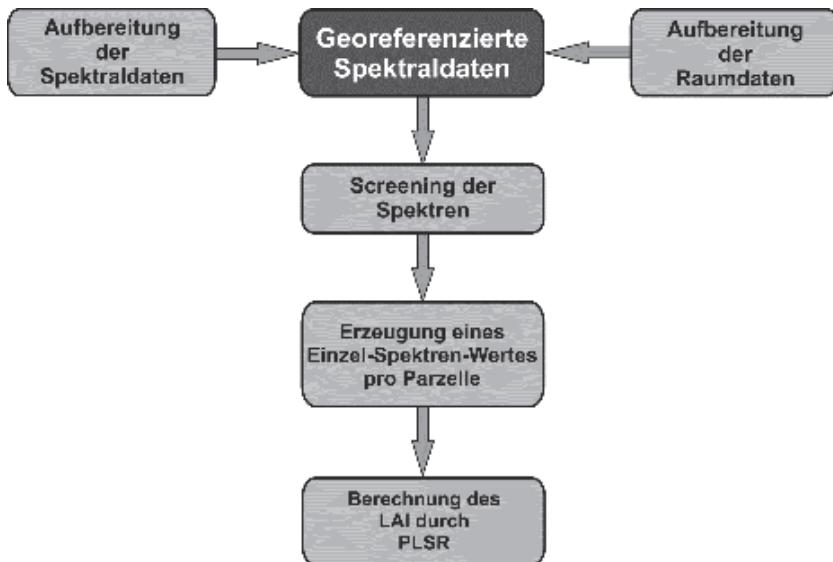


Abb. 3: Schematische Darstellung des Prozesses der Datenaufbereitung

3.1 Datenaufbereitung

Zunächst werden die Spektraldaten der beiden Spektrometer aufeinander angepasst, auf 1nm breite Spektralkanäle resampled und auf einen Wellenlängenbereich von 400 nm – 850 nm zugeschnitten. Dem aufgezeichneten GPS-Track wird als erstes die gleiche metrische Projektion zugewiesen wie dem Parzellenplan. Unter Berücksichtigung der Versatzinformationen von der Antenne des GPS-Empfängers zur tatsächlichen Lage des Spektrometers wird die Lage der

Meßpunkte neu berechnet und die Zuordnung der Spektralmessungen zum Parzellenplan erfolgt. Überhänge, sowie kritisch auf Grenzbereichen zwischen zwei Parzellen liegende Meßpunkte werden in diesem Schritt mit entfernt. Sind sowohl Spektraldaten, als auch Raumdaten aufbereitet, werden sie miteinander verknüpft. Beim nachfolgenden Screening der Spektren werden Ausreißer entfernt. Mit 4-6 Meßpunkten pro Parzelle und einer Parzellenanzahl von knapp 4000 ist die Datenmenge immer noch relativ groß. Ausgehend von der Annahme, dass die Pflanzenbestände innerhalb einer Parzelle homogen sind, wird durch Mittelwertbildung ein Einzel-Spektren-Wert pro Parzelle erzeugt und somit die Datenmenge für die folgenden Berechnungen verkleinert.

3.2 Statistische Auswertung

Die statistische Auswertung der Daten erfolgt mit Hilfe von Partial Least Squares Regressionsmodellen (PLSR), einem Verfahren, dass in den letzten Jahren sehr stark an Bedeutung gewonnen hat und vor allem in der Nahinfrarot-Spektroskopie zur Kalibrierung von Parametern aus Spektren eingesetzt wird (KESSLER 2007). Die Datenverarbeitung mit der PLSR ermöglicht eine Verknüpfung der gemessenen Spektralinformation mit den jeweiligen Zielgrößen (HÖSKULDSSON 1988). So können verschiedene Bestandesparameter, wie beispielsweise der LAI, mit einer hohen Genauigkeit vorhergesagt werden.

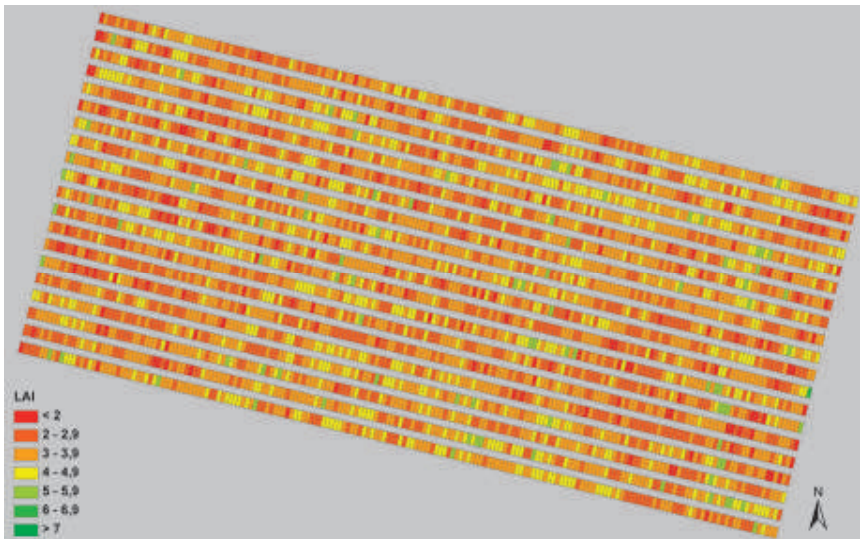


Abb.4: Parzellenplan mit berechneten Werten für den LAI

Mit Hilfe eines Geographischen Informationssystems (GIS) ist es jetzt möglich diese vorhergesagten Parameter auf die jeweilige Parzelle bezogen darzustellen. In Abbildung 4 ist der durchschnittliche, vorhergesagte LAI für jede Einzelparzelle dargestellt. Diese optische, auf die Fläche bezogene, Darstellung bietet außerdem die Möglichkeit eventuelle Unregelmäßigkeiten in den vorherrschenden Umweltbedingungen aufzudecken. Das erleichtert die Verarbeitung und Interpretation der Daten im Züchtungsbereich. Solche Umwelteinflüsse sind beispielsweise der Abbildung 5 sehr schnell und deutlich zu entnehmen. Bei dem untersuchten Zuchtgarten handelt es sich um einen Trockenstress-Versuch, in dem jeweils zwei bewässerte neben zwei unbewässerten Varianten liegen. In der Falschfarben-Infrarot-Darstellung heben sich die bewässerten Varianten durch ihre deutliche dunkelrote Färbung stark von den Trockenvarianten ab. Die sattere Grünfärbung der ausreichend mit Wasser versorgten Pflanzen spiegelt sich also in einer stärkeren Rotfärbung der Parzellen im Falschfarben-Infrarot-Bild wider. Eine erste Schlussfolgerung aus züchterischer Sicht könnte also sein, dass die deutlich rot gefärbten Parzellen in den Trockenvarianten Genotypen beinhalten, die trotz Trockenstress relativ vitale Pflanzen hervorbringen und somit besser mit Wassermangel umgehen können als andere Genotypen, deren Parzellen hier blau oder grün gefärbt sind.

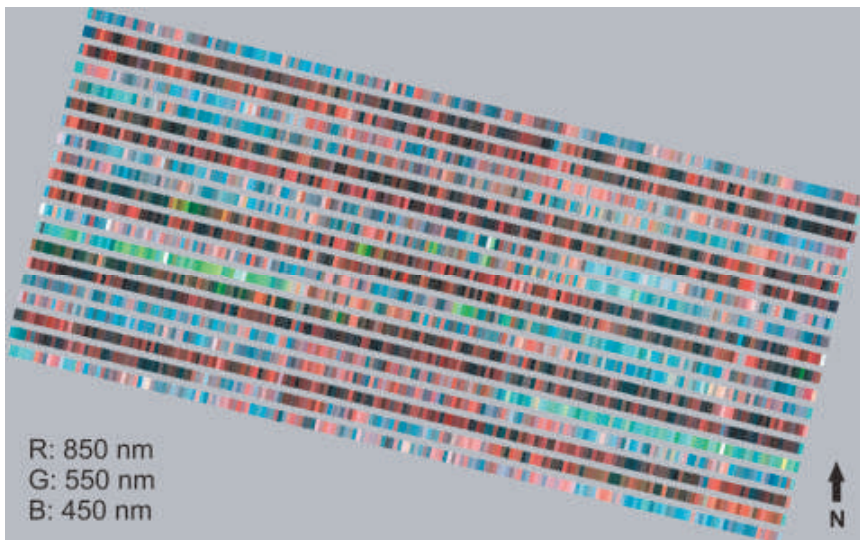


Abb. 5: Falschfarben-Infrarot-Darstellung

4 Anwendungsmöglichkeiten

Aufgrund seines Aufbaus ist das Tri-Spek System sehr individuell einsetzbar. Bei geringer Fahrgeschwindigkeit wird eine hohe räumliche Auflösung erreicht. Das macht das System gerade für die Pflanzenzüchtung, mit ihren häufig geringen Parzellengrößen sehr interessant. So können auch einzelne Parzellen von nur 1,25 m Breite problemlos vermessen werden. Bei den Messungen in der Zuchtstation Petkus in Brandenburg (52,02 N; 13,30 E) konnten mit dem Tri-Spek System in der Saison 2011 an 7 Aufnahmetermine jeweils 3760 Parzellen spektral erfasst werden. Eine komplette Vermessung des Schläges dauerte etwa 6 Stunden und lieferte zwischen 4 und 8 gemessene Spektren pro Parzelle. Die Verarbeitung der Spektraldaten, bis hin zur Berechnung der Vegetationsparameter ist in 1-2 Tagen von nur einer Person durchzuführen. So kann die Anzahl der Messungen für bestimmte züchtungsrelevante Pflanzenparameter deutlich erhöht werden. Damit eröffnen sich völlig neue Perspektiven etwa dergestalt, dass mehrfache Messungen während der Vegetationsperiode die Chance eröffnen, Wachstumsmodelle zu entwickeln und genotypische Effekte oder auch Interaktionen von Genotyp und Umwelt zu erklären.

5 Ausblick

Mit dem vom JKI entwickelten Tri-Spek System steht ein relativ kostengünstiges Aufnahmeverfahren zur Verfügung, das es ermöglicht Hyperspektraldaten bodengestützt, direkt im Untersuchungsgelände zu erheben. Diese Daten sind sowohl räumlich, als auch spektral hochauflösend und bieten somit die Möglichkeit, Pflanzenparameter bezogen auf relativ kleine Flächen zu bestimmen. Die Datenerhebung erfolgt zerstörungsfrei im Hochdurchsatzverfahren. Des Weiteren kann nahezu witterungsunabhängig gearbeitet werden, weil durch die kontinuierliche Aufzeichnung der Einstrahlung eventuelle Beleuchtungsunterschiede direkt bei der Messung berücksichtigt werden.

Die Auswertungsmöglichkeiten der erhobenen Hyperspektraldaten sind weit gefächert. So stehen neben zahlreichen chemometrischen Ansätzen auch sämtliche Möglichkeiten der hyperspektralen Bildverarbeitung zur Verfügung. Dabei ist die Möglichkeit zur Berechnung von Vegetationsparametern für die Pflanzenzüchtung besonders interessant. Als nächste Schritte werden Kalibrierungsfunktionen für weitere züchtungsrelevante Parameter entwickelt. Zur Reduzierung der Datenmenge muss der Informationsgehalt der hoch aufgelösten Hyperspektraldaten untersucht werden. Insbesondere ist zukünftig zu untersuchen, wie die Anzahl der Spektralbänder reduziert werden kann, ohne dass substantielle Information verloren geht.

Neben der spektralen und räumlichen Auflösung ist für den operationellen Einsatz derartiger Systeme in der Pflanzenzucht auch die Bestimmung der idealen Aufnahmetermine sehr wichtig, um die züchterischen Parameter am besten ableiten zu können.

Danksagung

Diese Forschungsarbeit entstand im Rahmen des Projektes "Feldbasierte innovative Messtechniken für die Verbesserung der Trockentoleranz von Roggen in Biogasfruchtfolgen (FIT)" mit dem Förderkennzeichen G 126/10 NR und wurde durch die Fachagentur für nachwachsende Rohstoffe (FNR) gefördert und durch die Gemeinschaft zur Förderung der privaten deutschen Pflanzenzüchtung e.V. (GFP) unterstützt.

6 Literaturverzeichnis

- BECKER, H., 2011: Pflanzenzüchtung. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart.
- COOPS, N.C., SMITH, M.L., JACOBSEN, K.L., MARTIN, M. & OLLINGER, S., 2004: Estimation of plant and leaf area index using three techniques in a mature native eucalypt canopy. *Austral Ecology*, **29**, S. 332-341.
- CRACKNELL, A. P., 1998: Synergy in remote sensing – what’s in a pixel? *International Journal of Remote sensing*, **19** (11), S. 2025-2047.
- HÖSKULDSSON, A., 1988: PLS Regression Methods. *Journal of Chemometrics*, **2**, S. 211-228.
- KESSLER, W., 2007: Multivariate Datenanalyse für die Pharma- Bio- und Prozessanalytik: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim.
- WILHELM, W.W., RUWE, K. & SCHLEMMER, M.R., 2000: Comparison of three leaf area index meters in a corn canopy. *Crop Science*, **40**, S. 1179-1183.

Die Ableitung des Blattflächenindex von Weizenbeständen aus abbildenden Hyperspektraldaten

**BASTIAN SIEGMANN¹, THOMAS JARMER¹, HOLGER LILIENTHAL², NICOLE RICHTER²,
THOMAS SELIGE³ & BERNHARD HÖFLE⁴**

Zusammenfassung: Der Blattflächenindex (LAI) ist ein wichtiger Input-Parameter für Ertragsmodelle in der Landwirtschaft. Die räumliche Erfassung des LAI war in der Vergangenheit sehr zeitaufwendig und kostenintensiv. Hyperspektrale Fernerkundungsdaten bieten dagegen die Möglichkeit, den LAI und andere wichtige Vegetationsparameter in ihrer räumlichen Variabilität für große Gebiete flächendeckend aus einem Datensatz zu ermitteln. In der vorliegenden Studie wird der Blattflächenindex aus hyperspektralen Daten des Sensors AISA-DUAL für einen Weizenschlag abgeleitet. Die Ergebnisse ($r^2_{cv}=0,903$; $RMSE_{cv}=0,226$) veranschaulichen, dass Hyperspektraldaten für landwirtschaftliche Fragestellungen eine zunehmend wichtige Informationsquelle sind.

1 Einleitung

Biochemische Inhaltsstoffe wie Pigmente, Wasser und Nährstoffe beeinflussen die spektrale Reflexion von Pflanzen. Der Blattflächenindex (LAI - leaf area index), der das Verhältnis der Blattoberfläche zur Bodenfläche angibt, erlaubt Rückschlüsse auf die fotosynthetische Aktivität und damit auf die Produktivität der Vegetation (DUCHEMIN et al. 2006). Der LAI ist ein integratives Maß für die biotischen und abiotischen Einflussbedingungen und daher ein wichtiger Faktor für die Güte von Ertragsprognosen im Bereich der Landwirtschaft, da er von ertragsreduzierenden Faktoren wie Pflanzenkrankheiten und Bewirtschaftungsfehlern maßgeblich beeinflusst wird (BOEGH et al. 2002, CARTER 1994, DAUGHTRY et al. 1992). In der Vergangenheit war die räumliche Erfassung der saisonalen Veränderungen des Blattflächenindex durch Messtechniken im Gelände nur begrenzt möglich. Der zunehmende Einsatz multispektraler Fernerkundungsdaten in den letzten Jahrzehnten hat die räumliche Vorhersage des LAI deutlich verbessert. Zusätzlich steht gegenwärtig eine immer größere Anzahl an hyperspektralen Sensoren zur Verfügung, mit Hilfe derer Daten eine noch genauere Erfassung der saisonalen Veränderungen des LAI ermöglicht wird (LEE et al. 2004).

- 1) Bastian Siegmann, Thomas Jarmer, Institut für Geoinformatik und Fernerkundung, Universität Osnabrück, Barbarastrasse 22b, D-49076 Osnabrück; E-Mail: bsiegmann@igf.uni-osnabrueck.de, tjarmer@igf.uni-osnabrueck.de
- 2) Holger Lilienthal, Nicole Richter, Institut für Pflanzenbau und Bodenkunde, Bundesallee 50, D-38116 Braunschweig; E-Mail: holger.lilienthal@jki.bund.de, nicole.richter@jki.bund.de
- 3) Thomas Selige, Lehrstuhl für Bodenökologie, TU München, Ingolstädter Landstrasse 1, D-85764 Neuherberg; E-Mail: selige@wzw.tum.de
- 4) Bernhard Höfle, Geographisches Institut, Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg, Berliner Straße 48, 69120 Heidelberg; E-Mail: hoeffle@uni-heidelberg.de

In diesem Zusammenhang wird in der vorgestellten Studie das Potenzial hyperspektraler Daten des Sensors AISA-DUAL (Airborne Imaging Spectrometer for Application) untersucht. Mit Hilfe der Daten wird eine flächendeckende Vorhersage des Blattflächenindex für einen Weizenschlag vorgenommen, der sich nordwestlich der Stadt Köthen in Sachsen-Anhalt befindet (Lat 51°47,62' / Long 11°54,90').

2 Datengrundlage

2.1 Untersuchungsgebiet

Der untersuchte Weizenschlag hat eine Größe von 80 ha und befindet sich südlich der Ortschaft Wulfen in Sachsen-Anhalt (Abb.1). Aufgrund der Lage des Untersuchungsgebietes im Regenschatten des Harzes beträgt die jährliche Niederschlagssumme lediglich 430 mm. Damit ist die Region ein Teil des mitteldeutschen Trockengebietes. Die jährliche Durchschnittstemperatur liegt bei 9°C. Schwarzerden sind der vorherrschende Bodentyp im Untersuchungsgebiet.



Abb. 1: Untersuchungsgebiet mit ausgewähltem Weizenschlag

2.2 Felddaten

Während einer Geländekampagne vom 7. bis 10. Mai 2011 wurden an 31 Standorten innerhalb des untersuchten Weizenschlages neben dem LAI, der Chlorophyllgehalt, die Bestandshöhe sowie die Biomasse bestimmt. Da die Bestimmung der Biomasse destruktiv erfolgte, wurden 0,5 x 0,5 m Plots abgeerntet, um die Schäden innerhalb des Weizenschlages so gering wie möglich zu halten. Die Auswahl der Position der einzelnen Messflächen erfolgte im Vorfeld der Geländekampagne, sodass die heterogenen Bestandsstrukturen innerhalb des Ackerschlages möglichst gut abgebildet werden konnten (vgl. Abb. 2).

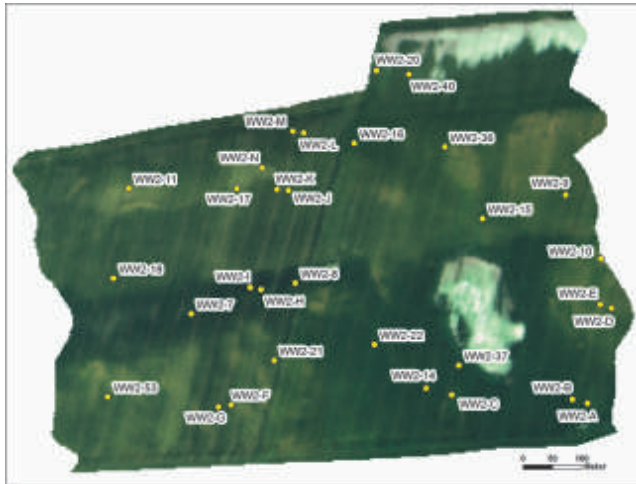


Abb. 2: Untersuchter Weizenschlag mit Messflächen (Hintergrund AISA-DUAL)

Der Blattflächenindex wurde an jeder Messfläche mit einem SunScan (Delta-T Devices Ltd.-USA) jeweils 6-mal gemessen und die Einzelmessungen gemittelt. Um nicht-repräsentative Einzelmessungen ausschließen zu können, erfolgte die Bildung der Mittelwerte nur aus den Messungen, die innerhalb der einfachen Standardabweichung lagen.

2.3 Bilddaten

Zeitgleich zur Geländekampagne fand am 10.05.2011 eine Befliegung des Untersuchungsgebietes mit dem flugzeuggetragenen Hyperspektralsensor AISA-DUAL (Specim-Finnland) des UFZ Leipzig (Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung) statt. Die Aufzeichnung der Bilddaten erfolgte in 367 Spektralkanälen mit einer geometrischen Auflösung (GSD) von 3m. Die radiometrische Korrektur der Daten wurde zunächst mit der Software CaliGeo durchgeführt. Anschließend erfolgte eine zusätzliche Korrektur der Daten mit Hilfe des Programms ROME (Reduction Of Miscalibration Effects), um Streifen in den Bilddaten zu beseitigen, die sich nach der radiometrischen Korrektur zeigten (ROGAB et al. 2011). Dadurch konnten die fehlerhaften Bildpixel, die sich in Form von Streifen entlang der Flugrichtung durch die Bilddaten ziehen, verringert, aber nicht komplett beseitigt werden. Der nächste Prozessierungsschritt bestand in der Atmosphärenkorrektur der Daten. Dazu wurde die Software FLAASH (Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of spectral Hyper cubes) verwendet, die in ENVI implementiert ist. Während der Befliegung wurden zusätzlich helle und dunkle Referenzflächen am Boden mit einem ASD FieldSpec Pro (Analytical Spectral Devices Inc.-USA) spektral gemessen. Mit Hilfe der Reflexionsspektren der Referenzflächen wurde eine Empirical-Line-Korrektur der Bilddaten durchgeführt, um die Reflexionswerte der Bilddaten noch besser an die spektralen Gelände-

messungen anzupassen (SMITH & MILTON 1999). Abschließend erfolgte die geometrische Korrektur der Daten, wozu erneut die Software CaliGeo verwendet wurde. Abbildung 3 zeigt drei Reflexionsspektren der vollständig prozessierten AISA-DUAL Daten und die dazugehörigen LAI-Werte der entsprechenden Messflächen mit Fotos. Es wird deutlich, dass sich die unterschiedlich hohen Werte des Blattflächenindex auch in den Spektralkurven der Bildpixel widerspiegeln.

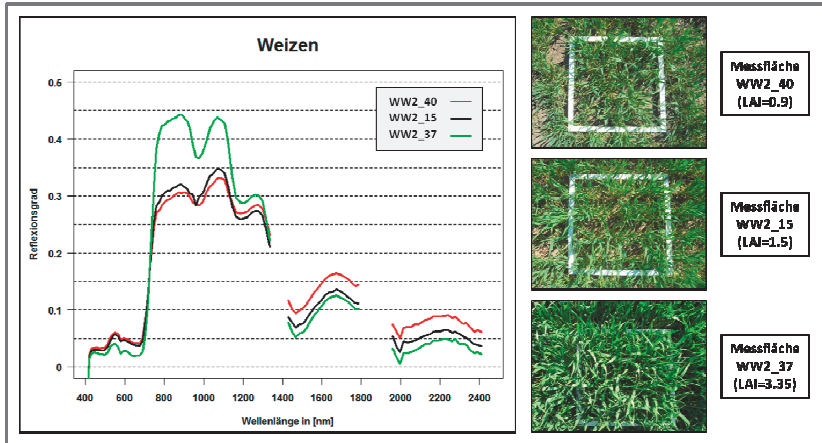


Abb. 3: Reflexionsspektren (AISA-DUAL) dreier Messflächen mit LAI-Werten und Fotos

3 Methodik

3.1 Partial Least-Squares Regression

Zunächst wurden die Bildpixel aus den AISA-DUAL Daten extrahiert, die von der Lage her den 31 Messflächen des Weizenschlages entsprechen. Mit Hilfe der punktuellen LAI-Messungen im Gelände und den extrahierten Bildspektren wurde ein Partial-Least Squares Regressionsmodell (PLSR) zur Schätzung des Blattflächenindex aus den AISA-DUAL Daten entwickelt. Es erfolgte dabei eine Begrenzung der latenten Variablen auf den maximalen Wert von 10. Die Kreuzvalidierung (cross-validation, cv) der Ergebnisse der PLSR wurde anhand der „leave-one-out“-Methode vorgenommen. Als Maße für die Schätzgenauigkeit wurden das Bestimmtheitsmaß (r^2_{cv}), der Quadratwurzelfehler (RMSE_{cv}) und das Verhältnis des Standardfehlers der Vorhersage zur Standardabweichung (RPD) herangezogen (MALLEY et al. 2004). Zusätzlich wurde eine Methode zur Ermittlung von Ausreißern angewandt. Dabei werden Werte, deren studentized Residuen um mehr als $\pm 2,5$ abweichen, als Ausreißer detektiert und von den weiteren Analysen ausgeschlossen (PELL 2002).

3.2 Kanalreduzierung der Bilddaten

Die Spektralkurven der prozessierten AISA-DUAL Pixel weisen ein starkes Rauschen auf. Eine Methode das Rauschen in den Spektraldaten zu reduzieren, besteht in einem Spectral Binning der Daten. Dabei werden mehrere Spektralkanäle zu einem Kanal zusammengefasst, um das Signal-Rausch-Verhältnis (SNR) zu erhöhen (DELL'ENDICE et al. 2009). In diesem Zusammenhang wurden jeweils drei benachbarte Kanäle in den AISA-DUAL Daten über die Bildung eines Mittelwertes zusammengefasst. Dadurch wurde die Anzahl der Kanäle von 367 auf 122 reduziert und das Rauschen in den Daten verringert.

4 Ergebnisse

Der Wertebereich des LAI der im Gelände erfassten Messflächen ist aufgrund des saisonalen Zeitpunkts noch relativ gering und liegt zwischen 0,4 und 3,7 (vgl. Tab. 1). Außerdem weist der Mittelwert von 1,52 darauf hin, dass Flächen mit niedrigen LAI-Werten überwiegen. Die gemessenen LAI-Werte sind normalverteilt.

Tab. 1: Deskriptive Statistik der im Gelände ermittelten LAI-Werte

	n	Min	Max	Mean	SD
Weizen	31	0,40	3,70	1,52	0,72

Zur Schätzung des Blattflächenindex aus den AISA-DUAL Daten wurde jeweils ein Regressionsmodell für den Originaldatensatz mit 367 Spektralkanälen und für den kanalreduzierten Datensatz mit 122 Spektralkanälen erstellt. Um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten, wurden die in einem Datensatz als Ausreißer detektierten Proben auch im jeweils anderen Datensatz ausgeschlossen. Die Ergebnisse der PLS-Regression zeigen, dass sowohl in den Originaldaten mit 367 Kanälen ($r^2_{cv}=0,903$; $RMSE_{cv}=0,226$; $RPD=3,26$) als auch in den Daten mit nur 122 Kanälen ($r^2_{cv}=0,868$; $RMSE_{cv}=0,263$; $RPD=2,796$) der LAI mit einer hohen Genauigkeit geschätzt werden konnte (vgl. Abb. 4). Der RPD liegt in beiden Regressionsmodellen weit über dem Wert 2, was ein Anzeichen für die hohe Robustheit beider Regressionsmodelle ist (DUNN et al. 2004).

Tab. 2: Ergebnisse der PLS-Regression des LAI für die AISA-DUAL Daten mit 367 und 122 Kanälen

Datensatz	n	r^2_{cv}	$RMSE_{cv}$	RPD	LV
367 Kanäle	29	0,903	0,226	3,256	5
122 Kanäle	29	0,868	0,263	2,796	4

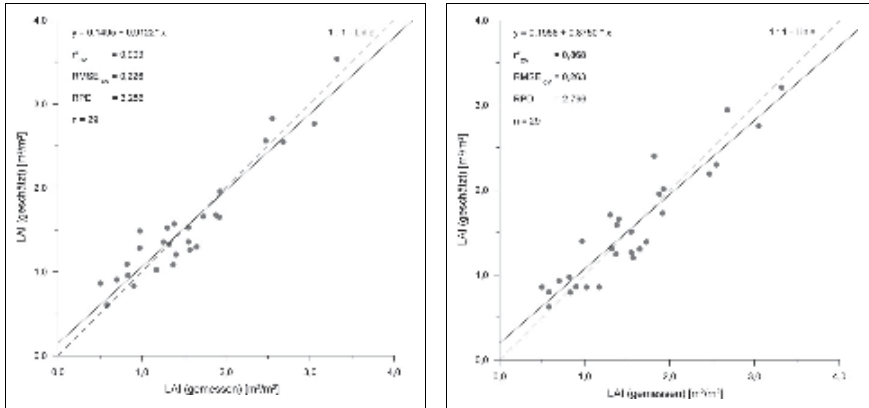


Abb. 4: Scatterplots der PLS-Schätzung (kreuzvalidiert) des LAI für 367 (links) und 122 Kanäle (rechts). Die Residuen sind normalverteilt und der Mittelwert der Residuen ist nicht signifikant von 0 verschieden.

Das erstellte Regressionsmodell für 367 Kanäle wurde im Anschluss auf die AISA-DUAL Bilddaten übertragen, um die räumliche Variabilität des LAI auf dem untersuchten Weizenschlag zu erfassen (Abb. 5).

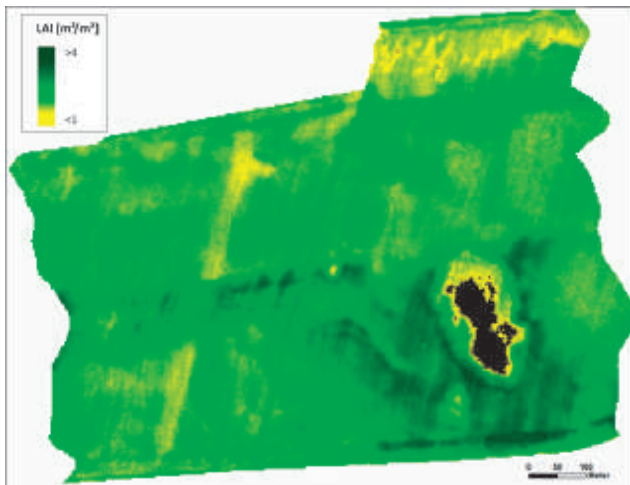


Abb. 5: Geschätzte LAI-Werte des Weizenschlages aus den AISA-DUAL Daten (367 Kanäle)

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die Ergebnisse zeigen deutlich, dass der LAI mit hoher Genauigkeit aus den AISA-DUAL Bildpixeln vorhergesagt werden kann. Die geschätzten LAI-Werte liegen im Wertebereich der Feldanalytik und spiegeln die räumlichen Unterschiede innerhalb des Ackers wider. Die Ergebnisse verdeutlichen zusätzlich das große Potenzial hyperspektraler Fernerkundungsdaten gegenüber herkömmlichen oft ungenauen und zeitaufwendigen Methoden zur räumlichen Erfassung des LAI. Durch die Erfassung der räumlichen Variabilität des LAI auf der untersuchten Fläche können verbesserte Ertragsprognosen erstellt werden.

Darüber hinaus stellt sich die Frage, wie viele Spektralkanäle notwendig sind, um eine robuste Parameterschätzung zu gewährleisten. Obwohl die Reduzierung der AISA-DUAL Daten von 367 auf 122 Kanäle eine Verbesserung des Signal-Rausch-Verhältnisses zur Folge hatte, konnte kein signifikanter Unterschied in den Ergebnissen der PLS-Regressionen festgestellt werden. Eine Reduzierung der Spektralkanäle während der Kalibrierung des Sensors würde jedoch zu einer Reduzierung des aufgezeichneten Datenvolumens führen, was den Zeitaufwand der anschließenden Prozessierung der Daten erheblich verkürzt. Allerdings könnte dies auch negative Auswirkungen auf die Atmosphärenkorrektur haben und sollte daher noch weiter untersucht werden.

In weiterführenden Untersuchungen sollen noch zusätzliche Messflächen des untersuchten Weizenschlags mit einbezogen werden, die sich auf dem östlich und westlich angrenzenden Befliegungstreifen befinden. Diese wurden mit Hilfe der gleichen Vorverarbeitungsschritte prozessiert, weisen aber Unterschiede in der absoluten Höhe der Reflexion auf, was sich negativ auf die Vorhersagegenauigkeit des LAI auswirkt. Daher besteht ein Ziel darin, die Unterschiede bezüglich der Reflexionshöhe benachbarter Bildstreifen zu beseitigen, sodass in Zukunft auch komplette Ackerschläge auf Grundlage von AISA-DUAL Daten untersucht werden können.

Acknowledgements

Die Arbeit wurde im Rahmen des EnMAP Vorbereitungsprogramms durchgeführt und durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) im Rahmen des Projektes ‚Hyland‘ (FKZ 50EE1014) finanziert. Darüber hinaus danken wir Daniel Doktor (Helmholtz Zentrum für Umweltforschung Leipzig) und Patrick Hostert (Humboldt Universität zu Berlin) für die Bereitstellung ihrer Messinstrumente.

6 Literaturverzeichnis

BOEGH, E., SOEGAARD, H., BROGE, N., BROGE, N., HASAGER, C.B., JENSEN N.O., SCHELDE, K. & THOMSEN, A., 2002: Airborne multispectral data for quantifying leaf area index, nitrogen concentration, and photosynthetic efficiency in agriculture. *Remote Sensing of Environment*, **81** (2–3), S. 179–193.

- CARTER, G.A., 1994: Ratios of leaf reflectances in narrow wavebands as indicators of plant stress. *International Journal of Remote Sensing*, **15** (3), S. 697–703.
- DAUGHTRY, C.S.T., GALLO, K.P., GOWARD, S.N., PRINCE, S.D. & KUSTAS, W.D., 1992: Spectral estimates of absorbed radiation and phytomass production in corn and soybean canopies. *Remote Sensing of Environment*, **39** (141-152), S. 141–152.
- DELL'ENDICE, F., NIEKE, J., KOETZ, B., SCHAEPMAN, M.E. & ITTEN, K., 2009: Improving radiometry of imaging spectrometers by using programmable spectral regions of interest. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, **64** (6), S. 632-639.
- DUCHEMIN, B., HADRIAB, R., ERRAKIB, S., BOULETA, G., MAISONGRANDEA, P., CHEBOUNIA, A., ESCADAFAL, R., EZZAHARB, J., HOEDJESA, J.C.B., KHARROUD, M.H., KHABBAB, S., MOUGENTO, B., OLIOSOE, A., RODRIGUEZ, J.C. & SIMONNEAUX, V., 2006: Monitoring wheat phenology and irrigation in Central Morocco: On the use of relationships between evapotranspiration, crops coefficients, leaf area index and remotely-sensed vegetation indices. *Agricultural Water Management*, **79** (1), S. 1-27.
- DUNN, B.W., BEECHER, H.G., BATTEN, G.D. & CIAVARELLA, S., 2002: The potential of near-infrared reflectance spectroscopy for soil analysis-A case study from the Riverine Plain of south-eastern Australia. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, **42** (5), S. 607-614.
- LEE, K., COHEN, W.B., KENNEDY, R.E., MAIERSPERGER, T.K. & GOWER, S.T., 2004: Hyperspectral versus multispectral data for estimating leaf area index in four different biomes. *Remote Sensing of Environment*, **91** (3-4), S. 508-520.
- MALLEY, D.F., MARTIN, P.D. & BEN-DOR, E., 2004: Application in analysis of soils. Near-infrared spectroscopy in agriculture, **44**, S. 729-783.
- PELL, R.J., 2000: Multiple outlier detection for multivariate calibration using robust statistical techniques. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, **52** (1), S. 87-104
- ROGAB, C., SPENGLER, D., BOCHOW, M., SEGL, K., LAUSCH, A., DOKTOR, D., ROESSNER, S., BEHLING, R., WETZEL, H.-U. & KAUFMANN, H., 2011: Reduction of Radiometric Miscalibration-Application to Pushbroom Sensors. *Sensors*, **11**, S. 6370-6395.
- SMITH, G.M. & MILTON, E. J., 1999: The use of the empirical line method to calibrate remotely sensed data to reflectance. *International Journal of Remote Sensing*, **20** (13), S. 2653-2662.

Automatic Building Facade Detection in Mobile Laser Scanner point Clouds

NALANI HETTI ARACHCHIGE¹ & HANS-GERD MAAS¹

Abstract: Mobile Laser Scanner (MLS) has been increasingly used in the modeling of building façade geometry as a means of fast capturing of point data in built-up areas. The processing of such data to extract building façade features automatically is a crucial step in the modeling schemes. This paper presents a segmentation strategy that can be used to segment the façade features in massive point clouds, obtained in MLS. First, object points are isolated from ground points based on the local height histogram analysis. Consequently, initial classification based on the surface roughness is carried out within the dominant facade clusters, obtained by the analysis of linearity of points in 2D space, to classify building points roughly. Each element of the facades such as window, door & wall, are then extracted as planar faces by adopting an Advanced Segmentation step. The planarity of segments is defined by using the RANSAC (Random Sample Consensus) plane fitting. The approach has been tested with MLS data sets, acquired by different systems and the results demonstrate that the method is functional for generating reliable building façade models.

1 Introduction

The impression of a 3D polyhedral building model can be enriched by introducing relevant façade features to the model. Because of that, techniques for an automatic reconstruction of building façades are of high importance. LiDAR data is frequently used for the reconstruction as it has a high automation potential. In this end, modern vehicle-based MLS is promising as it can collect accurate 3D geometry data of urban objects. The usefulness of MLS data for the extraction of urban features has for instance been demonstrated by (RUTZINGER et al., 2009). In general, the workflow of building façade modeling can be divided into three major steps: extraction of building façade points, recognition of building façade features (i.e. door, window, etc.) and model reconstruction based on a 3D topology. The first step is crucial as the subsequent steps directly rely on the result of the first step.

Normally, the geometry of most building facades can be described by a set of planar faces. Although many sophisticated approaches exist to detect planar surfaces (for instance RANSAC, 3D Hough transformation etc.), these methods may be cumbersome, if the algorithm has to deal with a huge amount of data (RUTZINGER et al., 2009; BOULAASSAL et al., 2007). Therefore, in this paper, we propose an improved segment based building façades extraction approach, which can be used to process massive data sets acquired in heterogeneous environments. The proposed method separates the building facades, from other objects, by analyzing their planarity and linearity. Initially, the entire point cloud is divided into individual building clusters in order to reduce the processing time and to detect most reliable and accurate planes of building facades.

1) Institute of Photogrammetry and Remote Sensing, Technische Universität Dresden, Helmholtz Straße 10, 01069 Dresden, Germany;
E-mail: hetti_arachchige.nalani@mailbox.tu-dresden.de, hans-gerd.maas@tu-dresden.de

Afterwards, a roughness based planar segmentation method is utilized to extract façade features. Accordingly, misguidance due to object heterogeneity is reduced.

The overall structure of the paper is organized into five main sections. The first section introduces the rationale of the research. Section two presents a brief overview of existing 3D point cloud processing approaches which can be used for the segmentation of building façade features from other objects. In section three, the proposed method is discussed in detail. Experimental results and conclusions are discussed in section 4 and 5 respectively.

2 Related Work

A voxel based approach to derive planar faces from TLS data is presented by (DOUILLARD et al., 2010). In this method, the amount of data to be processed is reduced by converting original point clouds into a voxel space. Although it is helpful for efficient processing, the data conversion causes a great loss of spatial information as it aggregates irregular point clouds into a region. Alternatively, a KD-tree data structure is often used to work with original point data (for example PU & VOSSELMAN, 2009). Another method is presented in (HAMMOUDI et al., 2009) by combining the Hough Transform, the k-mean clustering algorithm and the RANSAC method. First, 3D points are projected onto a 2D grid space and then points in cells with high point density are considered as façade points. Afterwards, k-means clustering in Hough space is used to determine the exact numbers of facades within a cluster; 2D lines are then computed for each detected cluster. Finally, best fitted lines are extracted using the RANSAC and dominant façade planes are then extracted by intersecting 2D façade lines. (PU & VOSSELMAN, 2009) adopt the region growing concept on top of the 3D Hough Transform to extract planar facade features in TLS data. In this method, seed segments are detected by a Hough Transform and are extended by adding adjacent points if their distance to the plane is below than some threshold. Once there are no more points to be added for a particular segment, the next seed surface is selected and grown. (RUTZINGER et al., 2009 & 2011) apply the same segmentation method for the extraction of vertical building walls from MLS data. Their results confirm that this plane estimation method can be performed well with both TLS and MLS data. However, the Hough Transform may be very sensitive to the segmentation parameters (TARSHA-KURDI et al., 2007). Instead, RANSAC is increasingly used to segment planar faces. The determination of planar surfaces based on the RANSAC method is studied by (BOULAASSAL et al., 2007), where an adoption of RANSAC algorithm is used to improve the quality of plane detection. They assume that the best plane is the one containing the maximum number of points with low standard deviation. Thus, the extended way allows them to detect the best plane within a short time. Later on, (BOULAASSAL et al., 2008) points, relevant to the derived planes are removed and improved the detection performance further.

Our contribution to the research field of façade point extraction is to utilize synergetic properties of both 2D and 3D environment of point clouds to the processing workflow, which assists for gaining an efficient and reliable outcome.

3 Proposed Method

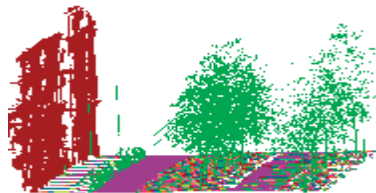
The whole process is structured hierarchically to minimize the amount of points to be processed. It consists of a sequence of three processing stages. First, the input data is classified as ground and non-ground points. Second, points which belong to the facades are identified and grouped as dominant building clusters. Third, each point cluster is segmented into planar surfaces. Each phase is described in detail in the following sections.

3.1 Ground Point Classification

In general, ground points can be defined by points residing on smooth non-vertical lowest surfaces. The method adopted in this paper is similar to the methods described by (MAAS et al., 2008) and (BELTON, 2010). First, the point cloud is partitioned into several 3D vertical columns (or volumetric cells) having a lateral dimension of. The Z-axis of each column is then split into several bins with a height. For each point, the corresponding column, in which the point falls, is calculated, and the histogram bin corresponding to its z-value within the calculated column is incremented. Then, the elevation histogram for each column is computed. The histogram bin belonging to the lowest significant peak of the height histogram is selected as the bin corresponding to the ground, and the height of the bin is considered as the ground height of the corresponding column.

Nevertheless, there are some columns which don't contain ground points, so that the selected ground height from the height histogram are invalid. In this case, the ground height of the column could be interpolated from the heights of the neighboring columns. The column and any adjacent column, whose ground height is below a certain height difference, are then merged. Although the majority of non-ground points can be eliminated this way, some lowest part of the objects such as lower parts of building facades and poles may erroneously be labeled as the ground. A planar surface through the ground points is therefore estimated for each column and adjusted by adding or removing points determined as inliers or outliers respectively. These selected points can be segmented into continuous and smooth ground regions by applying a region growing method (fig. 1). However, as it is out of the goal of this paper, this is not discussed here in detailed.

Fig. 1: Points classified as terrain, building and others; brown & green colors show the building facades & other objects points while magenta (smooth regions) and other colors represent the terrain



3.2 Clustering of Building Points

As the majority of building facades can be described by a set of planar surfaces, the point cloud should be segmented into planar faces to extract building façade features. Processing time may be considerable when extracting planar regions from massive large 3D point clouds. If the search

space can be reduced by delimiting the space into selected façade clusters (individual building point clusters) or by utilizing an efficient data reduction technique which doesn't lose important details such as 3D Alpha shape (RUTZINGER et al, 2011), processing difficulties may be solved. In our approach, we adopt the first case, as the point reduction would reduce the precision of subsequent façade modeling.

Our method is based on the assumption that a building can be described, in 2D space, by their lines representing projections of planes. Therefore, 2D projected data are taken at a defined height interval and possible lines, passing through the façade planes, are detected using a 2D Hough transformation given by (TARSHA-KURDI et al., 2007). Due to the co-planar arrangement of building façades, especially in built-up areas, a detected line is often referring to façade planes, belonging to more than one building. Thus, the most dominant line segment, from the detected line, is chosen by splitting the line into several line segments based on the gap between the consecutive points and a defined threshold. Simultaneously, points relevant to that line segment are removed from the Hough space in order to increase the detection performance. All other 3D points belonging to components of the selected building façade such as balconies, roofs etc., are added by applying a connected component analysis through the k-nearest neighbors. The line detection process stops when a detected line segment is smaller than a certain length. In this way, all the dominant building façade clusters are extracted as shown in the fig. 2.

3.3 Segmentation of Building Façades into Planar Surfaces

Once the building façade clusters are identified, the next process is to extract individual planar surfaces from each façade cluster. In general, facade features such as doors or windows can be assumed to be smooth, whereas natural features, located close to the building are scattered. Thus, surface roughness of the points should be analyzed prior to the planar segmentation, as the point clusters might contain many vegetation patches. Our façade feature segmentation process is carried out in two stages: Rough classification of building points by surface roughness analysis and advanced planar segmentation.

3.3.1 Rough Classification

First, k-nearest neighbors of each point is obtained, and the standard deviation of the orthogonal regression plane fitting residuals is computed to determine the surface roughness of each point. For a given point i , if the k-number of neighbors including the point itself is defined by (x_i, y_i, z_i) such that $i = 0$ to k , the equation of the orthogonal plane can be obtained using equation 1.

$$nx \cdot (x_i - x_0) + ny \cdot (y_i - y_0) + nz(z_i - z_0) = 0 \tag{1}$$

where (x_0, y_0, z_0) is the centroid of the points, d is the distance from the origin and (nx, ny, nz) is the normal vector of fitted plane in x, y, z direction respectively.

The normal vector is obtained by least square minimization while the residuals (i.e. the distance from each point (res_i) to the derived plane) are calculated using equation 2.

$$res_i = \text{abs}(nx(x_i - x_0) + ny(y_i - y_0) + nz(z_i - z_0)) / \sqrt{(nx^2 + ny^2 + nz^2)} \tag{2}$$

Once the entire residuals are computed, the surface roughness for the current point can be determined using equation 3.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{k-1} \sum_{i=0}^k (res_i - \mu)^2} \quad (3)$$

where k is the number of neighbors for a given point, μ is the mean residual for the point cluster and 'res' & σ is the residual and the roughness value of each point respectively.

Now, surface roughness value of each point is analyzed and points, whose roughness value is below a defined threshold, are taken as potential building points. Although most of the building points can be detected by the roughness analysis, points at the building edges are mis-classified. Thus, planar segmentation method based on region growing, highlighted in next section, is applied to rectify the above issue and also to detect individual planar faces. Some results of the roughness analysis are shown in fig. 2 (right).

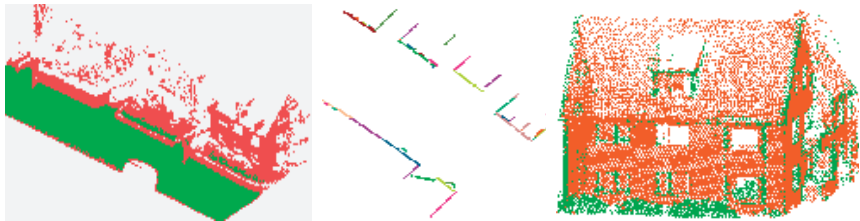


Fig. 2: Point cloud from a part of Bonn, Germany, Points classified as terrain & object points (left), Detected building footprints (middle) and roughness analysis (right): Orange represents building and green represents edges or other proximity objects.

3.3.2 Advanced Planar segmentation

Planar growing segmentation is started by selecting a random point, which has been identified as a building point as explained in section 3.3.1. This selected random point will be the initial seed for the seed segment. If the point has not been segmented previously, a new segment number is assigned and examined the status of the neighboring points. If at least one neighboring point has a non-building label, another random point is chosen whose entire neighborhood has building labels. This neighborhood, including the random point, is then analyzed further by fitting a plane based on the RANSAC approach. Although some variants of RANSAC such as adoptive RANSAC, sequential RANSAC may show increased performances (BOULAASSAL et al., 2008), we use the traditional RANSAC algorithm to detect the best plan with maximum number of inliers, since we have a low number of points to be examined. If the fitted plane contains inliers below a given threshold, then the selected seed points are ignored and another set of points will be selected based on the same criteria. Once a good plane is found, then the point cluster, which has been used to fit the plane, is taken as the seed segment for growing. For the growing, neighboring points of each point on the seed segment are examined and added to the seed segment if their distance to the fitted plane does not exceed some predefined threshold. This growing is continued until no more neighboring points to be satisfied the growing criteria. At the

end, the plane parameters are re-calculated using least square minimization. In this way, every point is assigned to a segment. Some results of our algorithm are shown in fig. 4.

Although the problem of intertwined planes (i.e., connection of co-planar plane) does not present in our results, the erroneous segmentation of points which are located closer to the plane intersection (i.e., plane intersection problem), remains in the results. The method, we use to rectify this problem, is described in the following section in detail.

3.3.3 Plane intersection problem

The problem occurs, if the local neighborhood of a seed segment point does not belong to a single plane. Thus, common points, located along the intersection line of two segments, will be segmented to the first detected plane but not to the nearest plane. Fig. 3 illustrates how the plane intersection problem is influenced to the segmentation process.

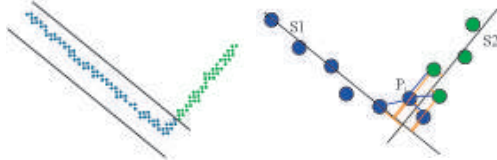


Fig. 3: The intersection problem (left). Correction of Intersection points that lay near the edge (right). The blue lines show the neighborhood of the intersection point P_i , while the orange lines represent the residuals of the points to the both segments S1 and S2

In this case, intersection points located closer to the segment boundary (i.e. edges) must be chosen and should be analyzed to ensure whether it has been assigned to the correct plane (segment) or not. This verification can be done using normal orientation or other attributes of intersect points such as intensity, spectral information and so on. However, in this study, it is done purely based on the surface residuals. First, surface residuals, with respect to the both planes, i.e. current and intersecting plane, are calculated for the intersection point and its neighboring points except non-segmented points. The standard deviation values of both sets of residuals are then computed, and the plane with the smallest value is selected as the correct plane for the intersection point to be assigned to. If the smallest value belongs to the current segment, the point is removed from the segment, that it has already been allocated, and the planes for both segments are recalculated using least square adjustment. In this way, each point is segmented into the correct plane.

4 Results and Discussion

The algorithm has been tested on two different MLS data sets acquired in Dresden and Bonn in Germany. The results of the first stage, i.e. the classification of ground and non-ground points, shown in fig.1, confirm that most objects types such as building, trees and poles can be successfully classified as non-ground points. Similarly, ground points can also be correctly extracted. However, further refinements are needed in order to identify points having tiny changes such as curbstones of roads, as we still cannot discriminate roads from the ground.

Although classified non-ground points are taken as the input for the building façade extraction, dominant building clusters are identified based on the 2D projected data. Thus, the efficiency of the subsequent processing steps is enhanced substantially as we are able to restrict the processing bounds into individual clusters. Accordingly, building façade planar detection is performed in 3D, within the potential regions (fig.2-right). Most of the planar faces such as building walls and building roofs are represented by a low surface roughness, less than 0.04, in our experiments; thus, the majority of the building points have been classified correctly except points near to the building edges, as shown in fig.1. In our approach, seed segments are derived from the orange colored points as explained in the section 3.3.2. Hence, surface roughness is assisted for the correct recognition of seed segment and consequently the detection of correct façade planes. Some results of the advanced segmentation algorithm, referring to different data sets acquired by MLS and TLS techniques, are presented in fig.4. The figures show that different facade features such as windows, doors and walls can be clearly extracted by our approach. Moreover, edge points are accurately segmented into their corresponding correct surfaces.



Fig. 4: Segmentation results of different data sets, acquired from MLS (top left and bottom) and TLS (top middle & top right): The different features are denoted by different colours.

5 Conclusion and Future Work

An automatic façade point extraction method, appropriate for massive point clouds, is outlined. Potential building clusters are recognized effectively from the raw point clouds and planar faces are extracted based on RANSAC and region growing concepts. Based on the surface roughness of the points, an enhanced seed point recognition method is introduced. Thus, quality segments are obtained. The advantage of the proposed algorithm is that the workflow decreases the number of points to be processed by means of a step by step process, which further allows for a better handling of very large MLS point clouds efficiently. Our results confirm the feasibility and

robustness of the approach for segmenting different types of point clouds. Recognized planar faces will be used for the automated modeling of façade features such as doors, windows, walls and so on, in future.

6 Acknowledgement

The authors would like to thank Top-Scan GmbH for providing the MLS data in Bonn, Germany. Thanks also to Mr. Dominik Vock for supporting to us by acquiring MLS data from Münchner Straße, Dresden, and to Dr. Danilo Schneider for providing the TLS data of the TUD rectorate building.

7 References

- BELON, D. & BAE, K., 2010: Automatic Post-Processing of Terrestrial Laser Scanning Point Clouds for Road Feature Surveys. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. 38, Part 5, pp. 74-79.
- BOULAASSAL, H., LANDES, T., GRUSSENMEYER, P., TARSHA-KURDI, F., 2007: Automatic Segmentation of Building Facades using Terrestrial Laser Data. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. 36, Part 3/W52, p. 6.
- BOULAASSAL, H., LANDES, T., GRUSSENMEYER, P., 2008: Automatic Extraction of Planar Clusters and their Contours on Building Façades Recorded by Terrestrial Laser Scanner. *International Journal of Architectural Computing*, 7(1), 1-20, 2009.
- DOUILLARD, B., UNDERWOOD, J., VLASKINE, V., QUADROS, A., & SINGH, S. P. N., 2010: A Pipeline for the Segmentation and Classification of 3D Point Clouds. *Experimental Robotics: The 12th International Symposium on Experimental Robotics*, Springer, p. 8.
- HAMMOUDI, K., DORNAIKA, F. & PAPANODITIS, N., 2010: Extracting Wire-Frame Models Of Street Facades From 3d Point Clouds And The Corresponding Cadastral Map. In: Papanoditis N., Pierrot-Deseilligny M., Mallet C., Tournaire O. (Eds), *IAPRS*, Vol. 38, Part 3A, France, September 1-3, 2010.
- MAAS, H.-G., BIENERT, A., SCHELLER, S., KEANE, E., 2008: Automatic Forest Inventory Parameter Determination from Terrestrial Laser Scanner data. *International Journal of Remote Sensing*, 29 (5), pp. 1579-1593.
- PU, S. & VOSSELMAN, G., 2010: Building Façade Reconstruction by Fusing Terrestrial laser points and Images. *Sensors*, 9(6):4525-4542.
- RUTZINGER, M., HÖFLE, B., ELBERINK, S. O., & VOSSELMAN, G., 2011: Feasibility of Facade Footprint Extraction from Mobile Laser Scanning Data. *PFG 2011 / 3*, 097-107.
- RUTZINGER, M., ELBERINK, S. O., PU, S., VOSSELMAN, G., 2009: Automatic Extraction of vertical walls from Mobile and Airborne Laser scanning Data. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. 38, Part 3/W8, 2009, p. 5.
- TARSHA-KURDI, F., LANDES, T., GRUSSENMEYER, P., 2007: Hough-Transform and Extended RANSAC Algorithms for Automatic Detection of 3d Building Roof Planes from LIDAR Data. *IAPRS Vol. 34, Part 3 / W52*, 2007.

Monoskopische 3D-Geometrieerfassung unter Annahme von Bedingungen aus orientierten Schrägbildern

JOHN MORÉ¹ & ALBERT WIEDEMANN¹

Zusammenfassung: Die Erfassung dreidimensionaler Strukturen und Maße ist die Kernaufgabe der Photogrammetrie. In der Regel müssen die Objekte in mindestens zwei Bildern messbar sein, um diese Aufgabe zu erfüllen. In der Praxis scheitert diese Forderung häufig an äußeren Umständen. In diesem Aufsatz wird geschildert wie unter der Voraussetzung orientierter Bilder, der Existenz eines Digitalen Höhenmodells und einigen wenigen geometrischen Bedingungen dreidimensionale Koordinaten und Maße aus einem einzelnen Bild entnommen werden können. Am Beispiel der Messung von Mastkoordinaten, deren Höhe und andere geometrischer Maße wird eine Methode vorgestellt, die auf orientierten Bildern des Schrägbildsystems AOS basiert.

1 Einleitung

Viele photogrammetrische Aufgaben scheitern an der Anforderung, den zu erfassenden Punkt in mindestens zwei Bildern messen zu müssen. Andererseits liegen häufig andere Informationen oder Bedingungen vor, mit deren Hilfe auch aus einem einzelnen Bild dreidimensionale Daten entnommen werden können. Bei Kenntnis der Kameraorientierung und von Geometrien im Objektraum können auch aus einzelnen Bildern Koordinaten und geometrische Maße ermittelt werden. Deren Güte hängt von der Qualität der Orientierung und der Geometrien im Objektraum ab.

Die BSF Swissphoto betreibt das Schrägbildsystem AOS (WIEDEMANN 2009). Damit können von allen Seiten eines Objekts Schrägbilder aufgenommen werden. Dennoch verdecken in einzelnen Bildern immer wieder andere Objekte wichtige Details. In einem exemplarischen Baublock waren von 128 Gebäudefußpunkten gerade mal 41 Ecken messbar, davon nur 28 in mehreren Bildern, während 13 in nur jeweils einem Bild messbar waren. Mit Hilfe dieser Gebäudefußpunkte können z.B. Dachüberstände bestimmt werden. Unter Verwendung eines Digitalen Geländemodells können auch aus den nur einfach bestimmten Bildpunkten 3D Objektkoordinaten hergeleitet werden.

Eine andere exemplarische Fragestellung ist die Bestimmung der Position, Höhe und Spannweite von Leitungsmasten.

¹ BSF-Swissphoto GmbH, Mittelstr. 7, 12529 Schönefeld; E-Mail: john.more@bsf-swissphoto.com, albert.wiedemann@bsf-swissphoto.com

2 Methodischer Ablauf

2.1 Bedingungen

Die dreidimensionalen Strukturen (Bsp.: Strommasten) sollen aus einzelnen Schrägbilder im [m] bis [dm] Genauigkeitsbereich monoskopisch gemessen werden. Es wird vorausgesetzt, dass das Bild orientiert ist, sowie ein digitales Geländemodell vorhanden ist, alle aufzunehmenden Objekte senkrecht stehen und rechte Winkel besitzen. Es kann jede kalibrierte Kamera verwendet werden und die Aufnahme entweder vom Boden, aus einem Hubschrauber oder aus einer Luftbildbefliegung eines Schrägbildsystems gemacht werden. Der Lotfußpunkt des Objektes muss im Bild messbar und darf nicht durch Vegetation etc. verdeckt sein. Die Geometrie der Objekte wird in mehreren Schritten ermittelt. Zuerst werden Lotfußpunkte, danach vertikal über den Lotfußpunkten stehende Punkte gemessen. Zuletzt können die Endpunkte von rechtwinklig zum Objekt stehenden Elementen ermittelt werden.

Werden alle Voraussetzungen erfüllt kann die Geometrie der Objekte in mehreren Schritten ermittelt werden. Zuerst werden die Lotfußpunkte der Objekte im Bild (Bildkoordinaten) gemessen und mit Hilfe eines digitalen Höhenmodells (DHM) iterativ ins Objektkoordinatensystem gerechnet. In weiteren Schritten werden alle relevanten, vertikal über den Lotfußpunkten stehenden Punkte des Objektes im Bild gemessen und dessen Höhe berechnet. Zuletzt können die Endpunkte von rechtwinklig zum Objekt stehenden Elementen in ihrer Lage ermittelt werden. Ein Strommast kann somit in dessen Höhe und die Position der Isolatoren dreidimensional bestimmt werden.

Damit Einzelbilder geometrisch ausgewertet werden können, müssen sie auf jeden Fall in einer hinreichenden Genauigkeit orientiert sein. Dies kann das Ergebnis einer direkten Georeferenzierung oder das einer Aerotriangulation/Bündelblockausgleichung sein. Da hier Genauigkeiten im Meter- bis Dezimeterbereich gefordert sind, sollte in den meisten Fällen die direkte Georeferenzierung reichen, zumal die Bündelblockausgleichung Passpunkte erfordert, die selten vorhanden sind und nicht nachträglich gemessen werden.

Die zu verwendende Kamera muss kalibriert sein. Je nach Geländebewegung sollte das DHM eine ausreichende Gitterweite aufweisen (je bewegter das Gelände, desto enger das Gitter). Die Genauigkeit des DHMs sollte in den Bereichen der Lotfußpunkte mindestens die der geforderten Genauigkeit, wenn nicht einen Faktor 10 besser sein.

Das aufzunehmende Objekt muss vollständig abgebildet sein, senkrecht (lotrecht) stehen und wenn weitere Elemente aufzunehmen sind dürfen diese nur rechtwinklig sein. Der Lotfußpunkt des Objektes darf nicht von Vegetation etc. verdeckt sein.

2.2 Schritt 1: Berechnung des Lotfußpunktes

Der Lotfußpunkt (f_p) der aufzunehmenden Objekte wird im digitalen Bild gemessen und in metrische Bildkoordinaten umgerechnet. Nun werden diese Bildkoordinaten über die Grundgleichungen der Zentralprojektion in das Objektkoordinatensystem gerechnet. Hierfür ist die Kenntnis der Geländehöhe des Objektpunktes nötig. Da wir diese Höhe nicht kennen, verfolgen wir den Sichtstrahl vom Projektionszentrum aus solange, bis wir das Höhenmodell treffen, das heißt, es wird folgender iterativer Prozess in Gang gesetzt.

- 1) Bildkoordinaten x_{fp}', y_{fp}' und Bildorientierung \Rightarrow Objektkoordinaten X_i, Y_i, Z_i
 Äußere Orientierung: Projektionszentrum X_0, Y_0, Z_0 und Drehmatrix $A(\vartheta, \varphi, \kappa)$
 Innere Orientierung: In die Bildkoordinaten sind die Hauptpunktlage und Verzeichnung hineingerechnet, $z' = -ck$ (Kamerakonstante)
 Startwert 1. Iterationsschritt: $Z_i = Z_0$, i. Iterationsschritt: $Z_i = Z_{dhm}(X_{i-1}, Y_{i-1})$

$$X_i = X_0 + (Z_i - Z_0) \frac{a_{11}x_{fp}' + a_{12}y_{fp}' + a_{13}z'}{a_{31}x_{fp}' + a_{32}y_{fp}' + a_{33}z'} \quad Y_i = Y_0 + (Z_i - Z_0) \frac{a_{21}x_{fp}' + a_{22}y_{fp}' + a_{23}z'}{a_{31}x_{fp}' + a_{32}y_{fp}' + a_{33}z'}$$

Gleichung 1: Projektive Beziehung

- 2) Abbruchkriterium prüfen: Ist $dZ_i = |Z_{dhm} - Z_i| < 0.01$ wurde der Lotfußpunkt gefunden.

$$X_{fp} = X_i \quad Y_{fp} = Y_i \quad Z_{fp} = Z_i$$

Dieser Prozess liefert nach ca. 5 Iterationen das Ergebnis. Es können folgende Probleme hierbei auftreten:

- 1) Der Sichtstrahl trifft mehrmals auf das DHM und liefert das Ergebnis im ersten Punkt vom Projektionszentrum aus gesehen. Dies würde als Lagefehler zu erkennen sein.
- 2) Das DHM hat im Bereich des Lotfußpunktes eine Unstetigkeitsstelle. Hierbei ist die Iteration nicht konvergent und findet kein Abbruchkriterium.

2.3 Schritt 2: Berechnung von Punkten vertikal über dem Lotfußpunkt

Die Höhe (ho) oder die Schnittpunkte (ps) von weiteren Elementen auf der Lotlinie werden im Bild gemessen. Diese „Hochpunkte“ haben alle die selbe Lage, wie der Lotfußpunkt (unter der Voraussetzung, dass das Objekt lotrecht steht). Es ist daher einfach, aus den Bildkoordinaten und der Lagekoordinaten die Höhe dieser Punkte zu berechnen. Die Formel der Zentralprojektion wird entsprechend umgestellt. Es entstehen nun zwei Formeln für Z. Beide Formeln sollten eigentlich dasselbe Ergebnis liefern. Nun ist es durchaus möglich, dass das Projektionszentrum auf einer Linie mit der X- oder Y-Achse liegt. In diesen Fällen wird der Term $X_{fp} - X_0$ oder $Y_{fp} - Y_0$ nahe oder gleich Null. Eine Berechnung der Höhe ist dann nicht oder nur sehr ungenau möglich. Sind beide Terme Null, liegt das Projektionszentrum direkt über dem Lotfußpunkt und die Höhe ist nicht berechenbar. Es ist also eine Fallunterscheidung nötig.

$$Z_{ps,ho} = (X_{fp} - X_0) \frac{a_{31}x_{ps,ho}' + a_{32}y_{ps,ho}' + a_{33}z'}{a_{11}x_{ps,ho}' + a_{12}y_{ps,ho}' + a_{13}z'} + Z_0 \quad X_{ps,ho} = X_{fp}$$

$$Z_{ps,ho} = (Y_{fp} - Y_0) \frac{a_{31}x_{ps,ho}' + a_{32}y_{ps,ho}' + a_{33}z'}{a_{21}x_{ps,ho}' + a_{22}y_{ps,ho}' + a_{23}z'} + Z_0 \quad Y_{ps,ho} = Y_{fp}$$

Gleichung 2: Gl. 1 umgestellt nach Z

2.4 Schritt 3: Berechnung mehrerer Punkte auf einer Orthogonalen zur Lotlinie

Nun können die Punkte (π) senkrecht zur Lotlinie berechnet werden. Diese Punkte werden im Bild gemessen. Die Bildkoordinaten und die Objekthöhe (Schnittpunkt aus 2.3) sind bekannt. Die Lagekoordinaten können nun wieder mit der Zentralprojektion gerechnet werden.

$$X_{\pi} = X_0 + (Z_{ps} - Z_0) \frac{a_{11}x_{\pi}' + a_{12}y_{\pi}' + a_{13}z_0'}{a_{31}x_{\pi}' + a_{32}y_{\pi}' + a_{33}z_0'} \quad Y_{\pi} = Y_0 + (Z_{ps} - Z_0) \frac{a_{21}x_{\pi}' + a_{22}y_{\pi}' + a_{23}z_0'}{a_{31}x_{\pi}' + a_{32}y_{\pi}' + a_{33}z_0'}$$

$$Z_{\pi} = Z_{ps}$$

2.5 Vollständige Beschreibung des Objektes

Nach diesen Berechnungen liegen alle relevanten Punkte des Objektes als 3D-Koordinaten vor. Berechnungen zur Höhe und Breite/Abstände können nun berechnet und dokumentiert werden. Der wichtigste und fehleranfälligste Schritt ist der der Lotfußpunktberechnung.

3 Beispiel

Im folgenden Beispiel werden die Höhe eines Mastes und die Positionen der Isolatoren, sowie die Breite des Balkens von Strommasten aus AOS-Schrägbildern berechnet. Die Bilder entstanden bei einer Befliegung in der Schweiz im bewegten Gelände. Die Bildorientierungen wurden mittels Bündelblockausgleichung berechnet. Das DHM ist das Ergebnis einer ALTM-Befliegung vom Kanton Appenzell.

3.1 Schrägluftbild, Orthophoto

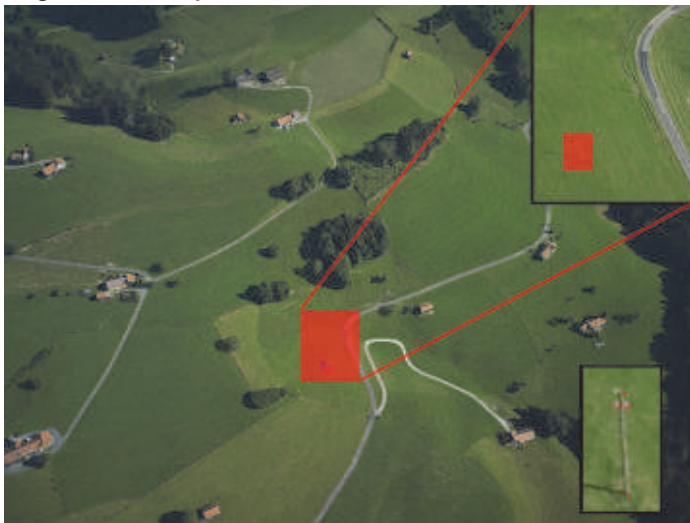


Abb. 1: Schrägluftbild mit Bildmessung des Strommastes

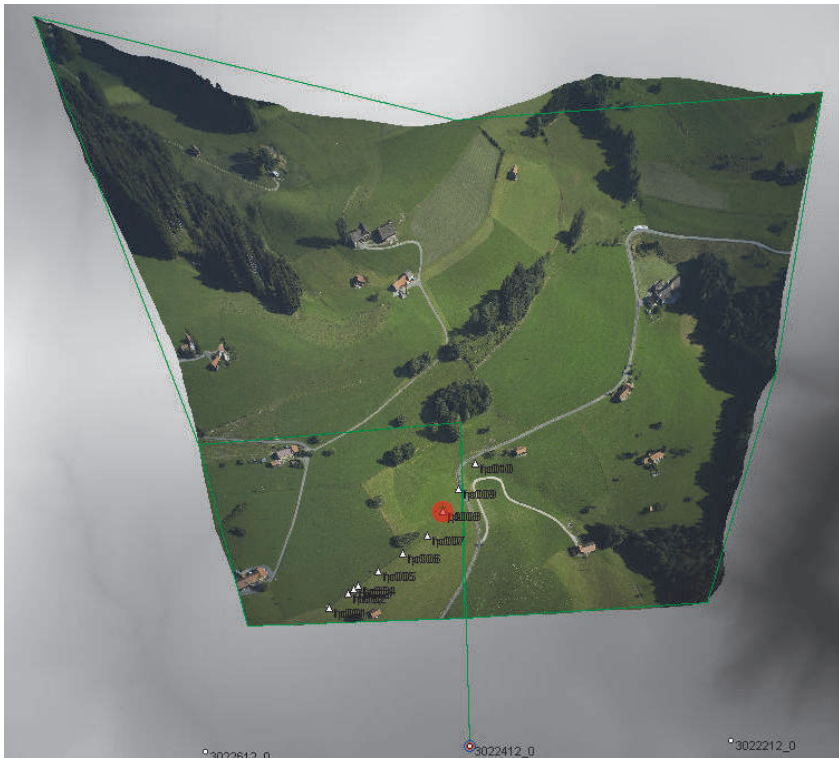


Abb. 2: Orthophoto mit eingeblendeten Objektkoordinaten über einem DHM

Der im Beispiel dargestellte Mast ist rot markiert. Weitere Masten wurden auf dieselbe Art beschrieben und lieferten ähnliche Ergebnisse, auf die hier nicht eingegangen wird.

Die Bodenauflösung liegt in diesem Bild zwischen 8 cm (kurze Kante unten: Nadirbereich) und 14 cm (lange Kante oben), da das Bild um ca. 42 gon geneigt ist. Es ist sogar möglich eine Angabe der Höhengauflösung zu machen. Der Bildbereich um den Mast hat eine Höhengauflösung von ca. 18 cm.

3.2 Objekt: Strommast

Der Strommast besteht in unserem vereinfachten Beispiel aus 5 Punkten: den Lotfußpunkt (fp), den höchsten Punkt (ho), den Schnittpunkt des Balkens mit dem Mast (ps) und die beiden Isolatoren am Balken (p1 und p2). Vorausgesetzt wird, dass der Mast lotrecht steht und der Balken senkrecht zum Mast.



Abb. 3: links: Strommast schematisch, Mitte: Strommast im Bild, rechts: Strommast mit Bildmessung

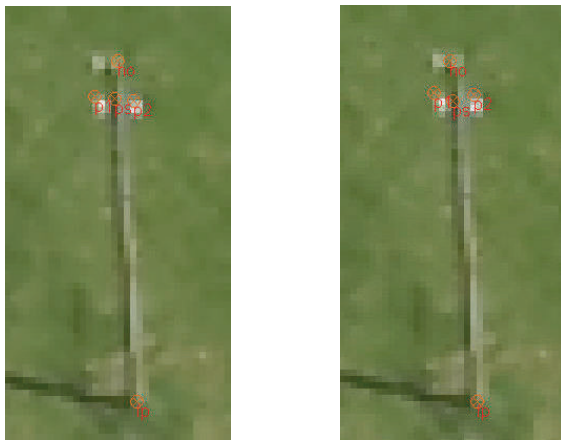


Abb. 4: In das Bild eingblendete Objektkoordinaten, links: 3D-Stereoauswertung, rechts: monoskopisch

4 Ergebnis

Das Ergebnis der Berechnung liegt nun in 3D-Objektkoordinaten vor und wird mit dem eines Vorwärtsschnitts überprüft.

4.1 Vergleich mit Vorwärtsschnittberechnung

Die 3D-Objektkoordinaten werden nun mit einer vorhergehenden 3D-Stereoauswertung (Vorwärtsschnitt) der Punkte fp,ho,ps,p1,p2 direkt gegenübergestellt, und es wird mit den Lagekoordinaten dieser Punkte eine Helmerttransformation berechnet und die Residuen betrachtet. Die Höhendifferenzen beider Berechnungen werden über das vorliegende DHM berechnet und gegenübergestellt.

Tab. 1: Vergleich der Koordinaten, V-Vorwärtsschnitt, M-monoskopische Berechnung

	Rechts-V	Rechts-M	Diff.	Hoch-V	Hoch-M	Diff.	Höhe-V	Höhe-M	Diff.
fp	740586.732	740586.764	-0.032	247944.680	247944.392	0.288	828.960	829.447	-0.487
ho	740586.841	740586.764	0.077	247944.725	247944.392	0.333	838.654	839.188	-0.534
ps	740586.748	740586.764	-0.016	247944.815	247944.392	0.423	837.427	838.060	-0.633
p1	740586.449	740586.490	-0.041	247944.916	247944.512	0.404	837.284	838.060	-0.776
p2	740587.040	740587.045	-0.003	247944.571	247944.496	0.075	837.814	838.060	-0.246

Die Höhendifferenzen zeigen einen systematischen Anteil von ca. 0,5 m. Der nicht systematische Anteil liegt im Mittel bei 0,2 m. Der höhere systematische Anteil kann bei dieser Aufgabenstellung vernachlässigt werden, da zur Beschreibung des Objektes nur relative Höhen verwendet werden.

Tab. 2: Residuen der Helmerttransformation

fp > fp	vy:	0.0752	vx:	0.1324	Lagefehler:	0.1522
ho > ho	vy:	-0.0337	vx:	0.0873	Lagefehler:	0.0936
ps > ps	vy:	0.0593	vx:	-0.0021	Lagefehler:	0.0593
p1 > p1	vy:	0.0839	vx:	0.0167	Lagefehler:	0.0855
p2 > p2	vy:	0.0484	vx:	0.3459	Lagefehler:	0.3493

Der Lagefehler liegt im [dm]-Bereich. Obwohl der Mast nur in einem sehr kleinen Bereich des Bildes sichtbar ist, reicht die erreichte Genauigkeit aus, um den Anforderungen zu genügen.

Tab. 3: Höhendifferenzen der Punkte zum DHM, V-Vorwärtsschnitt, M-monoskopische Berechnung

Punkt	Höhe DHM	Höhe-V	Höhe-M	Diff.-V	Diff.-M
fp	829.476	828.960	829.447	-0.516	-0.000
ho	829.443	838.655	839.188	9.212	9.741
ps	829.480	837.428	838.060	7.948	8.613
p1	829.587	837.285	838.060	7.698	8.515
p2	829.367	837.815	838.060	8.448	8.700

4.2 Vergleich über Spannmaße

Für die 3D-Geometrierfassung des Objektes sind nur relative Werte (Strecken) zwischen den Punkten (fp,ho,ps,p1,p2) nötig. Anhand der 3D-Objektkoordinaten können diese Strecken

berechnet und ein Soll-Ist-Vergleich gemacht werden. Die Sollwerte werden aus dem Ergebnis des Vorwärtsschnitts entnommen.

Tab. 4: Vergleich der Strecken, V-Vorwärtsschnitt, M-monoskopische Berechnung

Strecke	Soll (V)	Ist (M)	Differenz
fp - ho	9.695	9.741	-0.046
fp - ps	8.469	8.613	-0.144
ps - p1	0.347	0.299	0.048
ps - p2	0.543	0.300	0.243
p1 - p2	0.866	0.555	0.311

Auffällig ist die Differenz der Strecke zwischen den Isolatoren. Hier ist der Abstand im Bild schon sehr gering (<8 Pixel), so dass hier größere Ungenauigkeiten zu erwarten sind. Die Höhenberechnung zeigt geringe Abweichungen.

5 Zusammenfassung, Ausblick

Mit der Grundformel der Zentralprojektion und zusätzlichen Bedingungen lassen sich Objekte dreidimensional in nur einem Bild erfassen. Die Genauigkeit hierfür hängt maßgeblich von der Einhaltung der Bedingungen ab (DHM, Struktur ist lotrecht und rechtwinklig) sowie der Bildorientierung. Da das Verfahren zur Auswertung von Strecken, also einer relativen Größe, eingesetzt wird, und eine Genauigkeit im [dm] bis [m] Bereich gefordert ist, zeigt sich, dass es für die Strukturerrfassung geeignet ist und angewendet werden kann.

Darauf basierend folgt die Entwicklung einer automatischen Objekterkennung und -messung im Bild bis hin zur Voll- bzw. Semiautomatisierung der 3D-Beschreibung eines Objektes.

6 Literaturverzeichnis

- ALBERTZ, J. & KREILING, W., 1998: Photogrammetrisches Taschenbuch 4. Auflage, S. 166-169, Wichmann Verlag, Karlsruhe
- WIEDEMANN, A., 2009: Photogrammetrische Schrägluftbilder mit dem Aerial Oblique System AOS, Deutsche Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung DGPF-Jahrestagung Jena 2009, Band 18

7 Danksagung

Wir danken dem Kanton Appenzell und Hr. Eugster der Fa. GEOINFO AG für die Bereitstellung der Schrägbilder und des DHMs.

Entwicklung eines geometrischen Modells für ein voll-reflektives Kamerasystem für Nahbereichsanwendungen

KATJA RICHTER¹, KRISTOF SEIDL¹, DANILO SCHNEIDER¹,
DAVID MADER¹ & HANS-GERD MAAS¹

Zusammenfassung: Für einige photogrammetrische Anwendungen ist die Abbildung eines breiten Spektralbereichs (z.B. UV, VIS und NIR) erforderlich. Da herkömmliche refraktive Optiken aufgrund der chromatischen Aberration nur für einen begrenzten Spektralbereich eingesetzt werden können, arbeiten die konventionellen Systeme hier oft mit mehreren Kameras, deren Optiken für das gewünschte Spektralband optimiert sind. Die Verwendung mehrerer Kameras oder Objektive bringt verschiedene Nachteile mit sich. So muss im Auswerteprozess die Parallaxe der aufgenommenen Bilder korrigiert werden, die Synchronisation bewegter Sensoren bedingt u.U. einen Extraaufwand, und durch das höhere Gewicht wird beispielsweise der Einsatz mit UAVs eingeschränkt.

Dagegen weist eine voll-reflektive Optik (d.h. ein ausschließlich aus Spiegeln aufgebautes Objektiv) die Probleme der Aberration nicht auf und kann daher für einen breiten Spektralbereich genutzt werden. In der Publikation wird ein solches voll-reflektives Kamerasystem vorgestellt. Prinzip bedingt weist die Optik dieses Systems starke asymmetrische Verzerrungen auf, die mit herkömmlichen Kalibriermodellen der Nahbereichsphotogrammetrie nur unzureichend modelliert werden können. Daher wird die Entwicklung eines geeigneten geometrischen Modells vorgestellt, das auf der Zentralperspektive basiert und um spezifische Zusatzparameter erweitert wurde. Zur Validierung des Kameramodells werden die Ergebnisse von Testfeldkalibrierungen mit Prototypen des voll-reflektiven Kamerasystems präsentiert.

1 Einleitung

Reflektive Optiken kommen heute hauptsächlich in der Astronomie bei Teleskopen zum Einsatz. Dort werden Spiegelobjektive verwendet, um die starke Vergrößerung von weit entfernten Objekten zu ermöglichen. Durch die Faltung des Strahlengangs im Spiegelobjektiv kann die dafür notwendige große Systembrennweite realisiert werden. Bei den meisten Teleskopen besitzen alle Elemente des Objektivs eine gemeinsame optische Achse ("On-Axis"-System). Das führt zu einer zentralen Abschattung des Strahlenganges, die für ein voll-reflektives Kamerasystem nicht tragbar ist. Werden die Spiegel hingegen so angeordnet, dass sie keine gemeinsame optische Achse bilden, kann die Zentralabschattung umgangen werden. Ein solches System wird auch als "Schiefspiegler" bezeichnet ("Off-Axis"-System) (SEIDL, 2011).

1) Dipl.-Ing. Katja Richter, Prof. Dr. habil. Hans-Gerd Maas, Dr.-Ing. Danilo Schneider, Dr.-Ing. Kristof Seidl, David Mader, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, Technische Universität Dresden, Helmholtzstraße 10, 01062 Dresden, E-Mail: katja.richter1@tu-dresden.de, hans-gerd.maas@tu-dresden.de

Gegenüber konventionellen refraktiven Optiken bieten reflektive Optiken einen entscheidenden Vorteil dadurch, dass sie keine chromatischen Aberrationen aufweisen. Dies ist vor allem für solche Anwendungen wichtig, in denen ein breiter Spektralbereich abgebildet werden muss. Gelingt es, die starke asymmetrische Verzeichnung eines Schiefspieglersystems mit hoher Genauigkeit zu modellieren, erschließen sich photogrammetrische Anwendungen z. B. bei der Bauschadenskartierung (HEMMLEB, 2006), der Restaurierung historischer Gebäude (LERMA, 2000), dem Precision Farming (ROVIRA-Más, 2010) oder im Bereich von Sicherheitsanwendungen (WEIDNER, 2004). In dieser Arbeit wird der Entwicklungsprozess des dafür notwendigen geometrischen Modells dargestellt.

2 Design des voll-reflektiven Kamerasystems

Abb. 1 zeigt den inneren Aufbau eines Schiefspieglers, der aus vier Spiegeln und einem CMOS-Sensor besteht. Werden zwei der Spiegel als deformierbar konzipiert, kann auch die Systembrennweite geändert und somit die Zoomfähigkeit des Objektivs realisiert werden. Das entsprechende optische Design wurde in SEIDL (2009) vorgestellt. Da deformierbare Spiegel mit den nötigen Spezifikationen derzeit nicht verfügbar sind, werden im Folgenden Festbrennweiten behandelt.

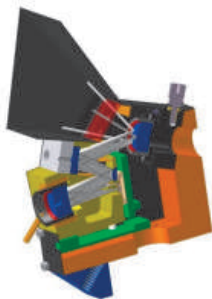


Abb. 1: Innerer Aufbau eines Schiefspieglersystems



Abb. 2: Demonstratoren

Für die nachfolgend gezeigten Arbeiten standen drei Demonstratoren unterschiedlicher Brennweite zur Verfügung, für die ein geeignetes geometrisches Modell zur Modellierung der inneren Orientierung und der Verzeichnung entwickelt werden soll. Die Demonstratoren unterscheiden sich lediglich in ihrer Kamerakonstante und sind ansonsten baugleich (Abb. 2). Die unterschiedlichen Brennweiten werden durch unterschiedlich stark gekrümmte Spiegel realisiert. Tabelle 1 gibt einen Überblick über die technischen Daten.

Tab. 1: Technische Daten der Demonstratoren

	Weitwinkelobjektiv	Normalwinkelobjektiv	Teleobjektiv
Kamerakonstante	5,2 mm	7,9 mm	15,8 mm
Bildfeldwinkel	38° x 49°	26° x 34°	13° x 17°
Allgemeines			
Bildgröße	2048 Pixel x 1536 Pixel		
Sensorname	iCube NS 1300CU		
Sensortyp	½" CMOS MT9T001		
Pixelgröße	3,2 µm x 3,2 µm		
Sensorgöße	6,55 mm x 4,92 mm		
Verschlusstyp	Rolling Shutter		

Die Beispielbilder in Abbildung 3 zeigen die asymmetrische Verzeichnung der Optik, die beim Weitwinkelobjektiv (links) am stärksten sichtbar wird.



Abb. 3: Beispielbilder (Weitwinkel, Normalwinkel, Schmalwinkel)

3 Geometrisches Modell

3.1 Ausgangsmodell

Bei der Kalibrierung von refraktiven Optiken (Linsensystemen) wird das mathematische Modell der Zentralperspektive zugrunde gelegt und um verschiedene Verzeichnungsparameter erweitert, um die Abweichungen der Kamera vom Idealmodell zu berücksichtigen. Die Zentralperspektive ist für reflektive Optiken zunächst nicht physikalisch begründet. Im Hinblick auf die Anwendbarkeit von Standardwerkzeugen der Photogrammetrie bei der Auswertung solcher Aufnahmen soll das Modell der Zentralperspektive dennoch zur Anwendung kommen. Ziel ist es, das Modell so zu erweitern bzw. anzupassen, dass es zur Kalibrierung eines reflektiven Schiefspieglersystems eingesetzt werden kann.

Hierfür wurde ein auf die Demonstratoren abgestimmtes Testfeld (Abb. 4) angelegt und mit allen drei Kameras mehrfach aufgenommen. Das Testfeld besteht ausschließlich aus codierten Zielmarken, damit es später auch für die Selbstkalibrierung genutzt werden kann. Die automatische Zuordnung von uncodierten Marken in einem Bildverband ist mit einem Industriephotogrammetriesoftwarepaket wegen der starken Verzeichnung nicht möglich. Die Normalobjektivkamera repräsentiert die Spiegeloptik am besten, während die anderen beiden Kameras eher als Extremfälle gesehen werden. Daher wurde das Modell zunächst auf die Aufnahmen aus der Messreihe mit der Normalobjektivkamera optimiert, um hier im räumlichen Rückwärtschnitt die Modellparameter zu berechnen. Anhand der Standardabweichung der Gewichtseinheit σ_0 und weiterer Ausgleichsergebnisse kann eingeschätzt werden, wie gut das funktionale Modell den vorliegenden Messdaten entspricht.

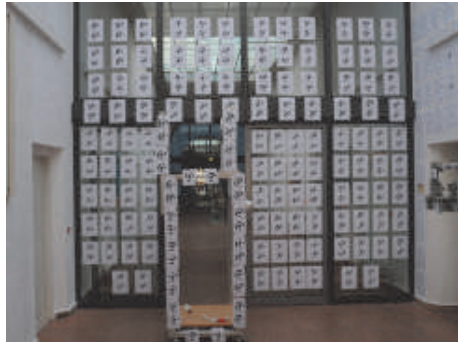


Abb. 4: Testfeld

3.2 Erweiterung um Zusatzparametersätze

Aus der photogrammetrischen Praxis sind die verschiedensten Zusatzparametersätze bekannt. Einige von ihnen sind für die Luftbildphotogrammetrie gedacht, können aber für unsere Zwecke modifiziert werden. Bei herkömmlichen Kameras genügt es in der Regel, die Verzeichnung mit Hilfe der Brown Parameter zu modellieren (BROWN, 1971). Beim reflektiven Kamerasystem kann mit diesen Parametern lediglich eine Standardabweichung der Gewichtseinheit von 0,057 mm bzw. 17,8 Pixel erreicht werden.

Als Alternative zu Brown wurden daher folgende Parametersätze getestet: Mixed Model Brown (BROWN, 1976), Ebner (EBNER, 1976), Grün (GRÜN, 1978), Schut (SCHUT, 1978), Maelshagen (MAUELSHAGEN, 1977), Kölbl (JUHL, 1979), El-Hakim (EL-HAKIM, 1977) und Seidl¹. Die Koordinaten des Bildhauptpunktes wurden zunächst bei keinem Parametersatz geschätzt, da ihre Schätzung das Konvergenzverhalten stark verschlechterte. Die oben genannten Parametersätze wurden außerdem jeweils in Kombination mit den Brown-Parametern getestet (außer Mixed Model Brown), wobei doppelt auftretende bzw. vollständig korrelierte Parameter ausgeschlossen werden mussten.

In Tabelle 2 sind die erreichten Genauigkeiten zusammengestellt. Es wird deutlich, dass die Parametersätze, einzeln verwendet, die Verzeichnung nicht mit ausreichender Genauigkeit korrigieren. Die besten Ergebnisse erzeugen die Kombinationen Brown + Grün mit 0,3 Pixeln, Brown + Schut mit 0,48 Pixeln und Brown + Ebner mit 0,59 Pixeln. Für die weiteren Untersuchungen werden die Brown + Grün und die Brown + Ebner Kombination gewählt. Die

¹ Der als "Seidl" bezeichnete Parametersatz wurde aus Simulationsdaten hergeleitet und bereits in SEIDL (2010) vorgestellt.

Erstgenannte besitzt das größte Genauigkeitspotential, die Zweite liefert mit relativ wenigen Parametern trotzdem akzeptable Genauigkeiten. Um das Problem mit dem Hauptpunkt zu analysieren werden außerdem die Brown Parameter allein weiter betrachtet.

Tab. 2: Vergleich Zusatzparametersätze

	$\hat{\sigma}_0$ [mm]	$\hat{\sigma}_0$ [Pixel]
Brown+Grün	0,00098	0,30
Brown+Schut	0,00154	0,48
Brown+Ebner	0,00188	0,59
Schut	0,00188	0,59
Grün	0,00290	0,91
Mixed Brown	0,00566	1,77
Brown+Seidl	0,00695	2,17
Seidl	0,01645	5,14
Ebner	0,02057	6,43
Mauelshagen	0,04944	15,45
El-Hakim	0,05463	17,07
Brown+El-Hakim	0,05530	17,28
Brown	0,05700	17,81
ohne Zusatzparameter	0,06114	19,11
Kölbl	0,06132	19,16
Brown+Kölbl	keine Konvergenz	
Brown+Mauelshagen	keine Konvergenz	

3.3 Optimierung des Modells

Stellt man die Funktionen der Verzeichnungsparameter f_{Brown} , f_{Ebner} und $f_{Grün}$ in Abhängigkeit der verwendeten Bildpunkte dar, ergeben sich folgende Modelle:

Zentralperspektive mit Brown Parametern:

$$(x, y) = HP + f_{Kölbl} \quad (1)$$

$$(x', y') = (x, y) + f_{Brown}(x, y)$$

Zentralperspektive mit Brown und Ebner Parametern:

$$(x_b, y_b) = f_{Kölbl} \quad (2)$$

$$(x', y') = (x, y) + f_{Brown}(x, y) + f_{Ebner}(x_b, y_b)$$

Zentralperspektive mit Brown und Grün Parametern:

$$(x', y') = (x, y) + f_{\text{Brown}}(x, y) + f_{\text{Grün}}(x_b, y_b) \quad (3)$$

In dieser Darstellung sind (x', y') die korrigierten Bildkoordinaten, f_{Koll} die Funktion der Kollinearitätsgleichung und HP der Hauptpunkt (x_h, y_h) . Während in die Berechnung der Brown Parameter die um den Hauptpunkt korrigierten Bildkoordinaten eingehen, beziehen sich die Ebner und Grün Parameter zunächst nicht auf den Hauptpunkt. Da sie weder rotationssymmetrisch noch physikalisch begründet sind, erscheint dies zunächst am sinnvollsten. Wird Modell (1) im Rückwärtsschnitt verwendet, konvergiert dieser erst nach über 20 Iterationen, wobei $\delta_0 = 0,025$ mm ist. Für den Hauptpunkt werden untypisch große Werte ($x_h = 0,11$ mm, $y_h = -3,8$ mm) geschätzt. Die Erweiterung um die Ebner Parameter im Modell (2) bringt zwar eine deutliche Genauigkeitssteigerung ($\delta_0 = 0,002$ mm), erschwert die Konvergenz aber noch mehr.

Offensichtlich ist das Modell in dieser Form nicht gänzlich schlüssig und muss geändert werden. Dafür kommen verschiedene Varianten in Frage: Einerseits können die Zusatzparametersätze komplett ausgetauscht werden, was aufgrund des vielversprechenden Genauigkeitspotentials vorerst nicht in Betracht gezogen wird. Andererseits können die Zusatzparameter von Brown und Ebner weiter untersucht werden. Hier spielen die Parameter an sich, die verwendeten Bildpunkte und der Bildhauptpunkt eine Rolle.

Beim Vergleich der tonnenförmigen Verzeichnung eines herkömmlichen Objektivs mit dem Verzeichnungsbild des Spiegelobjektivs entstand die Idee, einen gesonderten Symmetriepunkt für die radialsymmetrische Verzeichnung einzuführen. Die Brown Parameter können dadurch separat auf einen Symmetriepunkt (x_s, y_s) bezogen werden (Abb. 5), der entweder geschätzt oder auf die Bildmitte festgesetzt wird. Das neue Modell sieht folgendermaßen aus:

$$(x', y') = (x, y) + f_{\text{Brown}}(x_s, y_s) + f_{\text{Ebner}}(x_b, y_b) \quad (4a)$$

$$(x', y') = (x, y) + f_{\text{Brown}}(0,0) + f_{\text{Ebner}}(x_b, y_b) \quad (4b)$$

Aus den Ergebnissen in Tabelle 3 wird deutlich, dass der Gewichtseinheitsfehler durch die Trennung von Brown Parametern und Hauptpunkt auf 0,00064 mm (0,2 Pixel) verbessert werden kann. Allerdings tritt auch hier die Konvergenz erst nach mehr als 20 Iterationen ein. Außerdem ist das Modell so instabil, dass es nicht auf alle Bilder angewendet werden kann. Etwas stabiler verhält sich die Variante mit festem Symmetriepunkt $(0,0)$, wobei auch hier die Ergebnisse nicht zufriedenstellend sind.

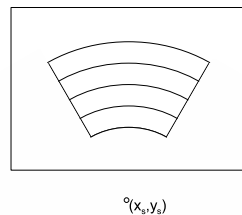


Abb. 5: Symmetriepunkt für die radialsymmetrische Verzeichnung

Tab. 3: Brown und Ebner Parameter mit Brown auf einen geschätzten Symmetriepunkt (x_s, y_s) und auf $(0,0)$ bezogen

	\mathfrak{S}_0 [mm]	x_h [mm]	y_h [mm]	x_s [mm]	y_s [mm]
Brown auf (x_s, y_s) bezogen (4a)	0,00064	-0,130	-3,27	0,05	-0,32
Brown auf $(0,0)$ bezogen (4b)	0,00072	-0,079	-2,95	0	0

Daher wurde als nächste Modellanpassung die Möglichkeit betrachtet, die Ebner Parameter auf den Hauptpunkt zu beziehen:

$$(x', y') = (x, y) + f_{\text{Brown}}(x_s, y_s) + f_{\text{Ebner}}(x, y) \quad (5a)$$

$$(x', y') = (x, y) + f_{\text{Brown}}(0,0) + f_{\text{Ebner}}(x, y) \quad (5b)$$

Die in Tabelle 4 zusammengestellten Ergebnisse zeigen, dass sich die Genauigkeiten und die Parameter durch diese Anpassung wenig ändern. Allerdings zeigt die Variante (5b), bei der die Brown Parameter auf die Bildmitte bezogen werden, ein normales Konvergenzverhalten mit durchschnittlich 12 Iterationen. Variante (5a) mit dem geschätzten Symmetriepunkt wird an dieser Stelle verworfen, da die Konvergenz unverändert schlecht und der Genauigkeitsgewinn nur gering ist.

Tab. 4: Ebner Parameter auf den Hauptpunkt bezogen

	\mathfrak{S}_0 [mm]	x_h [mm]	y_h [mm]	x_s [mm]	y_s [mm]
Brown auf (x_s, y_s) bezogen (5a)	0,00065	-0,15	-3,21	0,03	-0,30
Brown auf $(0,0)$ bezogen (5b)	0,00072	-0,11	-2,89	0	0

Nachdem mit (5b) ein funktionierendes geometrisches Modell gefunden wurde, konnte anschließend die Genauigkeit durch Verwendung des Parametersatzes von Grün auf 0,00028 mm (0,088 Pixel) gesteigert werden.

$$(x', y') = (x, y) + f_{\text{Brown}}(0,0) + f_{\text{Grün}}(x, y) \quad (6)$$

Die starke Verschiebung des Bildhauptpunktes entlang der y-Achse lässt sich durch den schrägen Einfall der Strahlen auf die optischen Elemente erklären.

4 Test des geometrischen Modells

Die entwickelten geometrischen Modelle werden nun im Rückwärtsschnitt auf alle drei Kameras angewendet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 5 zusammengefasst. Der für das Normalobjektiv bereits nachgewiesene Genauigkeitsgewinn durch die Modellanpassungen ist auch beim Weit- und Teleobjektiv erkennbar. Allerdings besitzt Modell 6 für das Teleobjektiv keine Gültigkeit.

Tab. 5: Ergebnisse Rückwärtsschnitt

	Weitwinkel		Normalwinkel		Telewinkel	
	σ_0 [mm]	σ_0 [Pixel]	σ_0 [mm]	σ_0 [Pixel]	σ_0 [mm]	σ_0 [Pixel]
Brown + Ebner ohne HP	0,00217	0,68	0,00188	0,59	0,00062	0,19
Brown + Ebner + HP (5b)	0,00073	0,23	0,00066	0,21	0,00050	0,16
Brown + Grün ohne HP	0,00056	0,18	0,00098	0,30	0,00041	0,13
Brown + Grün + HP (6)	0,00031	0,10	0,00030	0,09		

Abbildung 6 zeigt die mit den im Rückwärtsschnitt bestimmten Parametern entzeichneten Beispielbilder.



Abb. 6: Entzeichnete Aufnahmen (Weitwinkel, Normalwinkel, Schmalwinkel)

5 Ausblick

Ergebnis der bisherigen Analysen ist ein funktionierendes geometrisches Modell, mit dem die Verzeichnungen einer reflektiven Optik modelliert werden können. Der Gewichtseinheitsfehler eines Rückwärtsschnittes auf ein Testfeld konnte dadurch von 19,1 Pixel auf unter 0,1 Pixel reduziert werden. In nachfolgenden Untersuchungen soll der gefundene Modellansatz in einer Bündelblockausgleichung getestet werden. Außerdem sollen Systematiken in den Verbesserungen untersucht und weitere Modellvarianten, unter anderem mit den Zusatzparametern von Schut, getestet werden. Da wahrscheinlich nicht alle Verzeichnungseffekte mit globalen Parametern korrigiert werden können, sollen lokale Effekte mit der Finite-Elemente-Methode berücksichtigt werden.

6 Literaturverzeichnis

- BROWN, D. C., 1971: Close-range camera calibration Photogrammetric Engineering 37(8), pp. 855–866
- BROWN, D. C., 1976: The bundle adjustment - Progress and prospects Proc. XIIIth Congress of the ISP, Commission III
- EBNER, H., 1976: Self-calibrating block adjustment Proc. XIIIth Congress of the ISP, Commission III
- EL-HAKIM, S. F. & FAIG, W., 1977: Compensation of systematic image errors using spherical harmonica Proc. of the American Society of Photogrammetry, Fall Technical Meeting, pp. 492 – 499
- GRÜN, A., 1978: Experiences with the self-calibrating bundle adjustment Proc. ACSM-ASP Convention, Washington, D. C.
- HEMMELEB, M., WERITZ, F., MAIERHOFER, C. & SCHIEMENZ, A., 2006: Schadensdiagnose an Bauwerksoberflächen mit multispektralen Methoden DGZfP-Berichtsband 100-CD
- JUHL, J., 1979: Results from Jämijärvi Contributions to the ISP WG III/3 Seminar, pp. 39 – 52
- LERMA, J. L., RUIZ, L. A. & BUCHON, F., 2000: Application of spectral and textural classifications to recognize materials and damages on historic building facades International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. Vol. XXXIII, Part B5, Amsterdam
- MAUELSHAGEN, L., 1977: Teilkalibrierung eines photogrammetrischen Systems mit variabler Passpunktanordnung und unterschiedlichen deterministischen Ansätzen *DGK, Reihe C*, Nr. 236 München
- ROVIRA-MÁS, F., 2010: Sensor Architecture and Task Classification for Agricultural Vehicles and Environments Sensors 10, pp. 11226 – 11247
- SCHUT, G. H., 1978: Selection of additional parameters for bundle adjustments Proc. Symposium of Commission III of the ISP, Moscow
- SEIDL, K., KNOBBE, J. & GRÜGER, H., 2009: Design of an all-reflektive unobscured optical-power zoom objective Applied Optics, 48, pp. 4097 – 4107.
- SEIDL, K., KNOBBE, J., SCHNEIDER, D. & LAKNER, H., 2010: Distortion correction of an all-reflektive unobscured optical-power zoom objective Applied Optics, 49
- SEIDL, K., 2011 Entwicklung eines Systemansatzes für ein Spiegel-Zoomobjektiv mit deformierbaren Elementen Verlag Dr. Hut
- WEIDNER, T., 2004: Auslegung einer multispektralen Kameraanordnung für einen automobilen Einsatz Dissertation Technische Universität Darmstadt

Geometrische Untersuchung zur Tiefengenauigkeit des Kinect-Sensorsystems

JEAN-MARC SCHARES¹, LUDWIG HOEGNER¹ & UWE STILLA¹

Zusammenfassung: Gegenstand dieses Artikels ist die Untersuchung der mit dem Kinect-Sensorsystem aufnehmbaren Punktwolke, insbesondere hinsichtlich der Tiefenauflösung. Die Tiefe wird nach dem Prinzip der Stereotriangulation bestimmt indem ein Infrarotlaser ein intern bekanntes Punktmuster auf die Umgebung projiziert welches von einem Infrarotsensor, in einem festen Abstand zum Laser, aufgenommen wird. Die Tiefengenauigkeit der erzeugten Punktwolke wird dabei durch den schleifenden Schnitt zwischen Musterprojektor und Kamera begrenzt. Zur Bestimmung des Abstands der beiden Ebenen in der Punktwolke wurden drei verschiedene Ebenenschätzungen verglichen, um den Einfluss der Schätzverfahren zu bewerten: Reduktion auf die Tiefenebene mit den meisten Punkten, Mittlere Tiefe aller Punkte und ausgleichende Ebene.

1 Einleitung

Dem Kinect-Sensor von Microsoft liegt als Grundprinzip die Messung der Abweichung eines kontinuierlich projizierten, strukturierten und pseudozufälligen Infrarotlicht-Punktmusters von einer Ebenenprojektion zu Grunde. Der Projektor schickt permanent Infrarotstrahlen in einem bekannten Muster in den Raum. Die Tausenden von einzelnen Lichtstrahlen erscheinen auf dem Körper als Reflexionspunkte. Bewegt sich der Körper wird jeder Lichtstrahl anders reflektiert. Die sich so verändernden Lichtmuster nimmt die Infrarotkamera auf. Ein Chip errechnet daraus 3D-Koordinaten. Obwohl für die Stereotriangulation (ALBERTZ & WIGGENHAGEN, 2009) generell zwei Bilder benötigt werden um die Tiefe eines Punktes zu bestimmen, ist es hier möglich die Tiefeninformation aus einem einzelnen Infrarotbild des Punktmusters zu extrahieren. Dies liegt daran, dass es noch ein zweites virtuelles Bild gibt, neben dem Bild welches die Aufnahme der Punkte durch den Infrarotsensor darstellt. Das zweite nicht sichtbare Bild ist das festgelegte Punktmuster, das der Laser projiziert und fest in die Chiplogik einprogrammiert ist. Die beiden Bilder sind nicht äquivalent, sondern es gibt eine feste Basislinie zwischen Laser und Sensor. Dadurch entsprechen die Bilder unterschiedlichen Kamerapositionen, was es ermöglicht die einzelnen Punkttiefen durch Stereotriangulation zu berechnen. Dabei erleichtert das pseudozufällige Muster das Matching der Punkte, da diese jeweils eine lokal unterschiedliche Nachbarschaft haben. Das Verfahren hat gewisse Ähnlichkeiten mit Sensoren, die „Strukturiertes Licht“ verwenden und ein Raster von regelmäßigen Linien ausstrahlen (WAHL, 1986).

Damit unterscheidet sich die Bestimmung der 3D Koordinaten der projizierten Infrarotpunkte grundsätzlich von Time-Of-Flight (TOF) Kameras, bei denen ein flächenhafter Infrarotlaser und -detektor eine Laufzeitmessung durchführt (WEINMANN et al., 2011).

1) Technische Universität München (TUM) - Fachgebiet Photogrammetrie und Fernerkundung, Arcisstraße 21, 80333 München, E-Mail: pf@bv.tum.de

Im folgenden soll die zu erwartende Tiefengenauigkeit des Kinect-Sensors anhand von Messungen überprüft werden. Dabei soll zuerst auf die genauen technischen Spezifikationen eingegangen werden, aus denen sich die theoretisch zu erwartenden Vergleichswerte ergeben.

2 Technische Grundlagen des Kinect-Sensors

In den drei Schöffnungen der Kinect befinden sich eine normale Farbkamera, sowie Infrarotprojektor und Infrarotkamera. Der Infrarotprojektor sendet ein pseudozufälliges Punktmuster aus, das von der Infrarotkamera beobachtet wird. Die Stereobasis für die 3D Rekonstruktion wird dabei durch den Abstand zwischen Infrarotprojektor und Infrarotkamera festgelegt. Die Abweichung des von der Infrarotkamera beobachteten Musters vom bekannten Muster des Infrarotprojektors erlaubt die Rekonstruktion der 3D Koordinaten der projizierten Punkte. Daraus ergibt sich die theoretisch erzielbare Tiefengenauigkeit der projizierten Infrarotpunkte. Die technischen Daten der Infrarotkamera sind in Tabelle 1 aufgelistet. Der Detektor selber hat eine Auflösung von 1200x960 Pixeln, für die Weiterverarbeitung wird diese Auflösung auf 640x480 Pixel reduziert. Das Sichtfeld beträgt 57° horizontal, 43° vertikal, die Stereobasis zwischen Infrarotprojektor und -kamera ca. 7,5 cm.

Der Infrarotprojektor erzeugt ein pseudozufälliges Muster von Infrarotpunkten im Raum. In Abbildung 1a ist das gesamte Muster zu sehen, charakteristische Besonderheiten wurden hervorgehoben.

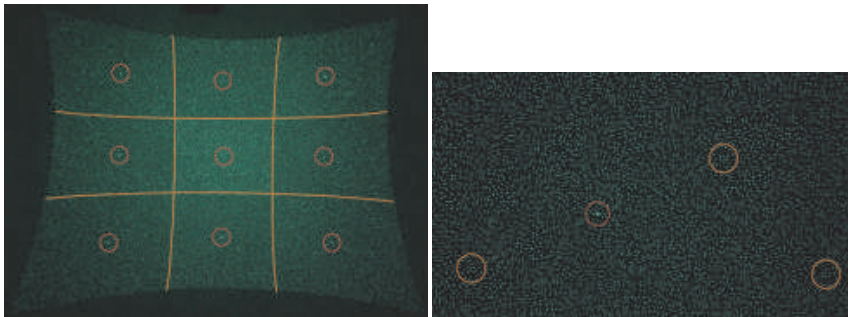


Abb. 1: a) links: Infrarotmuster des Kinect Projektors, b) rechts: Referenzmarken im Infrarotmuster

Die kissenförmige Verzeichnung hat ihren Ursprung in dem Aufsatz, der den Laserstrahl in das Punktmuster verwandelt. In der Mitte ist ein helleres Rechteck zu sehen, welches einen Teil des neunfach wiederholten untergeordneten Musters darstellt. Da es sich um neunmal dasselbe Muster handelt ist auch überall in der Mitte ein hellerer Punkt vorhanden. In einer Vergrößerung des Musters (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**1b) ist wiederholt auftretend eine Art Referenzmarke (orange umkreist) zu erkennen. Diese wird zur Lokalisierung

von Ausschnitten aus dem Punktmuster bei der Projektion in den 3D-Raum genutzt, da sie sich gut von ihrer Umgebung unterscheiden lässt.

Bei einer noch näheren Betrachtung (Abb. 2) treten zwischen den eigentlichen Punkten und über das Muster hinaus noch weitere, sehr schwach erleuchtete Punkte in Erscheinung. Diese werden vom Infrarotsensor aber nicht erkannt und sind ein Nebeneffekt aus der Erzeugung des Punktmusters aus dem Laserstrahl. Gemäß einem Patentantrag von PrimeSense (SHPUNT, 2009) befinden sich dafür zwei optische Diffraktionsgitter vor dem Laser. Dadurch wird zuerst ein regelmäßiges orthogonales Raster von Punkten erzeugt von welchem dann nur die hell leuchtenden Punkte durchgelassen werden, um eines der neun Untermuster zu erzeugen. Durchschnittlich ist einer von neun Punkten aus dem regelmäßigen Raster hell (REICHINGER, 2011), wobei keine zwei hellen Punkte direkt aneinander liegen bezüglich Achter-Nachbarschaft.

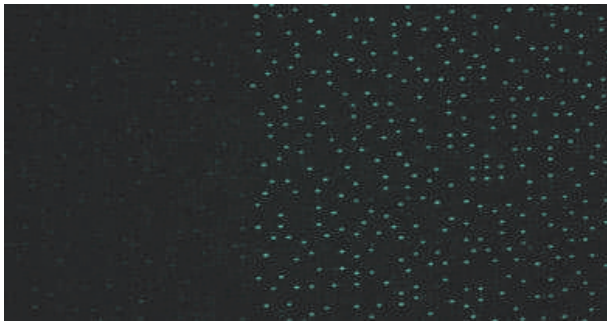


Abb. 2: Regelmäßiges orthogonales Punktraaster als Basis des Punktmusters

3 Untersuchungen

3.1 Auflösung des Infrarotmusters

Bei diesem Versuch wurde die Auflösung der Infrarotpunkte aus dem projizierten Muster mit der Auflösung der daraus entstehenden 3D-Punktwolke verglichen. Dafür wurde eine definierte Oberfläche aus Entfernungen von einem bis sieben Metern aufgenommen. In Abbildung 3 sind die Infrarotmuster (links) und die entsprechenden Punktwolken (rechts) zu sehen. Erkennbar sind die abnehmende Punktdichte mit zunehmender Entfernung und die höhere Anzahl an Punkten in der Punktwolke gegenüber dem Infrarotmuster.

Diese höhere Dichte entsteht durch Interpolation eines regelmäßigen Gitters aus den bestimmten 3D Koordinaten der Infrarotpunkte. Diese Interpolation führt dazu, dass an Tiefensprüngen Ausfransungen entstehen und Kanten nicht scharf abgebildet werden oder in einer Bildsequenz flackern. Tabelle 1 zeigt die Punktdichte der 3D Messpunkte und der interpolierten Punktwolke abhängig vom Abstand zum Sensor.

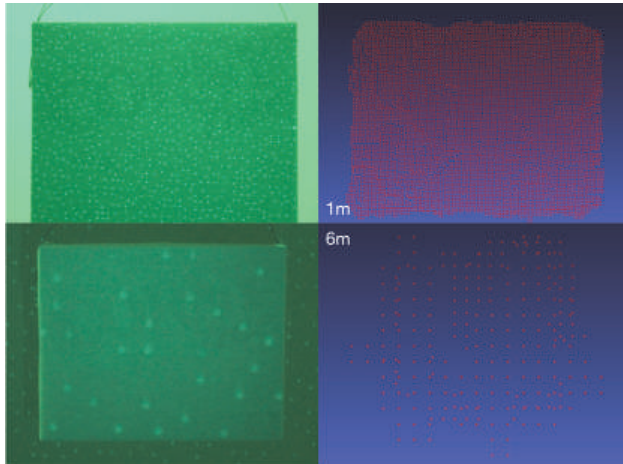


Abb. 3: Infrarotpunkte und Punktwolke der aufgenommenen Oberfläche

Tab. 1: Auflösung des IR Punktmusters und der interpolierten Punktwolke abhängig von der Entfernung zum Sensor

Distanz [m]	3D Punkte	IR Punkte	3D/IR	3D/cm ²	IR/cm ²	IR/dm ²
1	7417	811	9,15	28,07	3,07	306,89
2	2092	248	8,44	7,92	0,94	93,85
3	887	112	7,92	3,36	0,42	42,38
4	526	64	8,22	1,99	0,24	24,22
5	357	43	8,30	1,35	0,16	16,27
6	240	29	8,28	0,91	0,11	10,97
7	219	19	11,53	0,83	0,07	7,19

3.2 Auflösung der Punktwolke

Für die folgenden Untersuchungen wurde eine fixe Konstruktion von zwei parallelen Ebenen mit einem Abstand von 18,2 cm in Abständen von 0,5-8 Meter zum Sensor aufgestellt und die jeweilige Punktwolke abgespeichert. Die Ebenen wurden dabei möglichst senkrecht zum horizontal blickenden Sensor ausgerichtet. In den einzelnen Aufnahmen wurden die zwei Ebenen zur weiteren Analyse ausgeschnitten, wobei nicht die komplette Fläche behalten wurde, da an den Rändern eine Verwischung mit den Seitenwänden und dem Boden erfolgte. Die eigentlich flachen Ebenen werden mit zunehmender Entfernung vom Sensor auf Tiefenebenen in immer größeren Abständen aufgeteilt. Ab etwa sechs Metern sind die einzelnen Ebenen fast nicht mehr voneinander zu unterscheiden.

Für die Analyse der Genauigkeiten wurden folgende Werte untersucht: und in Tabelle 3 aufgelistet:

- Auflösung – Tiefe: Abstand zwischen den parallelen Tiefenebenen in Blickrichtung der Kinect.
- Auflösung – Quer: Abstand zwischen Punkten quer zur Blickrichtung. Manuell an mehreren Stellen in Höhe und Breite in MeshLab gemessen.
- Auflösung – Theor.: Theoretischer Wert für die Querauflösung in den verschiedenen Aufstellweiten.
- Spanne: Tiefenbereich über den sich die eigentlich flache Ebene erstreckt.
- max. Punkte + Δ : Absoluter Wert der Tiefenebene der Punktwolke welche die meisten Punkte der ausgeschnittenen Fläche enthält + deren Differenz (Soll: 0,182 m)
- Mittelw. + Δ : Mittelwert der Tiefenwerte aller Punkte der ausgeschnittenen Fläche + deren Differenz (Soll: 0,182 m)
- Ausgleichende Ebene – σ : Standardabweichung der ausgeschnittenen Punkte von deren ausgleichenden Ebene. Abhängig davon auf welche Tiefenebenen (Anzahl, Distanz) die Fläche verteilt ist.
- Ausgleichende Ebene – $N_x + N_y + N_z$: Normalenvektor der ausgleichenden Ebene. N_z ist in Blickrichtung des Sensors, N_y quer dazu horizontal und N_x lotrecht.
- Ausgleichende Ebene – $D + \emptyset$: Entfernung einer Ebene der Konstruktion zur anderen + deren Mittelwert (Soll: 0,182 m).
- Ausgleichende Ebene – Winkel: Winkel zwischen den Normalen der beiden Ebenen der Konstruktion (Soll: 0°). Tendenziell wird der Wert mit dem Abstand schlechter, hängt aber auch zufällig davon ab wie die Punkte auf die Tiefenebenen verteilt sind.

Der theoretische Wert für die Querauflösung in den verschiedenen Aufstellweiten kann berechnet werden über den Öffnungswinkel (hier 57°), die Bildbreite und die Entfernung d. Sie ergibt sich damit aus der Formel:

$$2 * d * \tan\left(\frac{57^\circ}{2}\right) * \frac{1}{640} \left[\frac{m}{pixel} \right] \quad (1)$$

Die theoretische Tiefenaufklärung lässt sich aus der Stereotriangulation über die Winkelaufklärung zwischen Infrarotprojektor und Infrarotkamera:

$$\alpha = \frac{57^\circ}{640 px} = 0,089^\circ / px \quad (2)$$

Diese deckt in verschiedenen Tiefen entlang der Blickrichtung unterschiedliche Abstände ab, die im Endeffekt in einem Pixel abgebildet werden. Im rechtwinkligen Dreieck wird zuerst der untere Winkel für Tiefen von 1-8 Metern berechnet. Auf diesen wird die Winkelaufklärung addiert und daraus die neue Tiefe hergeleitet, von welcher die Anfangstiefe abgezogen wird, um den Abdeckungsbereich entlang der Sichtachse zu erhalten.

Die Distanz zwischen den beiden Ebenen des Testkörpers wurde mit drei verschiedenen Methoden ermittelt. Für jede ausgeschnittene Fläche wurden die Tiefenebene mit der höchsten Anzahl an Punkten und der Mittelwert der Punkttiefen bestimmt. Als dritte Methode wurde für jede Fläche eine ausgleichende Ebene berechnet. Zwischen den zwei Platten der Konstruktion wurde dann an jedem Aufstellort der Abstand berechnet. Dabei wurde angenommen, dass die Flächen annähernd parallel sind, aber versetzt. Zur Bestimmung der Distanz wurde der Vektor

zwischen den Schwerpunkten auf beide Normalvektoren projiziert. Die Längen dieser entstandenen Vektoren wurden gemittelt um die letztendliche Datenreihe zu erhalten.

4 Ergebnisse

4.1 Quer- und Tiefenauflösung

Aus der Auswertung der Testergebnisse (Tab. 2) ergeben sich eine Reihe von Aussagen. Die Querauflösung steigt linear an bis auf 1,5 cm in 8 Meter Entfernung (Abb.4a). In der Tiefe wächst die Auflösung immer schneller bis auf 20 cm. Dabei stimmt die gemessene Querauflösung mit der theoretischen gut überein (Abb. 4b) und bestätigt den Zusammenhang zwischen der Punktwolke und dem flachen Tiefenbild. In Orange wurde die Tiefenauflösung relativ mit der Spanne verglichen, also dem Tiefenbereich über den sich eine ausgeschnittene Fläche erstreckt. Unter Berücksichtigung der zwei unterschiedlichen Achsen liegt die Tiefenauflösung im Streubereich der Spanne, aus welcher sich ablesen lässt, dass eine flache Ebene sich bei 8 Metern über eine Tiefe von 50 cm erstreckt. Der Zusammenhang zwischen der Winkelauflösung und der Tiefenauflösung ist in Abbildung 4c dargestellt.

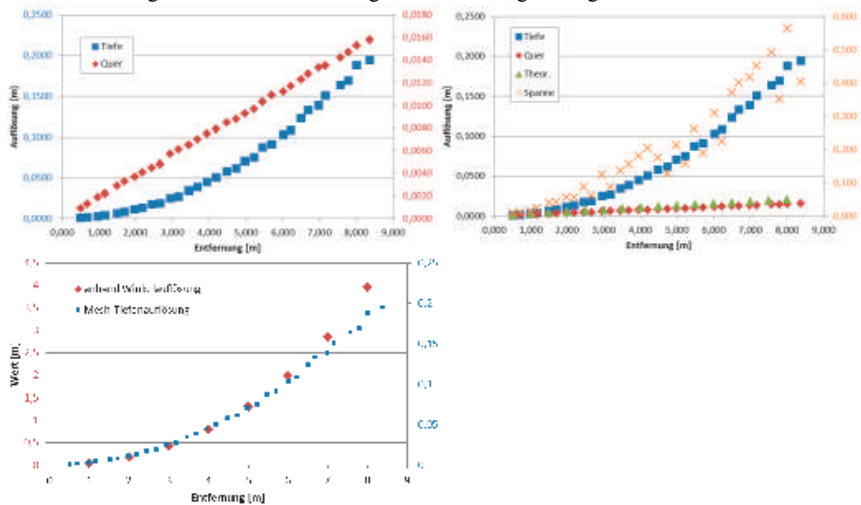


Abb. 4: a) links: Auflösung quer und in der Tiefe, b) rechts: Auflösung mit Streuung und theoretischer Genauigkeit, c) links unten: Zusammenhang Winkelauflösung und Tiefenauflösung

4.2 Distanzgenauigkeit paralleler Ebenen

Die drei Methoden zur Berechnung der Distanz zwischen den beiden parallelen Ebenen der Konstruktion in der Punktwolke sind in Abbildung 5 dargestellt. Die orangene Linie zeigt den realen Wert von 18,2 cm. Die besten Ergebnisse werden auf den ersten Metern der Entfernung

bei der Berechnung des Abstands mit den ausgleichenden Ebenen erzielt, mit Abweichungen unterhalb von einem Zentimeter. Die andern beiden Datenreihen verhalten sich relativ ähnlich, da sie durch die Verteilung der Flächen auf die Tiefenebenen in immer größeren Abständen beeinflusst werden. So wie dieser Abstand steigt auch die bestimmte Distanz langsam an, bis in weiterer Entfernung eine Streuung der Daten auftritt. Die Abstände vom Sollmaß hängen auch von der Tiefenauflösung in der jeweiligen Entfernung ab, also der Distanz zwischen zwei parallelen Tiefenebenen. Auch wenn die ausgleichenden Ebenen zu anfangs die besten Ergebnisse liefern, so werden diese bei größerer Entfernung doch unbrauchbar. Das liegt unter anderem daran, dass die zwei Platten zwischen denen der Abstand bestimmt wird irgendwann teilweise auf dieselben Tiefenebenen abgebildet werden, wie auch in Abbildung 6 zu sehen ist. Demnach spielt der Blickwinkel zwischen Sensor und Fläche eine wichtige Rolle für die ausgegebene Punktwolke. Die Charakteristik der Tiefenebenen ist der wichtigste Einflussfaktor auf die Aufnahmen.

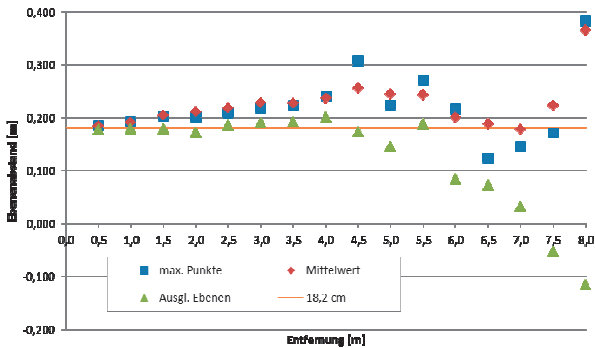


Abb. 5: Vergleich der Methoden zur Distanzbestimmung

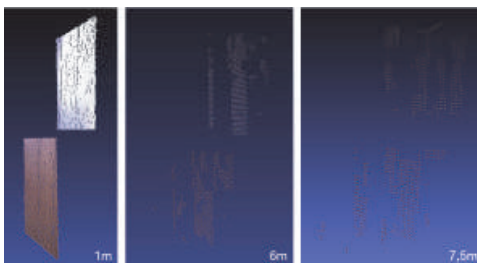


Abb. 6: Punktwolken der Ebenen in verschiedenen Entfernungen

Tab. 2: Daten zur Auflösung der Punktwolke und Distanzgenauigkeit

Distanz [m]	Auflösung [m]				Anzahl Punkte	Sparma [m]	max. Punktabw. [m]	Δ [m]	Mittlere [m]	Δ [m]	Ausgleichende Ebene						
	Mesh	Tiefe	Quer	Theor.							σ [m]	Nx	Ny	Nz	D [m]	σ [m]	Winkel [°]
0,5	0500v	0,0010	0,0009	0,0013	50658	0,009	0,508	0,185	0,500	0,183	0,001	0,006	0,016	1,000	0,179	0,178	0,548
	0500h	0,0013	0,0013		34873	0,011	0,693		0,692		0,001	0,004	0,025	1,000	0,177		
1,0	1000v	0,0027	0,0019	0,0026	31655	0,018	0,980	0,193	0,980	0,191	0,002	-0,011	0,021	1,000	0,181	0,179	0,521
	1000h	0,0040	0,0022		24575	0,024	1,173		1,171		0,003	-0,016	0,029	0,999	0,177		
1,5	1500v	0,0065	0,0029	0,0039	13655	0,030	1,512	0,203	1,508	0,204	0,004	-0,037	0,053	0,998	0,175	0,180	1,044
	1500h	0,0089	0,0033		12840	0,042	1,715		1,712		0,005	-0,031	0,036	0,999	0,185		
2,0	2000v	0,0112	0,0037	0,0052	8400	0,056	1,992	0,202	1,978	0,211	0,008	-0,024	0,103	0,994	0,156	0,172	4,086
	2000h	0,0132	0,0041		7669	0,055	2,194		2,189		0,009	0,014	0,045	0,999	0,189		
2,5	2500v	0,0174	0,0045	0,0066	4790	0,087	2,480	0,209	2,456	0,218	0,012	-0,031	0,092	0,995	0,168	0,186	4,540
	2500h	0,0190	0,0048		5211	0,061	2,689		2,674		0,012	0,015	0,028	1,000	0,204		
3,0	3000v	0,0248	0,0057	0,0079	3640	0,124	2,967	0,219	2,948	0,228	0,019	-0,132	0,127	0,983	0,153	0,190	13,136
	3000h	0,0270	0,0061		3292	0,087	3,186		3,176		0,014	0,060	0,003	0,998	0,227		
3,5	3500v	0,0342	0,0065	0,0092	2198	0,137	3,475	0,223	3,459	0,227	0,018	-0,077	0,100	0,992	0,172	0,192	6,006
	3500h	0,0388	0,0070		2600	0,155	3,698		3,686		0,027	-0,001	0,028	1,000	0,212		
4,0	4000v	0,0459	0,0075	0,0105	1880	0,181	3,952	0,240	3,953	0,237	0,019	0,062	0,090	0,994	0,189	0,201	4,813
	4000h	0,0508	0,0079		2067	0,200	4,192		4,190		0,031	0,134	0,047	0,990	0,213		
4,5	4500v	0,0589	0,0085	0,0118	1477	0,175	4,463	0,308	4,462	0,256	0,027	0,031	0,230	0,973	0,129	0,174	9,865
	4500h	0,0617	0,0088		1566	0,128	4,771		4,738		0,035	0,100	0,074	0,992	0,219		
5,0	5000v	0,0707	0,0093	0,0131	1204	0,212	4,977	0,225	4,979	0,245	0,033	-0,091	0,245	0,965	0,103	0,146	34,725
	5000h	0,0750	0,0097		1017	0,157	5,202		5,223		0,047	0,477	0,087	0,874	0,158		
5,5	5500v	0,0879	0,0103	0,0144	921	0,262	5,448	0,271	5,460	0,244	0,022	0,069	0,158	0,985	0,156	0,189	20,567
	5500h	0,0910	0,0100		990	0,189	5,719		5,704		0,029	0,398	0,035	0,917	0,221		
6,0	6000v	0,1090	0,0112	0,0157	877	0,309	6,018	0,217	6,027	0,201	0,040	0,406	0,280	0,870	0,043	0,085	17,343
	6000h	0,1083	0,0117		800	0,225	6,235		6,228		0,039	0,634	0,112	0,765	0,126		
6,5	6500v	0,1257	0,0123	0,0171	895	0,371	6,468	0,124	6,499	0,189	0,047	0,710	0,166	0,685	0,070	0,073	14,701
	6500h	0,1333	0,0128		688	0,400	6,592		6,608		0,045	0,885	0,095	0,492	0,077		
7,0	7000v	0,1390	0,0133	0,0184	514	0,417	6,902	0,145	6,998	0,178	0,048	0,807	0,232	0,544	-0,010	0,033	9,681
	7000h	0,1507	0,0135		552	0,452	7,137		7,164		0,052	0,758	0,108	0,646	0,078		
7,5	7500v	0,1640	0,0142	0,0197	411	0,492	7,608	0,171	7,570	0,224	0,054	0,895	0,218	0,389	-0,011	-0,052	166,984
	7500h	0,1693	0,0147		399	0,351	7,779		7,794		0,044	-0,944	-0,005	-0,329	-0,094		
8,0	8000v	0,1880	0,0153	0,0210	400	0,564	7,959	0,384	8,006	0,385	0,057	-0,944	-0,034	-0,329	-0,135	-0,116	4,543
	8000h	0,1947	0,0156		410	0,404	8,343		8,372		0,049	-0,934	-0,112	-0,308	-0,096		

5 Ausblick

Aus geodätischer Sicht ist der Kinect-Sensor sicherlich durch die schnelle, einfache und günstige Aufnahme von 3D-Daten interessant. Er ist nur im Nahbereich, am besten unterhalb fünf Metern, einsetzbar und bietet im Vergleich zu anderen Verfahren nur eine recht beschränkte Genauigkeit die aber bei der Verarbeitung in der Software noch einiges an Steigerungspotential bietet, etwa durch Verknüpfung von und in Punktwolke und Textur.

In der Gegenüberstellung ermöglicht das Laserscanning eine deutlich höhere Genauigkeit und Reichweite. Die Kinect ermöglicht ein komplettes Tiefenbild mit 30 Hz und somit die Aufnahme eines Raumausschnitts in Echtzeit.

Verglichen mit der Stereophotogrammetrie hat der Kinect-Sensor den Vorteil, dass für die Bestimmung der Tiefe keine korrespondierenden Punkte im Farbbild benötigt werden.

Im Vergleich mit einer Time-Of-Flight Kamera bleibt die Tiefengenauigkeit auf Grund des unterschiedlichen Messverfahrens deutlich zurück.

Die Kinect deckt als Sensor also ein spezielles Gebiet ab bezüglich Anforderungen und Anwendungen, könnte sich aber zwischen anderen Verfahren etablieren etwa bei der Erstellung von Innenraummodellen oder der Aufnahme von Gegenständen, bei denen die Ansprüche an die Tiefengenauigkeit nicht zu hoch werden, nicht zuletzt wegen dem günstigen Anschaffungspreis und der leichten Handhabung bei entsprechenden Programmen.

6 Literaturverzeichnis

- ALBERTZ, J. & WIGGENHAGEN, M., 2009: Taschenbuch der Photogrammetrie und Fernerkundung, Wichmann, Heidelberg. ISBN 978-3-87907-384-9
- REICHINGER, A., 2011: Kinect Pattern Uncovered. Blog.
<http://azttm.wordpress.com/2011/04/03/kinect-pattern-uncovered/>
- SHPUNT, A., 2009: Optical Designs for Zero Order Reduction. Assignee: Prime Sense Ltd. (Tel Aviv, IL). United States Patent Application 20090185274.
<http://www.freepatentsonline.com/y2009/0185274.html>
- WAHL, F.M., 1986: A coded light approach for depth map acquisition. In Hartmann (ed.): Mustererkennung 1986, Springer Verlag, Berlin, S. 12-17.
- WEINMANN, M., WURSTHORN, S. & JUTZI, B., 2011: Semi-automatic image-based co-registration of range imaging data with different characteristics. PIA11 - Photogrammetric Image Analysis. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science. **38(3)** / W22, S. 119-124.

Automatisches Texture Mapping von 3D-Modellen in Architektur und Archäologie

DIRK STALLMANN¹ & THOMAS P. KERSTEN²

Zusammenfassung: Detaillierte, vollständige und genaue 3D-Modelle mit foto-realistischen Texturen werden heute auch zunehmend für zahlreiche Anwendungen in der Architektur und in der Archäologie nachgefragt. Da eine manuelle Texturierung eines 3D-Modells durch digitale Bilddaten mit Softwarepaketen wie Cinema 4D, 3D Studio oder Maya heute immer noch einen aufwendigen Arbeitsweg darstellt, sind Verfahren zur automatischen Texturierung von 3D-Modellen sehr gefragt. In diesem Beitrag werden zwei automatische Verfahren vorgestellt, mit denen einerseits mit Hilfe von Webservices 3D-Oberflächenmodelle mit Texturen hergestellt und andererseits bereits existierende 3D-Modelle mit tmapper, einer in der Programmiersprache C++ entwickelten Software auf Grundlage des Multi-Layer 3D Image (ML3DImage) Algorithmus, texturiert werden. Die Untersuchungen anhand von Beispieldaten zeigen, dass Selbstverdeckungen im 3D-Modell vorhanden sind und die Sichtbarkeitsanalyse im ML3DImage Algorithmus nicht ausreicht, um akzeptable Ergebnisse der automatischen Texturierung zu erzielen. Zur Lösung des Sichtbarkeitsproblems und der korrekten perspektivischen Entzerrung der verwendeten Texturen soll zukünftig der Point Cloud Painter Algorithmus mit dem Z-Puffer-Verfahren, ein bekanntes Verfahren aus der Computergraphik, kombiniert werden.

1 Einleitung

Die Visualisierung von 3D-Objekten gewinnt zunehmend an Bedeutung, da sowohl die 3D-Aufnahmetechnologien wie Photogrammetrie und Laserscanning effizienter, als auch die Anwendung und Entwicklung von computergestützten Animationstechniken und die Computertechnologie immer leistungsfähiger werden. In der 3D-Computergraphik existieren mittlerweile zahlreiche Verfahren, um dreidimensionale Objekte möglichst als foto-realistisches Bild des erstellten Modelles darzustellen. Das abzubildende Objekt liegt als 3D-Oberflächenmodell in Form einer Dreieckszerlegung und/oder in Form geometrischer Primitive (Geraden, Ebenen, Zylinder, etc.) vor (LUHMANN 2010). Die Überlagerung eines Objekts mit einer foto-realistischen oder synthetischen (künstlichen) Textur zur Darstellung dreidimensionaler Räume/Objekte nennt man Texturierung (engl. Texture Mapping). Dabei ist ein Texturbild ein digitales Bild (Foto), dessen Muster wie bei einer Diaprojektion dem Objekt (dem einzelnen Dreieck) überlagert bzw. drauf projiziert wird. So eine Texturierung ermöglicht je nach Auflösung der verwendeten Texturen auch weniger detailreiche 3D-Modelle realistisch darzustellen (BOLLMANN & KOCH 2002).

Die Texturierung kann dabei manuell oder automatisch erfolgen (KADA 2007). Bei der manuellen Texturierung werden die Texturen mit Softwarepaketen wie Maxon Cinema 4D, Autodesk 3Ds Max oder Maya durch den Anwender interaktiv auf die Oberflächenelemente bzw. Dreiecke gelegt. Dagegen erfolgt eine automatische Texturierung eines 3D-Modells, in dem die natürliche Oberflächentextur eines räumlich orientierten Messbildes überlagert und der Bezug zu dem Ausgabebild über die photogrammetrischen Abbildungsgleichungen her-

¹ New Class Consulting Ltd., 8A Chanion Street, 8027 Paphos, Cyprus, E-Mail: dsv2a001@googlemail.com

² Hafencity Universität Hamburg, Labor für Photogrammetrie & Laserscanning, Hebebrandstrasse 1, 22297 Hamburg, E-Mail: Thomas.Kersten@hcu-hamburg.de

gestellt wird. Die automatische Methode setzt voraus, dass die innere und äußere Orientierung aller verwendeten Bilder bekannt ist und dass die Geometrie der 3D-Objekte durch unregelmäßige räumliche Dreiecksnetze dargestellt wird. Um höchste geometrische Präzision für das Texture Mapping der 3D-Modelle zu erreichen, werden die mathematischen Kameramodelle aus der photogrammetrischen Bündelausgleichung auch für die Texturierung verwendet.

In diesem Beitrag werden neben der manuellen Texturierung (Kap. 2) automatische Verfahren vorgestellt, mit denen einerseits texturierte 3D-Oberflächenmodelle durch Verfahren der Computer Vision und Photogrammetrie mit Webservices hergestellt (Kap. 3) und andererseits bereits existierende 3D-Modelle durch orientierte Bilddaten einer kalibrierten Kamera mit tmapper, einer in der Programmiersprache C++ entwickelten Software auf Grundlage des Multi-Layer 3D Image (ML3DImage) Algorithmus, texturiert werden (Kap. 4). Ergebnisse und Probleme der durch tmapper automatisch texturierten Modelle werden in Kap. 5 vorgestellt.

2 Manuelle Texturierung von 3D-Modellen

Die manuelle Texturierung von 3D-Modellen (z.B. CAD-Volumenmodelle) ist eine zeit- und kostenintensive Arbeit, die allerdings qualitativ sehr hochwertige, ansehnliche Resultate liefert, wenn professionelle Softwarepakete wie Autodesk 3ds Max, Autodesk Maya oder Maxon Cinema 4D eingesetzt werden (Abb. 1). Als Ergebnisse können foto-realistische Ansichten, Animationen oder Videos ausgegeben werden, in dem aus dem virtuellen 3D-Modell viele perspektivische 2D-Ansichtsbilder entlang eines vordefinierten Kamerapfades berechnet werden. Die Generierung eines Bildes aus der 3D-Szene nennt man in der Computergraphik rendern. Beim Rendern erfolgt aus Sicht der virtuellen Kamera eine Berechnung der sichtbaren Objekte und des Aussehens der Objektoberflächen unter Verwendung von Materialeigenschaften und Lichtquellen. Der Grad der Bildqualität und der physikalischen Korrektheit beeinflusst die Rechenzeit für das Rendern. Abb. 1 zeigt Ergebnisse der manuellen Texturierung von CAD-Modellen mit 3ds, Maya und Cinema 4D. Vor der Texturierung wird das Objektteil, das eine Textur erhalten soll, ausgewählt und ggf. noch weiter unterteilt, um je nach Auflösung die Texturen eindeutig zuweisen zu können. Aus den verfügbaren Fotos wird die entsprechende Textur mit einer Bildbearbeitungssoftware ausgeschnitten und entzerrt, bevor es auf den Objektteil projiziert wird.



Abb. 1: v.l.n.r. Niendorfer Kirche als CAD-Modell und als Visualisierung mit 3ds Max, Kaiserdom Königslutter (mit Maya) und Leuchtturm Neuwerk (mit Cinema 4D)

Eine weitere Möglichkeit zur Texturierung von 3D-Modellen bietet u.a. die Software Geomagic. Dabei werden in dem vermaschten 3D-Oberflächenmodell und auch in dem Bild, das als Textur verwendet wird, interaktiv identische Punkte gemessen, über die anschließend die Textur auf das Objekt transformiert wird. In Abb. 2 ist das texturierte 3D-Gebäudemodell der Festung Kristiansten in Trondheim dargestellt. Das Gebäude wurde mit einem terrestrischen

Laserscanner Riegl VZ-400 gescannt und anschließend wurden die registrierten Scans zu einem 3D-Modell (bestehend aus 2.954.935 Dreiecken) vermascht und texturiert.



Abb. 2: Verschiedene Ansichten des Kristiansten Festungsgebäudes in Trondheim – Aufnahme durch Riegl VZ-400, Dreiecksvermaschung und Texturierung mit Geomagic

3 Automatische Erstellung von 3D-Modellen mit Texturen

Seit einigen Jahren gibt es eine große Anzahl von günstigen und leistungsfähigen Kameras (8-20 MPixel) auf dem Markt, die mit entsprechenden Algorithmen wie Structure from Motion oder Dense Image Matching effizient dichte 3D-Punktwolken und 3D-Modelle aus Bildsequenzen erzeugen. Diese Systeme werden erfolgreich für die Aufnahme und Rekonstruktion verschieden großer Objekte eingesetzt und sie stellen heute bereits Alternativen zu klassischen Messsystemen und Auswertemethoden dar. KERSTEN et al. (2012) stellen praktische Untersuchungen vor, bei denen Ergebnisse von dem Softwarepaket Bundler/PMVS2 (open source Software von der Universität von Washington) und dem Autodesk Webservice Photofly/123D Catch Beta mit Ergebnissen vom terrestrischen Laserscanning verglichen wurden. Dabei wurde festgestellt, dass die geometrischen Differenzen zwischen den bild- und distanzbasierten Systemen bei der Modellierung von Oberflächenmodellen nicht sehr groß sind. Allerdings konnte man auch schlussfolgern, dass die bild-basierten Systeme bei großen Objekten wie z.B. Gebäuden Probleme hatten, geometrisch korrekte Ergebnisse zu erzielen. Ansprechend gute visuelle 3D-Modelle konnten mit dem Webservice von Autodesk erzielt werden, wenn die Objekte rundliche Formen aufweisen und nicht sehr groß sind. Die Skalierung dieser generierten 3D-Modelle erfolgt über einen Maßstab, der bei der Aufnahme in den Objektraum platziert wird, oder über Passpunkte. Abb. 3 zeigt texturierte Oberflächenmodelle, die mit Photofly/123D Catch Beta generiert wurden.



Abb. 3: Texturierte 3D-Oberflächenmodelle – Rückfassade vom Torhaus in Jersbek (links), Moai Vaihu (Mitte) und eine Schildkröte als Petroglyphe auf der Osterinsel (rechts)

4 Automatische Texturierung von 3D-Modellen

Für die automatische Texturierung verschieden großer 3D-Modelle als Anwendungen in Architektur und Archäologie wird die Software tmapper in der Programmiersprache C++ entwickelt. Grundlage dieser Softwareentwicklung sind die folgenden drei Methoden, die von ABDELHAFIZ (2009) in seiner Dissertation für die automatische Texturierung vorgeschlagen wurden:

1. Der Point Cloud Painter (PCP) für die Detektion von Fremdverdeckung durch Vergleich der Farben in korrespondierenden Bildregionen,
2. der Multi-Layer 3D Image (ML3DImage) Algorithmus für die automatische Texturierung und
3. der Photo Occlusion Finder (POF) als Kombination der beiden vorher erwähnten Methoden.

Für die Anwendung der oben aufgeführten Algorithmen müssen folgende Voraussetzungen erfüllt sein:

- Das 3D-Modell muss als ein unregelmäßiges Dreiecksnetz vorliegen.
- Die innere und äußere Orientierung der zu verwendenden Bilder muss mit ausreichender Genauigkeit bekannt sein.
- Das 3D-Modell und die Orientierung der dazugehörigen Bilder müssen sich auf dasselbe Koordinatensystem beziehen.

Abb. 4 zeigt das vermaschte 3D-Oberflächenmodell vom Almaqah-Tempel in Sirwah (Republik Jemen). Der Tempel wurde im Februar 2007 mit dem terrestrischen Laserscanner Trimble GS100 und der digitalen Spiegelreflexkamera Fujifilm Fine Pix S2 Pro (28 mm Objektiv) aufgenommen, in Geomagic modelliert (LINDSTAEDT et al. 2008) und anschließend durch den Multi-Layer 3D Image (ML3DImage) Algorithmus automatisch texturiert (ABDELHAFIZ (2009)).

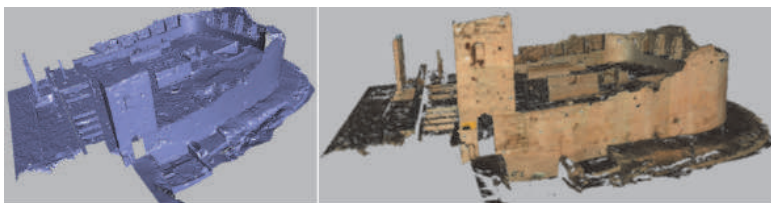


Abb. 4: Vermaschtes 3D-Oberflächenmodell vom Almaqah-Tempel in Sirwah/Jemen (links) – automatisch texturiertes 3D-Modell (rechts) (ABDELHAFIZ 2009)

Als Datengrundlage dient das Dreiecksnetz des jeweiligen Objektes, welches entweder von einer Oberflächenvermaschung (3D-Triangulation) oder von einer 3D-CAD-Konstruktion (Flächen- oder Volumenmodell) kommt. Die 3D-Aufnahmemethoden sind dafür in erster Linie terrestrisches Laserscanning, Streifenprojektion (für kleinere Objekte) und/oder photogrammetrische Verfahren, die separat oder in Kombination eingesetzt werden können. In eher seltenen Fällen werden auch Totalstationen als 3D-Erfassungsmethode für größere und einfache Objekte eingesetzt. Die Oberflächenvermaschung erfolgt durch die Triangulation von 3D-Punktwolken, die wiederum durch Messungen eines Laserscanners oder Dense Image Matching in Bilddaten (siehe auch KERSTEN et al. 2012) generiert werden (siehe Abb. 5a links). Objekte können auch aus 3D-Punktwolken oder durch diskrete photogrammetrische Punktmessungen in Stereobildern oder in mehreren Bildern im CAD konstruiert werden (KERSTEN 2006). Aus dem verwendeten CAD-Konstruktionsmodell wird ein Dreiecksnetz

abgeleitet, in dem die Daten vom AutoCAD-Format DWG z.B. durch die Software 3ds Max in ein anderes Format konvertiert werden. Das resultierende Dreiecksnetz besteht aus unterschiedlich großen Dreiecken, die auch partiell verdeckt sein können (Abb. 5a).

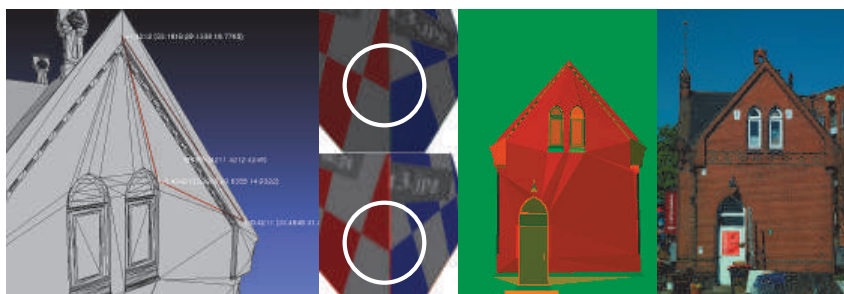


Abb. 5: a) Dreiecksnetz aus einem CAD-Modell (links); b) Affine Entzerrung (oben) und projektive (korrekte) Entzerrung (unten) synthetischer Daten im Vergleich; c) Bestimmung der Selbstverdeckung durch Strahlverfolgung (Mitte) und korrespondierendes Originalbild (rechts)

Als weitere Eingabedaten für tmapper dienen neben dem Dreiecksnetz des Objektes die digitalen Bilddaten (JPG-Format) und die Orientierungsparameter der Bilder. Die Orientierungsparameter werden üblicherweise in einer Bündelausgleichung mit Selbstkalibrierung bestimmt. Die photogrammetrischen Abbildungsmodelle der Bündelblockausgleichungsprogramme Pictran-B (Technet GmbH) und PHIDIAS (PHOCAD GmbH) sind im Programm tmapper implementiert, d.h. die Ergebnisse der Programme können unmittelbar übernommen werden.

Der im Programm tmapper implementierte ML3DImage-Algorithmus führt die Texturierung in zwei Schritten durch. Im ersten Schritt wird die Selbstverdeckung von Objektteilen bzw. von Dreiecken bestimmt (Sichtbarkeitsanalyse der Selbstverdeckung). Dazu werden die Eckpunkte (Knoten) des Dreiecksnetzes mit der bekannten Bildorientierung anhand der Kollinearitätsgleichungen in das Bild projiziert. Dadurch werden Strahlen im Raum definiert, während die Dreiecksflächen ihrerseits Ebenen im Raum definieren. Der Schnitt eines Strahls mit einer Ebene wird berechnet. Liegt der Schnittpunkt innerhalb eines Dreiecks und näher am Projektionszentrum als der zu überprüfende Eckpunkt, wird der Eckpunkt vom Objekt selbst verdeckt und ist im Bild nicht sichtbar. Andernfalls ist der Punkt sichtbar.

Und im zweiten Schritt erfolgt die Auswahl der Textur nach der Sichtbarkeit der Eckpunkte jedes einzelnen Dreiecks. Dabei wird einem Dreieck nur dann eine Textur zugewiesen, wenn deren drei Eckpunkte in mindestens einem Bild sichtbar sind. Sind jedoch die drei Eckpunkte in mehreren Bildern sichtbar, so wird das Bild verwendet, indem das Dreieck mit dem größten Flächeninhalt abgebildet wird, d.h. es wird das Bild mit der besten Auflösung verwendet. Die Textur wird dem Bild unmittelbar entnommen, d.h. bei der ML3DImage-Methode findet keine strenge Entzerrung (projektive Abbildung), sondern nur eine affine Abbildung statt. Sind die Dreiecksflächen wie bei Laserscanning-Daten relativ klein, können die auftretenden Verzerrungen vernachlässigt werden. Der Effekt wirkt sich allerdings signifikant bei größeren Dreiecken und Bildneigungen aus. Abb. 5b (oben und unten) zeigt die Auswirkung auf die Texturierung am simulierten Modell einer Pyramide. Die Schachbrettmuster auf den Seitenflächen der Pyramide sind im linken Bild etwas versetzt, dagegen stoßen die Muster im rechten korrekt aufeinander.

Die Berechnung der Selbstverdeckung benötigt die meiste Rechenzeit (>99% der gesamten Berechnungszeit). Um die rechenintensiven Prozesse zu beschleunigen, soll in Zukunft die

Graphics Processing Unit (GPU) verwendet werden. Denn die dafür notwendigen geometrischen Operationen sind direkt in der GPU-Hardware implementiert. Als Programmierschnittstelle könnte dafür OpenGL (<http://www.opengl.org>) oder Direct3D verwendet werden. Zur Sichtbarkeitsanalyse wird in der Computergraphik oft das Z-Puffer-Verfahren oder die Strahlverfolgung (engl. ray tracing) verwendet. Das Z-Puffer-Verfahren ist bereits in der GPU. Die GPU verfügt über viele und schnell parallel arbeitende Geometrie-Recheneinheiten (Geometry-Shader), die diese Aufgabe übernehmen.

Die Strahlverfolgung ist ein alternatives Verfahren und wird in der Bildsynthese verwendet. Hier wird auf eine hohe Bildqualität und eine physikalische Korrektheit Wert gelegt. Da die Strahlverfolgung recht einfach implementiert werden kann, wurden erste Versuche in tmapper damit ausgeführt. Das Ergebnis der Sichtbarkeitsanalyse mittels Z-Puffer-Verfahren oder Strahlverfolgung ist ein Bild mit der gleichen Größe und Orientierung des Originalbildes (siehe Abb. 5c rechts). Jedes Pixel gibt an, ob und welches Dreieck in diesem Pixel sichtbar ist. Zur visuellen Kontrolle und zur Speicherung wurde das Sichtbarkeitsbild in ein RGB-Farbbild umgerechnet, wobei jedem einzelnen Dreieck genau eine RGB-Farbe zugeordnet wird.

5 Ergebnisse der automatischen Texturierung

Der in tmapper implementierte Multi-Layer 3D Image (ML3DImage) Algorithmus wurde anhand folgender verschiedener Datensätze (3D-Modelle), deren technische Spezifikationen in Tabelle 1 aufgeführt sind, getestet.

3D-Modell	# Punkte	# Dreiecke	# Bilder	Kamera
Inschriftenstein, Sirwah (Jemen)	26840	53120	12	Fujifilm S2
Kristiansten Festung, Trondheim	150646	298137	24	Nikon D70
Fleetschlösschen, Hamburg-HafenCity	17371	37219	9	Fujifilm S2

Tab. 1: Technische Spezifikationen der verwendeten Testdaten (3D-Modelle)

Die 3D-Modelle des sabäischen Inschriftensteines des Almaqah-Tempels in Sirwah (Republik Jemen) und der Kristiansten Festung in Trondheim (Norwegen) wurden aus terrestrischen Laserscanning-Daten durch Dreiecksvermaschung in Geomagic abgeleitet. Der Inschriftenstein wurde im Februar 2007 mit dem terrestrischen Laserscanner Trimble GS100 und der digitalen Spiegelreflexkamera Fujifilm Fine Pix S2 Pro (28 mm Objektiv) aufgenommen (LINDSTAEDT et al. 2008), während das Festungsgebäude in Trondheim im September 2010 mit dem Laserscanner Riegl VZ-400 und der digitalen Kamera Nikon D70 (28 mm Objektiv) erfasst wurde. Dagegen wurde von dem Fleetschlösschen, das in der Hamburger HafenCity steht, auf Grundlage von Laserscanning-Daten (Trimble GS100) und photogrammetrischen Aufnahmen (Kamera Fujifilm S2 mit 28 mm Objektiv) durch kombinierte Auswertung und Modellierung ein 3D-CAD-Modell im Rahmen eines studentischen Projektes im Sommer 2006 erstellt. Abb. 6 zeigt die zwölf für die automatische Texturierung verwendeten Bilder des Inschriftensteins, während in Abb. 7 das texturierte 3D-Modell dargestellt ist, in dem jedoch noch eine Lücke aufgrund eines fehlenden Fotos vorhanden ist.



Abb. 6: Übersicht der verwendeten Bilder für die automatische Texturierung des sabäischen Inschriftensteins im Almaqah-Tempel von Sirwah (Jemen)



Abb. 7: Ergebnis der automatischen Texturierung für das 3D-Modell des sabäischen Inschriftensteins im Almaqah-Tempel von Sirwah (Jemen)



Abb. 8: Überlagerung des texturierten 3D-Modells mit Passpunkten zur geometrischen Qualitätskontrolle

Die Bestimmung der Bildorientierungs- und der Kamerakalibrierungsparameter erfolgte mit der photogrammetrischen Auswertesoftware PICTRAN (Kristiansten Festung und Fleet-

schlösschen) und mit Phidias (Inchriftenstein). Da für das geometrische Kameramodell die zusätzlichen Parameter der Selbstkalibrierung bei der Ausgleichung berücksichtigt werden, wird eine recht hohe geometrische Genauigkeit der Orientierungsparameter durch die Bündelausgleichung erreicht. Wenn das texturierte Modell noch über signalisierte Passpunkte verfügt, dann kann die Genauigkeit der automatischen Texturierung durch Überlagerung des texturierten Modells mit den Passpunkten überprüft werden. Die Textur des Passpunktes muss mit dem Passpunkt selbst, hier dargestellt als transparente Kugel, möglichst gut zusammenfallen (siehe Abb. 8).

Ein problematischer Aspekt wird in Abb. 11a aufgezeigt: Am Rand bzw. an Kanten des Modells kann es durch den Hintergrund, hier der blaue Himmel, zu Farbsäumen kommen, die sich momentan automatisch nicht korrigieren lassen. In diesem Fall müsste der Anwender zur Steigerung der radiometrischen Qualität des Modells manuelle Korrekturen vornehmen. Abb. 9 zeigt die 24 für die automatische Texturierung verwendeten Bilder des Festungsgebäudes in Trondheim, während in Abb. 10 zwei Ansichten des texturierten 3D-Modells abgebildet sind.



Abb. 9: Übersicht der 24 verwendeten Bilder für die automatische Texturierung des 3D-Modells der Kristiansten Festung



Abb. 10: Zwei Ansichten vom Ergebnis der automatischen Texturierung für das 3D-Modell der Kristiansten Festung

In Abb. 10 erkennt man folgende Probleme der automatischen Texturierung: a) die Texturen des Gebäudes wurden radiometrisch nicht angepasst, da diese Anwendung noch nicht in tmapper implementiert ist, b) einige Dreiecke haben keine Textur (siehe auch Abb. 11b), c) Dachbereiche können nicht texturiert werden, wenn keine Bilddaten aufgrund der Aufnahme­konfiguration vorliegen, und d) Objekte im Vordergrund werden ohne Sichtbarkeits­analyse der Fremdverdeckungen auf das modellierte Objekt texturiert (siehe Abb. 10 links, rechte Gebäudeseite unten), wenn sie nicht vorher manuell retuschiert werden wie in Abb. 2.

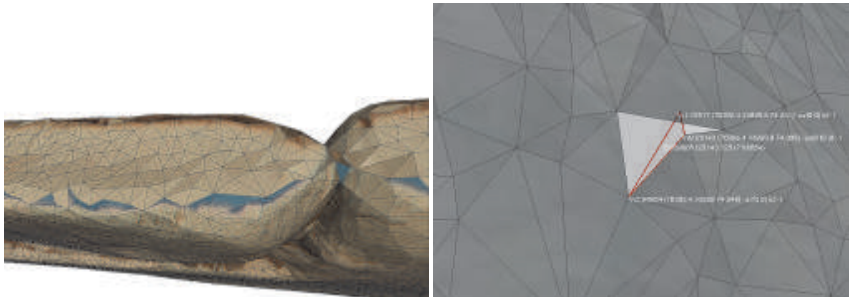


Abb. 11: Problemfälle: a) Farbsäume beim 3D-Modell des Inschriftensteins (links) und b) Dreiecke ohne Textur beim 3D-Modell der Kristiansten Festung (rechts)

Dreiecke ohne Textur stellen ein generelles Problem des ML3DImage Algorithmus dar, denn bei dieser Methode wird Dreiecken nur eine Textur zugewiesen, wenn mindestens alle drei Eckpunkte sichtbar sind. Da Dreiecke aus Laserscanning-Daten allgemein relativ klein sind und ein zusammenhängendes Dreiecksnetz bilden, werden die meisten Dreiecke texturiert (siehe Abb. 10). Wie auch in Abb. 11b jedoch zu sehen ist, wurden einige Dreiecke an dem Gebäude der Festung Kristiansten nicht automatisch texturiert, weil sie partiell verdeckt sind. Da die aus der CAD-Konstruktion abgeleiteten 3D-Modelle recht große Dreiecke aufweisen können, stellt sich das Problem der unvollständigen Texturierung hier momentan deutlicher.



Abb. 12: Ergebnis der automatischen Texturierung für das 3D-Modell des Fleetschlösschens in Hamburg-HafenCity – Problem: Dreiecke ohne Textur bei Verwendung der Sichtbarkeits­analyse vor der automatischen Texturierung

Abb. 12 zeigt das Fleetschlösschen nach der automatischen Texturierung. Viele Dreiecke wurden nicht texturiert, da in der Sichtbarkeitsanalyse eine Selbstverdeckung nachgewiesen wurde, obwohl ein großer Teil der Dreiecksfläche noch sichtbar ist (siehe Abb. 13 links). Zukünftig wird eine Sichtbarkeitsanalyse mittels Z-Puffer-Verfahren oder Strahlverfolgung das Problem lösen können. Eine automatische so genannte „quick& dirty“ Texturierung ohne Sichtbarkeitsanalyse generiert eine im ersten Blick visuell ansprechende Lösung, jedoch mit einigen Fehlern bei der Platzierung der Texturen und in der Geometrie.

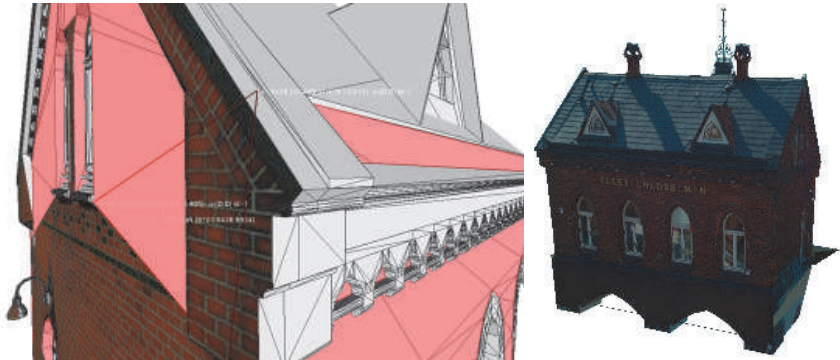


Abb. 13: Unvollständige Texturierung (links) und automatische „quick& dirty“ Texturierung mit Fehlern beim 3D-Modell des Fleetschösschens (rechts)

6 Fazit und Ausblick

In diesem Beitrag wird das Potential der manuellen und automatischen Texturierung von 3D-Modellen anhand von verschiedenen Beispielen vorgestellt. Durch pixel-basierte Matching-Verfahren in digitalen Bilddaten können heute bereits vollautomatisch texturierte 3D-Oberflächenmodelle generiert werden, die bei Objekten kleinerer bis mittlerer Größe die Qualität von Laserscanning-Daten erreichen können (KERSTEN et al. 2012). Mit dem Programm tmapper wird eine Software zur automatischen Texturierung von 3D-Modellen (Dreiecksvermaschung und CAD) entwickelt, die den Multi-Layer 3D Image (ML3DImage) Algorithmus verwendet. Dabei zeigte sich jedoch die Einschränkung, dass die Texturierung mit der ML3DImage-Methode nur für Dreiecksnetze aus Laserscanning-Daten mit möglichst kleinen Dreiecken brauchbar ist. Die Methode ist für 3D-Modelle aus CAD-Anwendungen ungeeignet, da die Bestimmung der Selbstverdeckungen nur auf den Eckpunkten der Dreiecke basiert und somit eine große Anzahl von Dreiecken ohne Textur bleibt. Eine Lösung für dieses Problem wäre die Bestimmung von Selbstverdeckungen für jedes Pixel im Bildraum durch die Z-Puffer-Methode oder die Strahlverfolgung. Da beide Verfahren sehr rechenintensiv sind, bietet es sich an, die Berechnungen auf dem Graphikprozessor durchführen zu lassen. Um außerdem das Problem der Fremdverdeckungen bei der pixel-basierten Sichtbarkeitsanalyse zu lösen, ist es naheliegend, die beiden Methoden mit dem Point-Cloud-Painter-Algorithmus (PCP) zu verbinden.

Momentan kann jedoch nur die manuelle Texturierung von 3D-Modellen für Anwendungen in der Architektur und Archäologie den hohen geometrischen, radiometrischen und visuellen Ansprüchen gerecht werden.

7 Literaturverzeichnis

- ABDELHAFIZ, A., 2009: Integrating Digital Photogrammetry and Terrestrial Laser Scanning. DGK Reihe C, Heft Nr. 631.
- BOLLMANN, J. & KOCH, W.G., (Hrsg.) 2002: Lexikon der Kartographie und Geoinformatik in zwei Bänden. Bd. 2, Karto bis Z, Spektrum Akademischer Verlag GmbH, Heidelberg, Berlin, 455 S.
- KADA, M., 2007: Zur maßstabsabhängigen Erzeugung von 3D-Stadtmodellen. Dissertation, Universität Stuttgart.
- KERSTEN, TH., 2006: Kombination und Vergleich von digitaler Photogrammetrie und terrestrischem Laserscanning für Architekturanwendungen. Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation e.V., Band 15, Hrsg. E. Seyfert, 26. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF, 11.-13. Sept. 2006 in Berlin, pp. 247-256.
- KERSTEN, TH., LINDSTAEDT, M., MECHELKE, K. & ZOBEL, K., 2012: Automatische 3D-Objektrekonstruktion aus unstrukturierten digitalen Bilddaten für Anwendungen in Architektur, Denkmalpflege und Archäologie. Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation e.V., Band 21, Hrsg. E. Seyfert, 32. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF, 14.-17. März 2012 in Potsdam.
- LINDSTAEDT, M., KERSTEN, TH., MECHELKE, K., GÖTTING, M. & HEIDEN, R., 2008: Virtuelles 3D-Modell der antiken Tempelanlage in Sirwah/Jemen zur archäologischen Objektdokumentation durch terrestrisches Laserscanning und Photogrammetrie. Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation e.V., Band 17, Hrsg. E. Seyfert, 28. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF, 23.-25. April 2008 in Oldenburg, pp. 59-68.
- LUHMANN, T., 2010: Nahbereichsphotogrammetrie – Grundlagen, Methoden und Anwendungen. 3., völlig neu bearbeitete und erweiterte Auflage, Wichmann, VDE Verlag GmbH, Berlin und Offenbach, 674 Seiten.

Ableitung von Waldstrukturparametern mittels TerraSAR-X- und ICESat/GLAS-Daten im Thüringer Wald

CLAUDIA HILBERT¹, RALF KNUTH² & CHRISTIANE SCHMULLIUS³

Zusammenfassung: Dieser Beitrag stellt das Texturmaß Lacunarity zur Beschreibung der Lückenhaftigkeit eines Waldbestandes und seinen Einfluss auf die ICESat/GLAS-Waveformstruktur vor. Die Berechnung der Lacunarity erfolgt auf Basis von TerraSAR-X High Resolution Spotlight Daten für ein Testgebiet im Thüringer Wald. Es werden Möglichkeiten aufgezeigt, horizontale Waldstrukturen mithilfe der Lacunarity für TerraSAR-X-Bildausschnitte an den Positionen der GLAS-Footprints zu detektieren. Dabei stellte sich heraus, dass Lacunarity insbesondere zur Erkennung von groben Strukturen großes Potential besitzt. Zudem konnte zwischen Lacunarity und der Stärke des Vegetations- und Bodensignals innerhalb einer GLAS-Waveform für die meisten SAR-Szenen ein mittlerer oder niedriger Zusammenhang festgestellt werden.

1 Einleitung

Flächenhafte, geographisch referenzierte Informationen zur Waldstruktur sind von herausragender Bedeutung, da sie Rückschlüsse auf die Biomasse und den in einem Wald gespeicherten Kohlenstoff erlauben. Erdbeobachtungsmethoden, die in der Lage sind Baumdichten und Baumhöhen verlässlich zu messen, können dabei Vorhaben zur Waldkartierung maßgeblich unterstützen. Für die Charakterisierung der horizontalen Waldstruktur bieten sich die räumlich hochauflösenden TerraSAR-X-Daten an. Seit dem Start des deutschen Radarsatelliten im Jahr 2007 stehen erstmals hochaufgelöste X-Band-Daten aus dem All langfristig zur Verfügung (WERNINGHAUS & BUCKREUSS 2010). Laser-Fernerkundung eignet sich hingegen hervorragend zur direkten Ableitung der Baumhöhe (LIM et al. 2003). Mit dem 2003-2009 aktiven, satellitengestützten ICESat/GLAS-System wurden erstmals auch Laserdaten auf globaler Ebene aufgenommen (ZWALLY et al. 2002). Einige Forschungsarbeiten konnten bereits das Potential der GLAS-Waveforms für waldbezogene Anwendungen demonstrieren (LEVSKY et al. 2005, CHEN 2010). Aufgrund der großen Footprints wird das GLAS-Signal jedoch stark von der Oberflächentopographie und Waldstrukturparametern beeinflusst. Die synergetische Auswertung von Laser-Waveforms zusammen mit Radardaten eröffnen dabei neue Möglichkeiten zur Waldkartierung, da somit sowohl die vertikale als auch die horizontale Dimension erfasst werden kann. Das Ziel des vorliegenden Beitrages ist es daher, Texturigenschaften aus den TerraSAR-X-Daten und somit Informationen zu horizontalen Waldeigenschaften abzuleiten und zu einem vertieften Verständnis der GLAS-Waveformstruktur beizutragen. Dabei wird das skalenabhängige Texturmaß Lacunarity verwendet, welches die räumliche „Lückenhaftigkeit“ und Heterogenität beschreibt. Das Konzept stammt ursprünglich

1) Claudia Hilbert, Friedrich-Schiller-Universität Jena, Institut für Geographie, Lehrstuhl für Fernerkundung, Löbdergraben 32, D-07743 Jena; E-Mail: claudiahilbert@uni-jena.de

2) Ralf Knuth, Friedrich-Schiller-Universität Jena, Institut für Geographie, Lehrstuhl für Fernerkundung, Löbdergraben 32, D-07743 Jena; E-Mail: ralf.knuth@uni-jena.de

3) Christiane Schmullius, Friedrich-Schiller-Universität Jena, Institut für Geographie, Lehrstuhl für Fernerkundung, Löbdergraben 32, D-07743 Jena; E-Mail: c.schmullius@uni-jena.de

aus der fraktalen Geometrie und wurde bereits zur Analyse von räumlichen Mustern verschiedener landschaftlicher Kontexte angewendet (FRAZER et al. 2005, HOECHSTETTER et al. 2011). Im Rahmen des vorliegenden Beitrages wird die Lacunarity basierend auf TerraSAR-X High Resolution Spotlight Daten an den Positionen mehrerer GLAS-Footprints unterschiedlicher Waldtypen und -muster vorgestellt und ein möglicher Einfluss auf die Waveform-Struktur erörtert.

2 Untersuchungsgebiet und verwendete Daten

Das Testgebiet liegt im Thüringer Wald, einem deutschen Mittelgebirge mit Geländehöhen bis zu 983 m. Etwa 80-85% der Fläche sind bewaldet (HIEKEL et al. 2004), wobei vor allem Fichten-, Buchen-, und Kiefernwälder vorzufinden sind. Die Wälder werden forstwirtschaftlich genutzt. Die Region zeichnet sich zudem durch eine starke Geländetopographie mit tiefen Tälern und steilen Hängen aus.

Abbildung 1 veranschaulicht die Lage der verwendeten ICESat/GLAS-Footprints und der TerraSAR-X-Daten innerhalb des Untersuchungsgebietes. Insgesamt 18 TerraSAR-X-Akquisitionen im High Resolution Spotlight Aufnahmemodus für den Zeitraum August 2009 bis November 2010 standen zur Verfügung. Im Rahmen dieses Beitrages wurden nur Daten der HH-Polarisation verwendet. Die SAR-Daten wurden im Single Look Complex (SLC) Format bestellt und für eine räumliche Auflösung von 5 m vorprozessiert. Die Vorprozessierung beinhaltet die Kalibrierung, Multi-Looking zur Reduzierung des Speckles, Geocodierung und die topographische Normalisierung. Dabei stand ein auf flugzeuggetragenen Laserscannerdaten basiertes Digitales Geländemodell (DGM) mit einer räumlichen Auflösung von 5 m zur Verfügung.

Die ICESat/GLAS Datenprodukte GLA01 und GLA14 des Release 531 wurden von der Webseite des National Snow and Ice Data Center (NSIDC) heruntergeladen. Die Vorprozessierung der Daten erfolgte mithilfe der durch das NSIDC zur Verfügung gestellten GLAS-Tools sowie eigenen Skripten. Die Footprints wurden als Ellipsen modelliert und mit den anderen, in dieser Studie verwendeten Datensätzen räumlich verschnitten. Außerdem wurden alle GLAS-Shots, deren

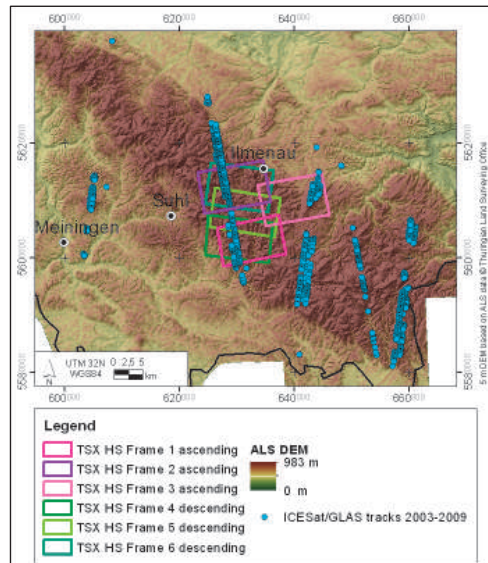


Abb. 1: Darstellung des Untersuchungsgebietes und der Lage der ICESat/GLAS und TerraSAR-X Daten

Waveforms durch atmosphärische Einflüsse oder Sättigung gestört sind, entfernt. In der hier vorgestellten Arbeit wurden nur Waveforms der Laserperioden L3A (Herbst 2004), L3G (Herbst 2006) und L3H (Frühjahr 2007) untersucht. Die Beschränkung auf die drei Laserperioden erfolgte, um potentielle Waveform-Strukturunterschiede aufgrund der uneinheitlichen Eigenschaften der verwendeten Laser während der ICESat-Mission auszuschließen. Dieses Vorgehen resultierte schließlich in insgesamt 135 Footprints, die sich in Lagen mit Hangneigungen bis zu 34° befinden.

3 Methoden

3.1 Berechnung der Lacunarity als Maß der Lückenhaftigkeit

Die Berechnung der Lacunarity erfolgte auf Basis des für binäre Datensätze entwickelten Gliding-Box-Algorithmus (ALAIN & CLOITRE 1991, PLOTNICK 1993). Um Lacunarity aus den TerraSAR-X-Rückstreuwerten ermitteln zu können, wurde der Algorithmus im Rahmen dieser Arbeit auf kontinuierliche Daten angepasst. Dabei läuft eine zweidimensionale Box der Kantenlänge r über das Eingangsbild, summiert die enthaltenen Werte auf und schreibt das Ergebnis in eine Matrix A_r . Der nächste Schritt ist die Berechnung der Wahrscheinlichkeitsfunktion von A_r und des ersten und zweiten Moments der Verteilung. Die Lacunarity Λ für die Boxgröße r berechnet sich schließlich mit folgender Formel:

$$\Lambda(r) = \frac{s^2(A_r)}{\mu^2(A_r)} + 1$$

mit s^2 : Varianz; μ : arithmetische Mittel

Zur Analyse der Lacunarity für alle räumlichen Skalen werden Boxgrößen und Lacunarity gegeneinander aufgetragen. Dabei wird zur besseren Visualisierung der natürliche Logarithmus der Lacunarity gebildet. Im Gegensatz zu den sogenannten Lacunarity-Log-Plots liefern Lacunarity-Rasterbilder Informationen über die räumliche Verteilung der Lacunarity innerhalb eines Bildausschnittes für eine bestimmte Boxgröße. Hierfür ist ein zusätzliches, über das gesamte Eingangsbild laufende zweidimensionale Fenster der Größe w ($w > r$) notwendig, in dem sich jeweils die Box r bewegt.

Als Berechnungsgrundlage wurden an der Position der GLAS-Footprints Bildausschnitte der TerraSAR-X-Szenen mit einer Größe von 20x20 Pixel, d.h. 100x100 m erstellt. Die Größe der Bildausschnitte ist ein Kompromiss, um die unterschiedlichen Footprint-Durchmesser zwischen 50 m und 160 m zu vereinen und gleichzeitig die Anforderung an einheitliche Subsets zu besseren Vergleichbarkeit der Lacunarity-Ergebnisse zu erfüllen.

3.2 ICESat/GLAS Waveform-Strukturtypen

Die GLA01 Waveforms wurden mittels visueller Interpretation in sechs Waveform-Strukturtypen unterteilt und jede Waveform jeweils einem Typ zugeordnet. Abbildung 2 zeigt eine Übersicht der einzelnen Typen. Die Waveform-Typen 1 und 2 beschreiben die ideale Waveform-Struktur mit klaren Signalen der Vegetation und der Bodenoberfläche, die deutlich voneinander trennbar sind. Die Unterscheidung beider Typen erfolgt nach den jeweiligen

Intensitäten beider Signale. Waveforms der Typen 3 und 4 lassen ebenfalls ein Bodensignal erkennen. Jedoch sind die Waveforms allgemein etwas unscharfer und verrauschter und die Vegetations- und Bodensignale sind leicht miteinander vermischt. Waveform-Typ 5 ist durch ein sehr schwaches Vegetationssignal gekennzeichnet, während Waveform-Typ 6 völlig verrauschte Waveforms ohne klar voneinander trennbare Boden- und Vegetationssignale zusammenfasst.

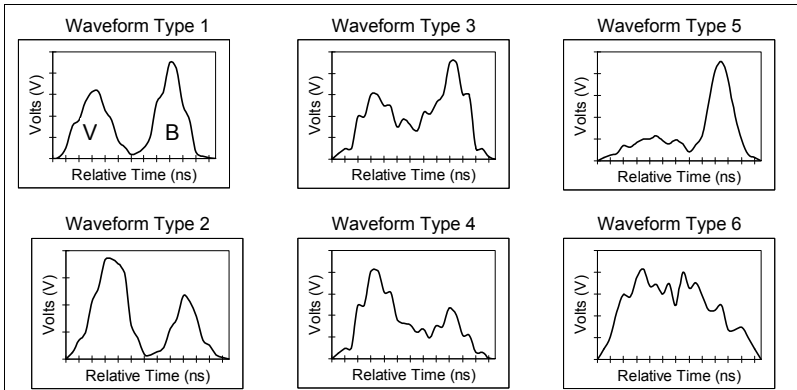


Abb. 2: Schematische Darstellung der sechs Waveform-Strukturtypen. V: Vegetationssignal; B: Bodensignal.

4 Ergebnisse und Diskussion

4.1 Vergleich der Lacunarity-Log-Plots während der Sommer- und Wintermonate

Abbildung 3 zeigt die Lacunarity von sieben beispielhaft ausgewählten Footprints für eine TerraSAR-X-Sommer- und Winteraufnahme in Frame 1. Die ersten drei Footprints 20714, 17553 und 20736 repräsentieren geschlossene Waldbestände mit leicht ansteigender Heterogenität und Lückenzahl basierend auf visueller Interpretation der zugehörigen Orthophotos. Die weiteren vier Footprints 18712, 15997, 20733 und 18718 stellen Waldbestände mit großen Lücken, einem Waldweg oder einer Straße dar. Die Lacunarity für Boxgröße $r=1$ (d.h. 5 m für die verwendete TerraSAR-X-Auflösung) gibt Aufschluss über die allgemeine räumliche Heterogenität des Bildausschnittes. Der homogeneste Footprint 20714 weist dementsprechend für beide TerraSAR-X-Akquisitionen die niedrigste Lacunarity auf. Die höchste Lacunarity findet sich hingegen für Footprint 18718, durch den eine Straße verläuft. Zudem lassen die ebenfalls hohen Werte für die anderen Boxgrößen und die geringe Abnahme der Lacunarity zwischen den Boxgrößen 55 m und 70 m darauf schließen, dass dieser Footprint heterogene, großflächige Strukturen beinhaltet. Die Lacunarity-Kurven der anderen Footprints liegen relativ dicht beieinander, was darauf hinweist, dass feine Unterschiede in der horizontalen Struktur nur schwer zu detektieren sind. Eine Differenzierung ist eher für kleinere Boxgrößen zwischen 10 m und 20 m möglich, welche mit der Größenordnung von Baumkronen

übereinstimmen. Die absoluten Lacunarity-Werte und die Spannweite zwischen den einzelnen Lacunarity-Kurven der Winteraufnahme (Abb. 3b) sind im Allgemeinen niedriger im Vergleich zu den Sommerdaten (Abb. 3a). Eine Ausnahme bildet Footprint 18712, dessen Lacunarity-Werte nahezu keine Veränderung aufweisen. Eine mögliche Erklärung ist, dass dieser Footprint zu einem Großteil von Nadelwald bedeckt ist, während die anderen Laubwaldstandorte repräsentieren. Die Ergebnisse legen nahe, dass die Sommermonate zur Erfassung horizontaler Waldstrukturen besser geeignet sind, da die Texturen von Wald und Waldlücken aufgrund des Laubdaches deutlicher unterschieden werden können.

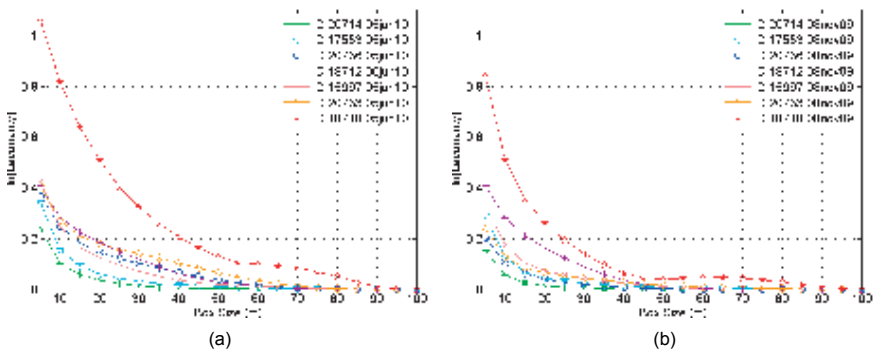


Abb. 3: Lacunarity-Log-Plots für ausgewählte GLAS Footprints. (a) TerraSAR-X 5. Juni 2010 HH, ascending Orbit, Einfallswinkel 36.8°; (b) TerraSAR-X 8. November 2009 HH, ascending Orbit, Einfallswinkel 36.8°.

4.2 Lacunarity-Raster zur Erkennung räumlicher Muster

In Abbildung 4 sind die Lacunarity-Rasterbilder von fünf der bereits in Kapitel 4.1. erläuterten Footprint-Beispiele dargestellt. Hierbei wurden aufgrund der in Kapitel 4.1. skizzierten Ergebnisse eine Boxgröße mit $r=3$ und eine Fenstergröße mit $w=5$ gewählt. Die geschlossene, homogene Waldecke von Footprint 20714 spiegelt sich in einer gleichmäßigen, niedrigen Lacunarity im gesamten Bildausschnitt wider (Abb. 4a). Die etwas heterogenere Struktur mit einigen Lücken in Footprint 20736 ergibt ein ähnliches Lacunarity-Bild, die Lücken sind lediglich angedeutet (Abb. 4b). Klare Strukturen wie der Waldweg in Footprint 15997 oder die Lücken und Schatten in Footprint 18712 treten sowohl im SAR-Bild als auch im Lacunarity-Bild deutlich hervor (Abb.4c-d). Die lineare Struktur der Straße in Footprint 18718 wird durch die hohe Rückstreuung in der unteren linken Bildecke überlagert (Abb. 4e). Bei Betrachtung eines größeren Ausschnittes des Lacunarity-Bildes wurde der Verlauf der Straße jedoch sichtbar. Der Vergleich mit dem Orthophoto und GoogleEarth-Daten zeigte zudem, dass die hohen Rückstreuwerte von zum Radarsensor orientierten scharfen Waldkanten stammen. Dieses Beispiel demonstriert, dass die Lacunarity-Ergebnisse stark von den SAR-

Rückstreumechanismen abhängen. Darüber hinaus muss beachtet werden, dass das Lacunarity-Raster Artefakte aufgrund der verwendeten Box- und Fenstergrößen enthalten kann.

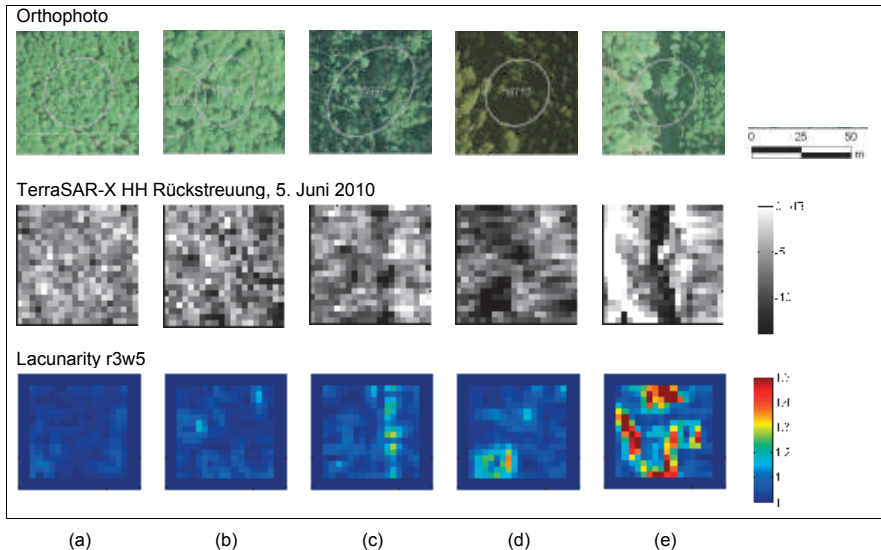


Abb. 4: Orthophoto mit GLAS-Footprint, TerraSAR-X HH Rückstreung in dB, 5. Juni 2010 und daraus abgeleitetes Lacunarity-Raster mit Boxgröße $r=3$ und Fenstergröße $w=5$ für fünf GLAS Footprints. (a) ID 20714; (b) ID 17553; (c) ID 15997; (d) ID 18712; (e) ID 18718.

4.3 Lacunarity und ICESat/GLAS Waveform-Typen

Der Vergleich zwischen Waveform-Typ und Lacunarity der TerraSAR-X-Akquisition vom 5. Juni 2010 zeigt (Abb. 5a), dass Waveform-Typ 5, das heißt Waveforms mit sehr schwachem Vegetationssignal, die höchste mittlere Lacunarity besitzen. Waveforms mit starkem Vegetationssignal des Typs 3 weisen hingegen im Durchschnitt eine niedrigere Lacunarity auf. Die ebenfalls relativ niedrige durchschnittliche Lacunarity für Waveform-Typ 6 deutet daraufhin, dass die geringe Lückenhaftigkeit in den betroffenen Footprints neben der Hangneigung entscheidend zur Waveform-Struktur beiträgt. So zeigten Simulation von YANG et al. (2011), dass die kritische Hangneigung, bei der das Vegetations- und Bodensignal sich miteinander vermischen und nicht mehr voneinander getrennt werden können, bei dichten Waldbeständen niedriger ist bei gleicher Oberflächentopographie.

Die Ergebnisse für diese drei Waveform-Typen paust sich mehr oder weniger deutlich als generelles Muster bei allen elf TerraSAR-X-Szenen von Frame 1 durch. Jedoch muss darauf hingewiesen werden, dass für diese Untersuchungen mit 40 Footprints pro TerraSAR-X-Szene nur eine kleine statistische Grundgesamtheit zur Verfügung stand und die Daten teilweise stark

streuten. Zudem standen für Frame 1 keine Waveforms der anderen Waveform-Typen 1, 2 und 4 zur Verfügung, wodurch weitere Vergleichsmöglichkeiten fehlten. Diese werden durch die Analyse der TerraSAR-X-Aufnahme vom 8. September 2009 in Frame 2 (Abb. 5b) ermöglicht: Waveforms mit starkem Vegetationssignal entsprechen Footprints mit niedriger Lückenhaftigkeit. Waveforms der Typen 1 und 3 mit starken Bodensignalen sind hingegen durch im Durchschnitt höhere Lacunarity-Werte gekennzeichnet. Im Allgemeinen konnte ein mittlerer, für einige SAR-Szenen jedoch nur ein niedriger Zusammenhang zwischen Lacunarity und Waveformstruktur festgestellt werden. Das lässt darauf schließen, dass neben der Lacunarity als Maß für die horizontale Struktur auch andere Vegetationsparameter sowie die Oberflächentopographie innerhalb eines Footprints das GLAS-Signal beeinflussen.

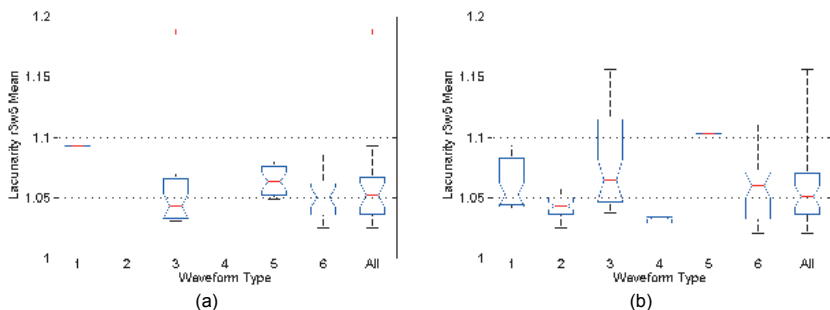


Abb. 5: Boxplots der mittleren Lacunarity mit Boxgröße $r=3$ und Fenstergröße $w=5$ für verschiedene Waveform-Strukturtypen. Dargestellt sind der Median (rote Linie), 95% Konfidenzintervall zur Kennzeichnung von signifikant verschiedenen Medianen (Einkerbungen), unteres und oberes Quartil (blaue Boxen), Spannweite ohne Ausreißer (schwarze Whisker), Ausreißer größer als 3*Interquartilsabstand (rote Kreuze). (a) Lacunarity für TerraSAR-X Akquisition 5. Juni 2010 HH, ascending Orbit, Einfallswinkel 36.8°; (b) Lacunarity für TerraSAR-X Akquisition 8. September 2009 HH, ascending Orbit, Einfallswinkel 47.5°.

5 Zusammenfassung

Dieser Beitrag demonstriert das Potential des Texturmaßes Lacunarity zur Ableitung von Informationen der horizontalen Waldstruktur anhand von TerraSAR-X-Daten. Zusätzlich wurde untersucht, inwiefern die Lückenhaftigkeit eines Waldbestandes die ICESat/GLAS-Waveformstruktur beeinflusst. Es konnte gezeigt werden, dass die Lacunarity großflächige Strukturmerkmale wie Straßen und große Lücken und ihre räumlichen Variationen detektieren kann. Die Identifizierung sehr feiner Unterschiede ist hingegen schwierig. Darüber hinaus konnte gezeigt werden, dass die Lacunarity das GLAS-Signal entscheidend beeinflusst. Gleichzeitig wurde jedoch deutlich, dass die GLAS-Waveforms ein komplexes Produkt mehrerer Faktoren ist und sich der Einfluss einzelner Parameter nur schwer bestimmen lässt. Weitere Untersuchungen sind notwendig, um auch den Einfluss einzelner Aufnahmeparameter der SAR-Daten, wie zum Beispiel Wetterbedingungen und Einfallswinkel, genauer beschreiben zu können.

6 Danksagung

Dieses Projekt wird finanziert durch das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR). Die Autoren bedanken sich zudem beim National Snow and Ice Data Center (NSIDC) für die Bereitstellung der ICESat/GLAS-Daten und dem Thüringer Landesamt für Vermessung und Geoinformation für die Bereitstellung der Flugzeuglaserdaten und den digitalen Orthophotos.

7 Literatur

- ALAIN, C. & CLOITRE, M., 1991: Characterizing the lacunarity of random and deterministic fractal sets. *Physical Review A*, 44, 6, 3552-3558.
- CHEN, Q., 2010: Retrieving vegetation height of forests and woodlands over mountainous areas in the Pacific Coast region using satellite laser altimetry. *Remote Sensing of the Environment*, 114, 1610-1627.
- FRAZER, G.W., WULDER, M.A. & NIEMANN, K.O., 2005: Simulation and quantification of the fine-scale spatial pattern and heterogeneity of forest canopy structure: A lacunarity-based method designed for analysis of continuous canopy heights. *Forest Ecology and Management* 214, 65-90.
- HIEKEL, W., FRITZLAR, F., NÖLLERT, A. & WESTHUS, W., 2004: Die Naturräume Thüringens. Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie: Jena.
- HOECHSTETTER, S., WALZ, U. & THINH, N.X., 2011: Adapting lacunarity techniques for gradient-based analyses of landscape surfaces. *Ecological Complexity* 8, 229-238.
- LEVSKY, M. A., HARDING, D.J., KELLER, M., COHEN, W. B., CARABAJAL, C. C., F. DEL BOM ESPRITOSANTO, HUNTER, M. O. & DE OLIVEIRA, JR., R., (2005b): Estimates of forest canopy height and aboveground biomass using ICESat. *Geophysical Research Letters* 32, L22S02, doi:10.1029/2005GL023971.
- LIM, K., TREITZ, P., WULDER, M., ST-ONGE, B. & FLOOD, M., 2003: LiDAR remote sensing of forest structure. *Progress in Physical Geography*, 27, 1, 88-106.
- PLOTNICK, R.E., GARDNER, R.H. & O'NEILL, R.V., 1993: Lacunarity indices as measures of landscape texture. *Landscape Ecology*, 8, 3, 201-211.
- WERNINGHAUS, R. & BUCKREUSS, S., 2010: The TerraSAR-X Mission and System Design. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 48, 2, 606-614.
- YANG, W., NI-MEISTER, W. & LEE, S., 2011: Assessment of the impacts of surface topography, off-nadir pointing and vegetation structure on vegetation lidar waveforms using an extended geometric optical and radiative transfer model. *Remote Sensing of Environment* 115, 2810-2822.
- ZWALLY, H. J., B. E. SCHUTZ, W. ABDALATI, J. B. ABSHIRE, C. BENTLEY, A. BRENNER, J. BUFTON, J. DEZIO, D. HANCOCK, D. J. H Harding, T. HERRING, B. MINSTER, K. QUINN, S. P. PALM, J. SPINHIRNE & R. THOMAS, 2002: ICESat's laser measurements of polar ice, atmosphere, ocean, and land. *Journals of Geodynamics* 34, 405-445.

A Topology Based Approach for the Generation and Regularization of Roof Outlines in Airborne Laser Scanner Data

SANKA NIRODHA PERERA¹ & HANS-GERD MAAS¹

Abstract: In this paper, we present a new approach for the generation and regularization of 3D roof boundaries in Airborne Laser Scanner (ALS) data. Initially, segment based classification approach is chosen to discriminate off-terrain points from the terrain points and different rules are then imposed to extract as much of roof planes. We introduce the use of cycle graphs to the roof topology graph. The Dijkstra's algorithm is used to recognize the possible shortest closed cycles, and used such cycles for the fixing of ridge-line intersections. The subdivision of cycles is performed to handle step-edge intersections whilst union of connected cycles are taken for the manipulation of outer roof boundaries. Experimented results show that our approach is promising and can be obtained topologically valid, complete 3D roof structures.

1 Introduction

1.1 General Remarks

Automated 3D building modeling is important for many applications such as city modeling and virtual reality, telecommunication, map updating and so on (SOHN & DOWMAN, 2007). Data, captured by Photogrammetric or LiDAR techniques, is basically used for the modeling schemes but, the latter source is promising as the point clouds have more automated potential though they are irregularly distributed. To date, there exist many strategies (e.g. MAAS & VOSSELMAN, 1999; BRENNER & HAALA, 1998; SCHWALBE et al., 2005; OUDE ELBERINK, 2010) for the reconstruction of the building models. However, the state of art of techniques in 3D building reconstruction is still being developed. Specially, in terms of the feature extraction based on the topology and the way of incorporating such features on building shapes in order to reconstruct a geometrically valid detailed polyhedral models. In this end, this paper presents a novel approach to make use of topological property of building roof segments and then to reconstruct 3D building roof structures based on the cycle graphs.

Authors, in this paper, take part of the ISPRS Test Project on Urban Classification and 3D Building Reconstruction in 2012 (ISPRS COMMISSION III, 2011) and thus data were obtained from the ISPRS commission III/4. It should be mentioned that the data were captured by the Leica ALS50 over the Vaihingen city, Germany.

1) Sanka Nirodha Perera, Institute of Photogrammetry and Remote Sensing, Technische Universität Dresden, Helmholtz Straße 10, 01069 Dresden, Germany; E-mail: sanka.perera@mailbox.tu-dresden.de

2) Hans-Gerd Maas, Institute of Photogrammetry and Remote Sensing, Technische Universität Dresden, Helmholtz Straße 10, 01069 Dresden, Germany; E-mail: hans-gerd.maas@tu-dresden.de

1.2 Related Work

Building reconstruction based on the intersection of neighboring planes, proposed by (MAAS & VOSSELMAN, 1999), provides the firm basement for many modeling schemes as both data driven and model driven approaches can be linked with the information of intersection edges or ridgelines. Also, (VOSSELMAN, 1999) and (ROTTENSTEINER & BRIESE, 2003) show the validity of the plane intersection method for the modeling schemes. Later on, (SCHWALBE et al., 2005) adopt specific orthogonal point projection strategy for the reconstruction workflow. The potential of intersection lines and more comprehensive step-edges to the reconstruction steps is again shown by the (ROTTENSTEINER et al, 2005). Currently, plane intersection information and as well as topological information are being used for the building reconstruction.

Topological information provides the mutual arrangement and/or relationship between neighboring roof planes. In (2000) AMERI & FRITSCH use Voroni diagrams to obtain the mutual connections between the roof planes. Later, (VERMA et al., 2006) adopt the properties of primitive roof shapes by means of the topology. In this approach, it is assumed that any complex building can be decomposed into number of primitive shapes thus the counter recognition of neighboring primitive is the way to model a building for them. Hence, first they recognize the topological relationships among neighboring roofs of a building and represent in a graph. Consequently, sub graph matching is adopted to detect best possible primitive shape to be represented for a set of roof planes. Although ambiguity of the graph matching has been avoided by them, their approach was limited to a few primitive shapes. Later, formal grammar is added to the primitive shapes that have been identified by sub graph matching by (MILDE et al., 2008). In addition to the grammar rules, some additional corner connectors have also been used to get a valid roof model. Sub graph matching, introduced by (VERMA et al., 2006), is extended by (OUDE ELBERINK, 2010), and used not only various roof primitive types but also the nature of discontinuity changes among roof planes, i.e. status of ridge-line or step-edge lines, for the matching process. Complete matching result, with few incomplete matches, is obtained from some buildings where missing planes are existed. Thus, incomplete matches is attempted to solve by suggesting a best matched option due to the fact that has been arose as a result of the missing data.

Due to the ambiguities of sub graph matching with relevant data features and limitations of defining possible primitive shapes for the matching, we propose a new approach using closed cycle graphs. Consequently, geometrically valid complete roof structures are obtained by avoiding the graph matching process.

2 Roof Plane extraction

ALS points cloud is initially segmented into different planar faces by adopting the method, implemented by (VOSSELMAN et al., 2004). Optimum parameters are chosen during the segmentation step as it is crucial, as shown by (DORNINGER & PFEIFER, 2008), in the building reconstruction schemes. Our intention is to follow a rule based extraction strategy for the detection of roof planes as we do not have any clue about the potential building areas. Accordingly, terrain point classification is a prerequisite, which we need to satisfy prior to the roof extraction, for our approach. Since, we already have planar segments; a developed version

of a segment based classification process, presented by (PERERA, 2007) is adopted for the terrain point extraction. Mutual relationships among segments are recognized and presented as an adjacency map; for instance, for neighboring segments A, B and C (see figure 1), their adjacency relationship is taken as (B, C), (A, C) and (A, B) respectively.

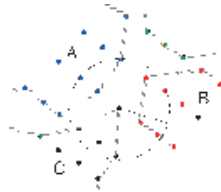


Fig. 1: Mutual connection of segments at an AOI

As the mutual relationship is relied on the spatial distribution of segments, a Delaunay triangulated point neighborhoods are taken at a desired Area of Interest (AOI) to obtain segment adjacencies. This AOI radius is set in a way that accommodate at least one point from the neighboring segments whose minimum distance separation, stay within the distance which we prefer to consider as an adjacent. Discontinuities among the segments are identified and accordingly segments are classified as either terrain or off-terrain. Although, we achieve a good classification results, the terrain point classification is not fully discussed here as it is out of scope of the paper.

Assuming, any complex roof can be recognized by detecting their primitive shapes such as gable, hip and so on, different rules are imposed to detect as much of roof segments from a similar adjacency map. Except isolated flat and shed roofs, most of the other common roofs or part of the roofs might associate with break lines and also individual roof plane might have a certain azimuth difference with respect to the azimuth of the adjacent roof plane. Hence, taking pair of adjacent segments at a time, relative azimuth differences are tested. When the azimuth difference is equal near to the 180 or 0 degree, then segments which follow our horizontality constraint on break line is used to refine potential roof planes.

Tab. 1: Summary of the parameter for rules on the roof extraction

Nature of the constraint	Threshold	Target roof types
Azimuth difference between adjacent segment pair & Horizontality of break line	$180^{\circ} \pm 3^{\circ}$ or $0 \pm 3^{\circ}$ $< 3^{\circ}$	Gable, mansard
Azimuth difference between adjacent segment pair & Non-horizontality of break line	$90 \pm 0^{\circ}$ $> 3^{\circ}$	Hip, L-shaped
Slope constraint for oblique roofs	$> 5^{\circ}$ and $< 75^{\circ}$	All oblique roofs (including shed)
Slope constraint for the flat roofs	$< 5^{\circ}$	flat
Height threshold	1.5 meter	For all roof types

Moreover, 90 degree azimuth constraint together with oblique ridge-lines constraint is also used to extract some other roof planes. Further to that, oblique roofs, which have not followed our defined azimuth constraints at their given adjacencies and remained adjacent to the previously detected faces, are extracted using the slope constraints; this is in addition to the extraction of individual oblique roofs by the slope constraints. A height threshold well above the terrain is always imposed to reduce the low vegetation being depicted as roof planes. Summary of the parameters that have been adopted for roof plane extraction is given in table 1 and some results, relevant to the above step, are shown in figure 2.



Fig. 2: Raw point clouds (left), planar segments (middle), Extracted roofs (right): cyan & white - building, green - vegetation, red - terrain, black - non segmented point patches

3 Construction of Roof Topology Graph (RTG)

Once the roof plane extraction is completed, adjacency map is updated by removing unwanted segments as they are no longer applicable for the roof reconstruction. Our intention is to generate valid roof structures for every building. Thus, connected components, appear in the updated adjacency map, are taken and assigned a unique building number. Now, a single building represents one or more roof segments in reality, thus, not only outer bounds but also inner bounds are required for the generation of a complete 3D roof structure. In most cases, step-edges and ridge-lines are provided the necessary inner boundary limits of individual roof planes. In contrast, these two discontinuity scenarios (i.e. step-edges and ridge-lines), let's say feature lines, further tells us how each roof resides with respect to the other roof, i.e., topological relationship, in the real building. Hence, topological relationships are important to derive, especially in data driven process, for obtaining the valid 3D roof structures. (VERMA et al., 2006; OUDE ELBERINK, 2009) suggest a way of presenting such a topological relationship in a connected graph, called a roof topology graph. Therefore, we construct the feature lines of each building and at the same time create the relevant RTGs.

3.1 Feature line construction

The ridge-line information, relevant to a certain pair of segments, is directly given by our roof extraction algorithm, if the segments have been identified as a valid roof pair. This is an added advantage of our roof extraction process. Although, ridge-lines have already been generated, the ridge-line recognizing strategy is briefly explained now as it helps to differentiate our step-edge detection. Generally, valid ridge-lines, appear in buildings, are given by the intersection of two planes, but spatial distribution of points might not be broken, being a ridge-line in between.

Therefore, boundary points, stay within a narrow buffer zone which is sharing both edges, are chosen to validate whether a ridge-line should be accommodated in-between two roof segments or not. In this case, half of the zone width is equal to the distance which is slightly less than twice the point spacing.

On the other hand, if every boundary point or higher percentage of points spatially separate in Z-direction with their counter border points, then step-edges might be existed. So that, best fitted two line segments (up and down) are necessary to represent each step edge. After generating a step-edge, upper edge is recognized and is rectified based on the dominant plane direction and then transferred its planimetric position to the down edge, assuming the relevant wall is vertical and passing through the upper edge.

3.2 Roof topology graph (RTG)

The definition of a graph G , is given as a pair $G = (V, E)$ of sets, such that $E \subseteq [V]^2$, as explained by (DIESTEL, 2010); where V is ‘vertices’ (or series of nodes) and E is ‘edges’ (or series of lines). By the definition, an edge can be represented using two pair of vertices. Considering the graph theory on practical point of view, two roof planes can be taken to represent two vertices or an edge in a RTG. As we have additional information to be represented, the edge can be used to represent topological relationships. In our approach, we use two basic relationship categories i.e. “Ridge-line” and “step-edge”. Therefore, a complete RTG of a building can be constructed once all the ridge-lines and step-edges, relevant to the building, are generated.

As we know the correct topological relationships among roof planes, now we can demarcate the roof boundaries.

4 Closed Cycle Analysis

Assuming the RTG as a directed graph, the graph G , shown in figure 3, can be described as follows,

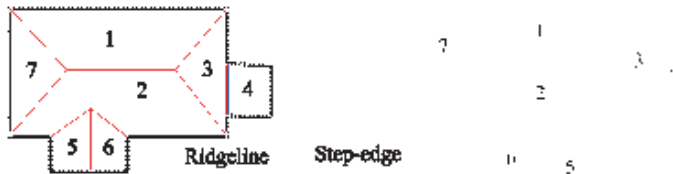


Fig. 3: Complex roof structure (left) and derived RTG, G (right)

By the definition, $G = (V, E)$; therefore $V = \{1, 3, 4, 3, 2, 6, 5, 2, 7\}$ and $E = \{1-3, 3-4, 4-3, 3-2, 2-6, 6-5, 5-2, 2-7\}$. When we traverse over the graph G , different vertices can be chosen to walk in between any two desired end-vertices. Therefore, if the end-vertices are equal to vertex 2 and 1; Then, possible sets of vertices that we could walk are; $P_1\{1,2\}$, $P_2\{1,2,7\}$, $P_3\{1,2,3,4,3\}$ and so on., where P_1 , P_2 and P_3 are “paths”. Hence, we have more than one path to walk in between given end-vertices. When end-vertices are coincided, for e.g. vertex 1, then the path becomes a (closed) cycle. Hence, cycles relevant to the above paths can be rewritten as $C_1 = \{1, 2, 1\}$, $C_2 = \{1, 2, 7, 1\}$

and $C3 = \{1, 2, 3, 4, 3, 1\}$. The length, i.e. number of edges, of each cycle is different and 2, 3 and 5 are the figures for above cases. $C1$ is appeared as a line, and related to a single pair of roof plane in the RTG. Hence, it can be restricted to analyze such a simple cycle. In addition to that, considering as a shortest path problem, cycles having higher degree of lengths can also be ignored and a unique ‘shortest’ closed cycle can be obtained for given two end-vertices. Therefore, assuming the RTG has equidistance edges, the well-known Dijkstra’s algorithm is applied to distinguish every possible ‘shortest’ closed cycle, emerged in a complete RTG graph. Hence, identified closed cycles can be used to adjust inner and outer roof bounds of each building.

4.1 Fixing of Ridgeline Intersection

Careful examination of figure 3 shows that the feature lines, relevant to a shortest closed cycle are converged to a single point. Therefore, incidences where the adjacent ridge-lines are supposed to intersect at a single position can be robustly determined by considering every shortest cycle. In this case, as we focus only the ridge-lines, the cycles whose entire edge labels are represented only by the ‘ridge-line’ category should be chosen. The fixing of such a point can be taken as a least square minimization problem and can be estimated a single position which is closest to all the ridge-lines. We have taken a robust outcome by assigning the weights for each ridge-line as some ridge-lines are more stable than other. Positive weights, lasting from 0 to 1 are assigned, which is directly proportional to the sine value of angle between normal vectors of roof segments. Therefore, without knowing primitive roof types, ridge-lines can be geometrically fixed as shown in figure 4.

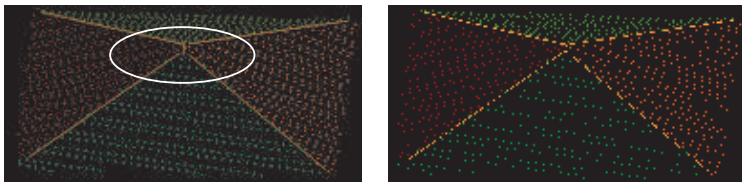


Fig. 4: Ridge-line intersection is fixed: before (left), after fixing (right)

4.2 Fixing, relevant to step-edges

In addition to the ridge-line intersection, many possibilities can be found where step-edge lines themselves and step-edge with ridge-lines suppose to be converged at more than one positions (see, figure 5), holding a same planimetric coordinates with height jumps. Therefore, by analyzing the feature lines together with shortest closed cycles, in a 3D view, a single common position is supposed to construct. Two line segments, referring to two planar faces, are represented by a step-edge. Therefore, presence of the step-edges split the ‘cycle’ into several ‘arcs’. Each arc represents a specific height level of the roof top. As two height levels exist in the figure 5, two arcs or two directed “path graphs” can be used to represent that shortest closed cycle. The splitting of cycles lead to convey in which step edge i.e. either up or down edge, is referred by the particular path graph. Consequently, all the feature lines, relevant to a certain path

graph can be identified, and computed a single intersection point (3D) to represent the corresponding roof corner. However, due to the other path graphs, exist in the same cycle, slightly different planimetric coordinates might be received. Thus, a common planimetric position is taken by averaging each individual position. Transferring of that planimetric coordinate to the other points leads for the geometrically valid roof corners.

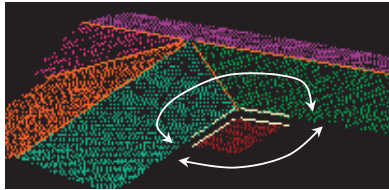


Fig. 5: Step-edges and ridgelines, at a closed cycle, suppose to meet - side view

During the adjustment process, step-edges are allowed to shift by themselves while preserving their directions based on the influence of ridgelines since the ridge-lines are fixed in our approach. Therefore, as in the figure 6, step-edges can be fixed.

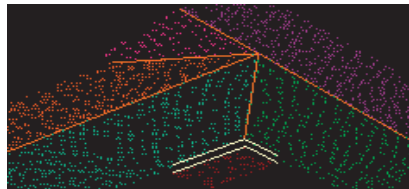


Fig. 6: Convergence of ridgelines and step-edge lines are fixed

4.3 Fixing of Outer Bounds

At this point, entire inner bounds, i.e. inner skeleton, is completely reconstructed and remained with outer bounds. Hence, entire boundary points, relevant to each building or connected components, are extracted by creating the contour of the connected segments. Then, contour is decomposed in to corresponding laser segments and straight lines are fitted to represent every possible deviation, appear within the gutter or eave edges. Distance to fitted line constraint is used to add new points to the line. Once lines are fitted, each line is generalized into orthogonal or parallel direction to the dominant direction of respective roof planes. Still our outer bounds are not coincided with inner skeleton. Therefore, outer ends of skeleton should be adjusted in order to make closed polygon boundaries. In our approach, we suppose to fix the outer ends of inner skeleton using outer most closed cycle of the RTG. For the graph G in figure 3, the outer most cycle can be obtained by taking union of all the sub cycles and the path of the outer cycle can be written with vertices in the order of $\{ 1,3,4,3,2,6,5,2,7,1 \}$. In this case, end-vertex is equal to the vertex 1. Normally, at a roof corner, two outer boundary line segments and an inner bound line (i.e. a feature line) are converged to a single position, and will be the corner position in 3D. Now,

forward walking of the outer cycle and derived list of lines can be used to fix such a roof corner or an end point of an inner skeleton. Hence, corner points can be robustly fixed using respective feature line and two outline segments, resided both sides to the ridge-line or step-edge line. When two intersection points are existed with respective feature line, then most outer point is chosen in order to compensate the size changes of the building foot print. Now, remaining intermediate outlines should be intersected sequentially in order to obtain intermediate turning points that reside in eaves or gutter edges. Finally, a valid 3D roof outline can be obtained.

5 Results and Discussion

Roof structures, shown in figure 7, depict that our experimented method can be used to generate geometrically correct, valid 3D roof boundaries in ALS data. Also, underestimation of the size of the buildings, occur due to the least square line fitting can be reduced in our approach as we enforce to select outer most intersection points during the outline fixing step. Results, in figure 7 further confirm that we can create accurate roof corners. However, some aspect would be needed to improve further, for example when more complicated step-edges are appeared in the roof tops, especially in the flat roofs. According to the roof extraction results, shown in figure 1, it says that some vegetation patches have been misguided our extraction result. Hence, some additional attributes should be adopted to discriminate vegetation patches such as flower beds from the building roofs.



Fig. 7: Sample roof structures: Simple hip roof (left), L-shaped roof with a connected roof by a height jump (middle), Multi-level gable roof (right)

6 Conclusion

This paper presents a new approach to generate 3D roof structures using data driven concepts. The main contribution that we have done is to introduce the usage of cycle graph analysis for obtaining topologically correct roof boundaries. This will be a sound alternative for the limitations of existing sub graph matching process as well. The method can be further improved by integrating 2D building plans or image data. As the method is still being developed, a comprehensive analysis with our developed version of the approach will be discussed in future. In addition to that, the final result of our approach will be assessed by the organizers of the ISPRS Test Project on Urban Classification and 3D Building Reconstruction 2012.

Acknowledgement

The Vaihingen data set was provided by the German Society for Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation (DGPF) [Cramer,2010]: <http://www.ifp.uni-stuttgart.de/dgpf/DKEP-Allg.html> (in German). The authors wish to thank the Organizers of the ISPRS Commission III/4 for distributing the ALS point clouds data and arranging the Test project on Urban Classification and 3D Building Reconstruction.

References

- AMERI, B. & FRITSCH, D., 2000: Automatic 3D building reconstruction using plane-roof structures, ASPRS, Washington DC.
- BRENNER, C. & HAALA, N.: 1998. Fast reality production of Virtual Reality City Models. IAP, Vol. 32, Part 4.
- DIESTEL, R., 2010: Graph Theory. Springer-Verlag, Heidelberg, p. 451.
- 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): pp. 7323-7343.
- ISPRS COMMISSION III, 2011: "ISPRS Test Project on Urban Classification and 3D Building Reconstruction".http://www.isprs.org/news/announcements/110314_ISPRS_Intercomparis-on-Flyer.pdf (08.01.2012).
- MAAS, H.G. & VOSSELMAN, G., 1999: Two algorithms for extracting building models from raw laser altimetry data, *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, **54**(2-3): pp. 153-163.
- MILDE, J., ZHANG, Y., BRENNER, C., PLUEMER, L. & SESTER, M., 2008: Building Reconstruction using Structural Description based on a Formal Grammar. In: *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXVII, part 3B: pp. 227-232.
- OUDE ELBERINK, S., 2009: Target graph matching for building reconstruction. In *Laserscanning 2009; International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences: Paris, France; Vol. 38*.
- OUDE ELBERINK, S., 2010: "Acquisition of 3d topography: automated 3d road and building reconstruction using airborne laser scanner data and topographic maps," Ph.D. dissertation, University of Twente, Enschede, the Netherlands.
- PERERA NIRODHA S., 2007: Segmented based filtering of LASER scanner data, Master thesis, ITC, The Netherlands.
- ROTTENSTEINER, F. & BRIESE, C., 2003: Automatic Generation of Building Models from Lidar Data and the Integration of Aerial Images. In: *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXIV, part 3/W13: on CD-ROM.
- 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 and Spatial Information Sciences*, XXXVI, 3/W19, Enschede, the Netherlands.
- SCHWALBE, E., MAAS, H.-G. & SEIDEL, F., 2005: 3D building model generation from airborne laser scanner data using 2D GIS data and orthogonal point cloud projections. In: *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol XXXVI, Part 3/W19, pp. 209-213.

- SOHN, G. & DOWMAN, I., 2007: Data Fusion of High-Resolution Satellite Imagery and LiDAR Data for Automatic Building Extraction. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 62(1): pp. 43-63.
- VERMA, V., KUMAR, R. & HSU, S., 2006: 3D Building Detection and Modeling from Aerial LIDAR Data, *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'06)*. IEEE Computer Society, Washington, DC, USA, pp. 2213-2220.
- VOSSELMAN, G., 1999: Building Reconstruction Using Planar Faces in Very High Density Height Data. In: *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXII, part 3/2W5: pp. 87-92.
- VOSSELMAN, G., GORTE, B., SITHOLE, G. & RABBANI, T., 2004: Recognizing Structure in Laser Scanner Point Clouds. In: *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXVI, part 8 / W2: pp. 33-38.

Nutzung von Nachbarschaftsinformationen zur Validierung der SAR-Tomographie

LUKAS SCHACK¹ & UWE SÖRDEL¹

Hochaufgelöste SAR-Daten bieten Bodenaufösungen im Bereich weniger Meter. Aufgrund der Schrägbeleuchtung kommt es besonders in urbanen Gebieten zu sogenannten Layover-Effekten. Dabei werden Signalanteile mehrerer Streuer unterschiedlicher Elevationen in dieselbe Auflösungszelle abgebildet. Das Ziel der Tomographie in SAR-Daten ist es, diese zu trennen und in einem weiteren Schritt bestimmten Objekten, wie beispielsweise einer Gebäudefassade, zuzuordnen. Somit kann die Auswertung von SAR-Daten um eine dritte Raumdimension, der Elevation, erweitert werden, was vielfältige Anwendungen ermöglicht. Für die Validierung werden Nachbarschaftsinformationen in Form von Elevations-Profilen über das Layover-Gebiet herangezogen. Da die SAR-Aufnahmegeometrie parallelenhaltend ist, kann angenommen werden, dass sich Geraden entlang von Objekten in den Elevations-Profilen wiederfinden lassen. Es zeigt sich, dass die Nutzung dieser Information die TomoSAR-Ergebnisse verbessert.

1 Einleitung

Die SAR-Sensoren der neueren Generation, wie beispielsweise TerraSAR-X, bieten Bodenaufösungen von bis zu 1 m x 1 m, was eine Identifizierung von Gebäudestrukturen zulässt. Aufgrund der Schrägbeleuchtung bei SAR-Sensoren kommt es besonders in urbanen Gebieten zu Überlappungseffekten (Layover), wobei sich Signalanteile verschiedener Objekte vermischen. Dies sind in Städten häufig Gebäude, deren Signale sich mit denen des Bodens mischen. Eine Herausforderung für hochaufgelöste SAR-Daten liegt daher in der Gewinnung von Informationen über die dritte Raumdimension, der Elevation. Dies ist die Motivation für Tomographie in SAR-Daten (TomoSAR), bei der mehrere Aufnahmen derselben Szene genutzt werden, um die dreidimensionale Geometrie der darin enthaltenen Objekte zu rekonstruieren. Dabei unterscheiden sich die Aufnahmepositionen nur geringfügig, da sich die Positionen des TerraSAR-X-Satelliten beim wiederholten Überfliegen einer Szene um maximal 500 m unterscheiden [D'AMICO2004]. Diese genaue Positionierung ist für viele Anwendungen vorteilhaft, führt aber bei TomoSAR zu einer Begrenzung der Elevationsauflösung p_z . Diese ist ähnlich wie die Azimutauflösung beugungsbegrenzt:

$$p_z = \frac{\lambda r}{2\Delta b_{\perp}} \quad (1)$$

mit: λ : Wellenlänge
 r : Abstand Sensor – Objekt
 Δb_{\perp} : Gesamtausdehnung der rechtwinkligen Basislinie

¹ Lukas Schack und Uwe Sörgel, Institut für Photogrammetrie und Geoinformation, Leibniz Universität Hannover, Nienburger Straße 1, 30167 Hannover
 E-Mail: schack@ipi.uni-hannover.de, soergel@ipi.uni-hannover.de

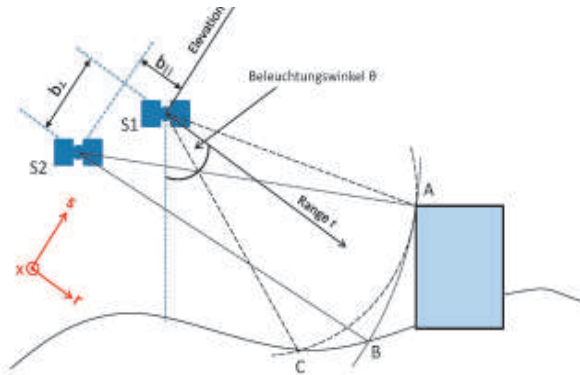


Abb. 1: TomoSAR Aufnahmegeometrie

Für den vorliegenden Stapel von 20 High Resolution Spotlight Aufnahmen des Stadtgebietes Berlin mit einer Basislinienausdehnung von rund 418 m und einer durchschnittlichen Objektentfernung von 583 km ergibt das eine Elevationsauflösung von $p_e \approx 22 \text{ m}$. Es können also nur Streuer innerhalb einer Auflösungszelle getrennt werden, die in Elevationsrichtung weiter als 22 m voneinander entfernt sind. Es existieren jedoch auch Ansätze, die nicht beugungsbegrenzt sind und bereits erfolgreich genutzt werden (ZHU 2010A).

Die mathematisch-physikalische Beschreibung der SAR-Aufnahmegeometrie ist ausführlich in (FORNARO 2003) zu finden und soll hier nur kurz dargestellt werden. Der Radarsatellit sendet zu einem Zeitpunkt ein gerichtetes Signal aus, welches sich wellenförmig ausbreitet. Das von den Objekten auf der Erdoberfläche reflektierte Signal wird vom Satelliten über dieselbe Antenne empfangen und verarbeitet. Dabei findet eine Projektion der beleuchteten dreidimensionalen Objekte in ein zweidimensionales Bildkoordinatensystem statt. In Abbildung 1 ist die Aufnahmegeometrie sowie das verwendete Koordinatensystem dargestellt. Die Azimutrichtung x fällt mit der Flugrichtung des Satelliten zusammen. Dazu orthogonal und in Blickrichtung des Sensors ist die Rangerichtung r definiert. Das Koordinatensystem wird komplettiert durch die Elevationsrichtung s . Bei der SAR-Prozessierung werden alle beleuchteten Objekte, die gleichweit vom Sensor entfernt sind, in eine Auflösungszelle abgebildet (vgl. Punkte A und C für Satellit S1 in Abbildung 1). Durch Ausnutzung von N Aufnahmen derselben Szene können diese Mehrdeutigkeiten aufgelöst werden. Alle Aufnahmen sind georeferenziert und auf eine gemeinsame Aufnahme, den „Master“, bezogen. Das gemessene Signal einer Aufnahme \mathbf{g}_n wird dann durch

$$\mathbf{g}_n = \int_{-a}^a \gamma(\mathbf{z}) \mathbf{e}^{j2\pi f_n s} d\mathbf{z} \quad (2)$$

$$f_n = \frac{2b_{\perp n}}{\lambda r}$$

mit:	$\alpha \dots \omega$:	Suchbereich in Elevationsrichtung
	s :	Elevation
	$\gamma(s)$:	Elevationsabhängiges Reflexionsprofil
	$b_{L,n}$:	Rechtwinklige Basislinie der Aufnahme n
	λ :	Wellenlänge
	r :	Abstand Sensor – Objekt

beschrieben und ist das Integral aller Streuteile in einer Auflösungszelle (FORNARO 2003). Der Suchbereich in Elevationsrichtung kann für urbane Gebiete eingeschränkt werden, wenn die maximale vorkommende Gebäudehöhe bekannt ist. Die Wellenlänge, die rechtwinkligen Basislinien sowie der Abstand des SAR-Sensors zu den Objekten sind bekannt. Somit bleibt als einzige Unbekannte das elevationsabhängige Reflexionsprofil übrig. Die Zahl der Streuer K , die signifikante Beiträge am Gesamtsignal einer Auflösungszelle haben, lässt sich einschränken: In Layover-Gebieten vermischt sich beispielsweise häufig das Signal der Fassade mit dem Signal des Bodens. Für die Rekonstruktion des Reflexionsprofils genügt in solchen Fällen die Modellierung der zwei stärksten Streuer. Somit vereinfacht sich Gleichung (2) zu:

$$g_n = \sum_{k=1}^K \gamma_k e^{j2\pi f_n s_k} \quad (3)$$

Das Reflexionsprofil hat nun an K Stellen eine von Null verschiedene und zu schätzende Amplitude γ_k mit den zugehörigen Elevationen s_k . Wird der Elevationssuchraum in 0,5 m-Schritten auf 200 m eingegrenzt, ergeben sich 401 zu bestimmende Unbekannte. Das Problem ist somit stark unterbestimmt, da aus 20 komplexwertigen Aufnahmen 401 komplexe Größen geschätzt werden sollen. Um dennoch eine Lösung zu erhalten, muss Vorwissen eingeführt oder spezielle Zusammenhänge zwischen dem gemessenen Signal und dem gesuchten Reflexionsprofil ausgenutzt werden.

2 Inversionsansätze

Der mögliche Elevationsraum ist limitiert und diskretisiert, das heißt, gesucht ist die Amplitude an endlich vielen, diskreten Stellen. Das zu lösende Problem lässt sich ausdrücken als

$$\vec{g} = L \vec{\gamma} \quad (4)$$

wobei L den linearen Operator darstellt, der das gemessene Signal \vec{g} in das Reflexionsprofil $\vec{\gamma}$ überführt. Die vollbesetzte Matrix L enthält alle möglichen Kombinationen aus Basislinien und Elevationen innerhalb des vorher definierten Suchbereichs und ist somit nur von der Aufnahmegeometrie abhängig. Um das optimale Reflexionsprofil aus der gegebenen Geometrie zu invertieren, existieren verschiedene Ansätze:

- **Singulärwertzerlegung**

Gleichung (2) zeigt, dass das gemessene Signal g_n die inverse Fouriertransformation des gesuchten Reflexionsprofils $\gamma(s)$ im Falle gleichabständiger Basislinien ist (FORNARO 2003). Somit ist die Rekonstruktion des Reflexionsprofils gleichbedeutend mit der Gewinnung des Amplitudenspektrums der gemessenen Signale. Eine Möglichkeit dafür ist die Singulärwertzerlegung des Operators L . Dies hat gegenüber der direkten Fouriertransformation den Vorteil, dass Effekte aufgrund der ungleichmäßigen Basislinienverteilung verringert werden können (ZHU 2010B). Die Singulärwertzerlegung

erlaubt eine Aufteilung des Gesamtsignals in „verlässliche“ und „unzuverlässige“ Signalanteile in Abhängigkeit der Größe der zugehörigen Singulärwerte. Das rekonstruierte Reflexionsprofil setzt sich dann als Linearkombination derjenigen Singulärvektoren zusammen, deren zugehörigen Singulärwerte kleiner als ein Schwellwert sind. Diese Methode wird abgeschnittene Singulärwertzerlegung oder Truncated Singular Value Decomposition, TSVD, genannt.

- **Schätzung nach kleinsten Quadraten**

Bei der Schätzung nach kleinsten Quadraten wird das Ausgangsproblem parametrisiert und die Unbekannten in lineare und nichtlineare Terme aufgeteilt. Dabei sind die unbekanntes Elevationen der Streuer \mathbf{s}_{i_e} in den nichtlinearen Termen der Designmatrix enthalten. Da jedoch nicht nur die Amplituden sondern auch die Elevationen der Streuer von Interesse sind, wird eine zweistufige Ausgleichung durchgeführt. Zunächst wird eine K-dimensionale Parameterraumsuche durchgeführt, wobei K die a priori festgesetzte Anzahl der Streuer ist. Dabei werden alle im Suchraum liegenden Kombinationen von Elevationen getestet. Sind die K optimalen Elevationen \mathbf{E} gefunden, können die zugehörigen Amplituden geschätzt werden. Ein wesentlicher Vorteil der Schätzung nach kleinsten Quadraten stellt die Unabhängigkeit von der beugungsbegrenzten Auflösung gegenüber den auf der Spektralzerlegung basierenden Verfahren dar. Einzig das in den Beobachtungen enthaltene Rauschen limitiert das Auflösungsvermögen dieses Ansatzes. Nachteile des Verfahrens sind die rechenzeitaufwendige K-dimensionale Parameterraumsuche, die die Anwendbarkeit in der Praxis auf zwei Streuer pro Auflösungszelle beschränkt, sowie die nötige Festlegung der Anzahl der Streuer.

- **Compressive Sensing**

Die Annahme, dass sich nur wenige dominante Streuer in einer Auflösungszelle befinden, führt zu einem dünnbesetzten Reflexionsprofil. Compressive Sensing (CS) ist eine Technik, die es ermöglicht, Signale mit bestimmten Eigenschaften dünnbesetzt zu repräsentieren. Im Falle von TomoSAR wird das dünnbesetzte Reflexionsprofil aus nur wenigen Beobachtungen geschätzt. Es liegt ein unterbestimmtes Gleichungssystem vor. Der Ansatz des Compressive Sensing ist es, eine kombinierte L2-L1-Norm-Minimierung durchzuführen. Gesucht ist somit

$$\gamma_{CS} = \operatorname{argmin}_{\gamma} \{ \|\mathbf{g} - \mathbf{L}\gamma\|_2^2 + \lambda_K \|\gamma\|_1 \} \quad (5)$$

mit: λ_K : Gewichtungsfaktor.

Die L2-Norm minimiert die Residuen zwischen Beobachtungen und Modell (vgl. Schätzung nach kleinsten Quadraten), während die L1-Norm diejenige Lösung aus der beliebig großen Lösungsmenge wählt, die möglichst dünnbesetzt ist. Dies stellt ein komplexes Optimierungsproblem dar, welches sich durch Umformungen linear lösen lässt (DONOHO). Das Auflösungsvermögen dieses Verfahren ist wie die Schätzung nach kleinsten Quadraten nicht beugungsbegrenzt.

3 Nutzung von Nachbarschaftsinformationen

Für die gewinnbringende Nutzung der dritten Dimension in SAR-Bildern ist die Information aus einer einzelnen Auflösungszelle oft nicht ausreichend, da das Interesse häufig in der flächenhaften Auswertung eines Gebietes liegt. Ein erster Schritt in diese Richtung stellt die

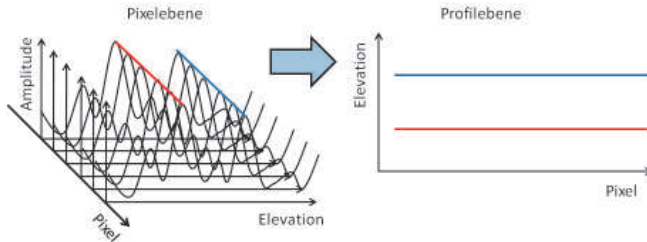


Abb. 2: Übergang auf Profilebene.

Betrachtung von Elevations-Profilen statt einzelnen Auflösungszellen dar. Abbildung 2 zeigt diesen Übergang schematisch.

In SAR-Aufnahmen erkennbare Gebäudestrukturen sind zumeist Fassaden, deren Fenster horizontal sowie vertikal regelmäßig entlang einer Geraden angeordnet sind. Da die SAR-Aufnahmegeometrie parallelentreu ist, werden Geraden im Objektraum als Geraden in den SAR-Aufnahmen abgebildet. Abbildung 3 zeigt schematisch den Elevationsverlauf zweier Profile, die aufgrund von Layover-Effekten im SAR-Bild nicht trennbar wären. Je nach Orientierung des Profils ergibt sich ein anderer Elevationsverlauf der Objekte. Benachbarte Streuer desselben Objektes liegen auf demselben Geradenabschnitt und haben somit dieselbe Steigung. Auf dieser Eigenschaft basiert die Nutzung von Nachbarschaftsinformationen zur Validierung der Reflexionsprofile.

Das Ziel der Nutzung von Nachbarschaftsinformationen ist die Extraktion von Geradenabschnitten in den Profilen über Fassaden. Vereinzelt Streuer, die eine stark abweichende Elevation von denen ihrer Nachbarn haben, sollen verworfen werden. Auf diese Weise werden Elevationsprofile über Fassaden erhalten, die nur die Streuer beinhalten, die zu fortgesetzten Geradenabschnitten gehören. In einem weiteren Schritt können dann Methoden der Merkmalsextraktion angewandt werden, um beispielsweise die durchschnittliche Elevation einer Fensterreihe zu bestimmen.

Als Nachbarschaft des zu überprüfenden Streuers werden die Streuer in den zwei vorherigen sowie zwei nachfolgenden Auflösungszellen betrachtet. Dabei werden Auflösungszellen übergangen, deren Signal-Rausch-Verhältnis zu gering ist, das heißt, deren Signalphase über den Aufnahmestapel nicht stabil genug sind. Ein Toleranzwinkel δm muss definiert werden, in dem der nächste Streuer liegen muss, damit er zur Gerade gehörig angesehen wird:

$$m_{i-1} - \delta m \leq m_i \leq m_{i-1} + \delta m \quad (6)$$

Ist dies der Fall, wird eine Bewertungsvariable inkrementiert. Ein Streuer wird dann als zu einem Geradenabschnitt gehörig angesehen, wenn dieselbe Steigung mindestens zweimal innerhalb seiner Nachbarschaft gefunden wird. Der Toleranzwinkels δm ist so zu wählen, dass einerseits genügend Streuer zu Geradenabschnitten zusammengeführt werden können und andererseits Ausreißer detektiert werden. Hier bietet sich ein Schwellwert in Abhängigkeit der globalen Varianz der Steigung an. Auch die Größe der lokalen Nachbarschaft hat auf beide Aspekte Einfluss. Es zeigt sich, dass die Betrachtung von insgesamt fünf Auflösungszellen günstig ist, um

einerseits eine Robustheit gegenüber Ausreißern zu erreichen und andererseits genügend Flexibilität für die Erfassung von wechselnden Geradenabschnitten bietet.

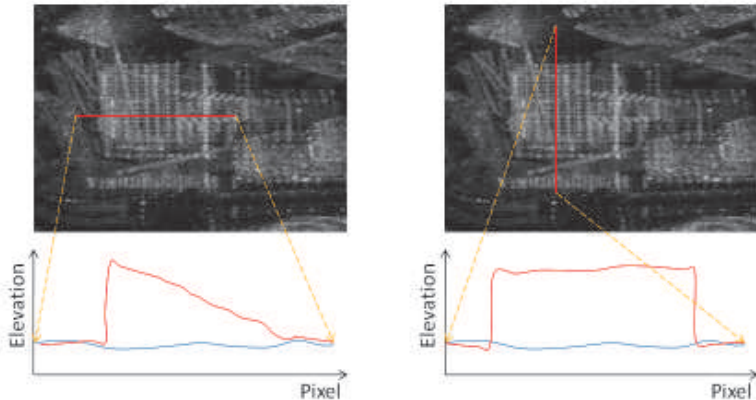


Abb. 3: Elevationsverlauf über Fassade in Layovergebiet. Blau: Signal vom Boden. Rot: Signal vom Gebäude.

4 Ergebnisse

Abbildung 4 zeigt die Ergebnisse der drei vorgestellten Inversionsalgorithmen mit je zwei Streuern in einer Auflösungszelle. Um das Auflösungsvermögen der Algorithmen unter realistischen Bedingungen vergleichen zu können, werden die Signale simuliert und ein gaußverteiltes Rauschen der relativen Amplitude 0,2 addiert. Der Abstand zwischen den beiden Streuern beträgt 50 m (a) beziehungsweise 20 m (b) bei einer konstanten Basislinienausdehnung von 418,5 m. Das auf der Spektralzerlegung basierende Verfahren TSVD liefert ein kontinuierliches und Compressive Sensing ein an nur wenigen von Null verschiedenes Reflexionsprofil. Da bei der Schätzung nach kleinsten Quadraten die Anzahl der Streuer a priori auf zwei festgelegt wurde, liefert dieses Verfahren zwei diskrete Vektoren als Ergebnis. Im Falle der 50 m voneinander entfernten Streuer liefern alle Inversionsalgorithmen die richtigen Elevationen. Das beugungsbegrenzte TSVD hat seine Auflösungsgrenze bei etwa 22 m. Somit können die nur 20 m voneinander entfernten Streuer nicht aufgelöst werden (b). Hier zeigen sich die Vorteile der nicht beugungsbegrenzten Verfahren. Die Schätzung nach kleinsten Quadraten sowie CS können die Streuer trennen. Die teilweise über- oder unterschätzte Amplitude ist hier nur zweitrangig, da das Hauptinteresse der meisten Anwendungen in der Rekonstruktion der Elevation liegt. CS bietet Elevations-Auflösungen von bis zu wenigen Metern in Abhängigkeit vom Rauschen.

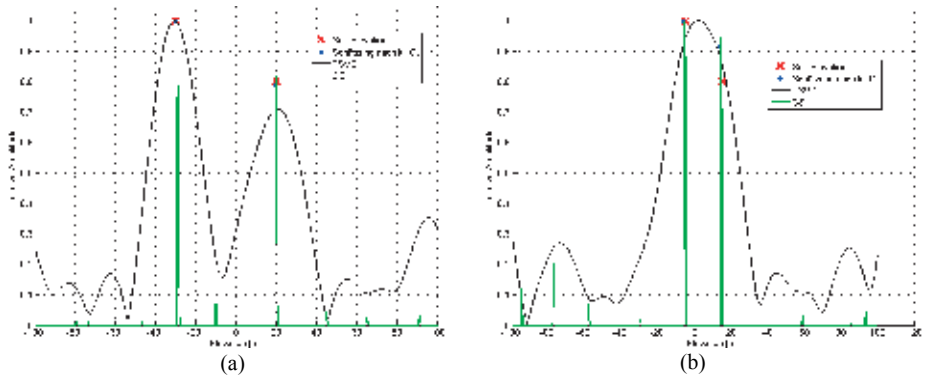


Abb. 4: Reflexionsprofile für Auflösungszelle mit zwei Streuern. (a): Streuer-Elevationen: -30 m und +20 m. Alle Verfahren können die Streuer trennen. (b): Streuer-Elevationen: -5 m und +15 m. Nur die nicht auf der Spektralzerlegung basierenden Verfahren können die Streuer trennen.

Die Nutzung von Nachbarschaftsinformationen bringt eine deutliche Verbesserung der Ergebnisse hinsichtlich der Extraktion von Geradenstrukturen. Abbildung 5 zeigt ein Nord-Süd-Profil über die Fassade des in Abbildung 3 dargestellten Gebäudes. Sowohl Streuer vom Boden als auch vom Gebäude sind als Geraden im Profil zu erkennen. Neben diesen sind Streuer sichtbar, die weder der einen noch der anderen Gerade eindeutig zugeordnet werden können. Nach Ausnutzung der Nachbarschaftsinformation bleiben diejenigen Streuer erhalten, die zusammen mit ihren Vorgängern und Nachfolgern auf einer Geraden liegen.

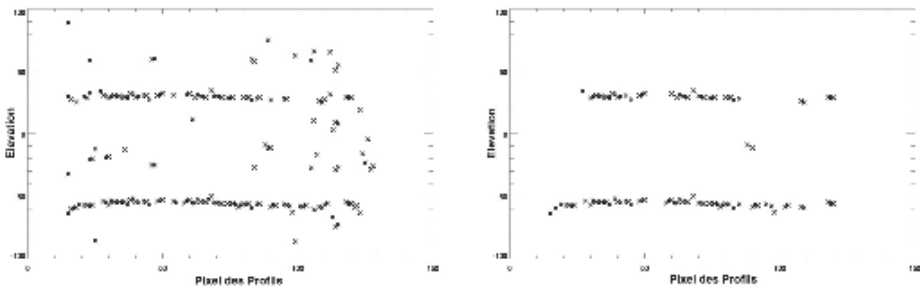


Abb. 5: Profil über Fassade mit (links) und ohne Berücksichtigung der Nachbarschaftsinformationen (rechts).

5 Zusammenfassung und Ausblick

Ein Vergleich der drei vorgestellten Inversionsansätze zeigt, dass das auf der Spektralzerlegung basierende Verfahren für viele Anwendungsgebiete keine genügend hohe Auflösung bietet. Da die Schätzung nach kleinsten Quadraten sehr rechenintensiv ist und die Anzahl der Streuer a priori festgelegt werden muss, bietet Compressive Sensing das größte Potential für die Rekonstruktion dünnbesetzter Reflexionsprofile.

Durch die Nutzung von Nachbarschaftsinformationen können Geradenstrukturen in Elevationsprofilen erfolgreich extrahiert werden. Da Gebäude und andere Strukturen in urbanen Gebieten häufig durch gerade Strukturen beschrieben werden können und das Interesse zumeist in der Extraktion von Gebäudestrukturen aus SAR-Daten liegt, stellt der hier vorgestellte Ansatz einen Beitrag zur verbesserten Nutzung von TomoSAR-Daten dar. In einem weiteren Schritt können auch mehrere Profile parallel über ein Gebäude betrachtet werden und von Geraden auf flächenhafte Informationsextraktion übergegangen werden. Denn auch die Steigungen der Geradenabschnitte mehrerer Profile müssen untereinander in einem ähnlichen Bereich liegen. Dies ist eine mögliche Erweiterung der Nachbarschaftsbetrachtung und bietet Ansatzpunkte für künftige Arbeiten.

6 Literaturverzeichnis

- D'AMICO, S.; ARBINGER, C.; KIRSCHNER, M. & CAMPAGNOLA, S., 2004: Generation of an Optimum Target Trajectory for the TerraSAR-X Repeat Observation Satellite, in: 18th International Symposium on Space Flight Dynamics (ESA Special Publication), Bd. 548, S. 137ff
- Donoho, D., 2006: Compressed sensing, in: IEEE Transactions on Information Theory, Vol 52, No 4, S. 1289-1306
- FORNARO, G.; SERAFINO, F. & SOLDOVIERI, F., 2003: Three-dimensional focusing with multipass SAR data, in: IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 41, No. 3, S. 507-517
- ZHU, X. X. & BAMLER, R., 2010A: Tomographic SAR Inversion by L1-Norm Regularization – The Compressive Sensing Approach, in: IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol 48, No. 10, S. 3839-3846
- ZHU, X. X. & BAMLER, R., 2010B: Very High Resolution Spaceborne SAR Tomography in Urban Environment, in: IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol 48, No. 12, S. 4296-4308

Der Einfluss der Atmosphäre bei der Erfassung von Höhenänderungen mit differentieller Radarinterferometrie

MICHAEL SCHÄFER¹

Die differentielle Interferometrie mit satellitengestützten Radarfernerkundungsdaten hat sich für die Erfassung von Verformungen der Erdoberfläche etabliert. Das Verfahren ermöglicht prinzipiell Messgenauigkeiten im Millimeterbereich, wodurch es neben vielen geowissenschaftlichen Fragestellungen auch für geodätische Messungen interessant ist. Für das Erreichen hoher Messgenauigkeiten müssen jedoch Fehlereinflüsse in den Daten bekannt sein und möglichst vermieden werden. Dieser Beitrag befasst sich mit dem Einfluss der Erdatmosphäre auf die Radarinterferometrie. Vorgestellt wird ein Verfahren, welches die Ermittlung der atmosphärischen Phasenverschiebung zu einem einzelnen Zeitpunkt ermöglicht, berechnet auf Grundlage einer Zeitreihe von Radaraufnahmen. Gezeigt werden visuelle Vergleiche mit optischen Fernerkundungsdaten sowie jahreszeitliche und sensor-spezifische Unterschiede in der Ausprägung der Atmosphäre.

1 Einführung

Radardaten von satellitengetragenen Synthetic Aperture Radar (SAR) Sensoren haben sich zur Erfassung von Höhenänderungen der Erdoberfläche mittels differentieller Interferometrie bewährt. Bei sehr großflächigen und/oder geringen Höhenänderungen im Millimeterbereich kann jedoch zu gewissen Zeitpunkten der atmosphärische Phasenanteil nicht oder nur schwer von dem deformationsbedingten Phasenanteil unterschieden werden. Verschiedene Einflussfaktoren innerhalb der Atmosphäre können zu einer Pfadverlängerung der elektromagnetischen Wellen führen, die eine zusätzliche räumlich korrelierende Phasenverschiebung in Interferogrammen bewirken. Hierbei spielen vor allem lokale Feuchtigkeitsunterschiede in der Troposphäre (für Daten im X- und C-Band), sowie lokale Inhomogenitäten der Ionosphäre (für das L-Band) eine bedeutende Rolle. Diese können kleinräumig stark variabel auftreten und somit leicht mit Höhenänderungen verwechselt werden bzw. geringfügige Höhenänderungen überdecken.

Differentielle Interferogramme zeigen immer die Überlagerung von den beiden Zuständen der Erdatmosphäre zu den zwei Aufnahmezeitpunkten eines Interferogramms. Gezeigt wird ein Verfahren, mit dem der atmosphärische Einfluss für jeden Zeitpunkt eines Datenstapels von SAR-Szenen ermittelt werden kann. Hiermit wurden die atmosphärischen Auswirkungen auf die Daten von vier Datenstapeln dreier Sensoren (TerraSAR-X, ENVISAT ASAR und ALOS PAL-SAR) untersucht. Zudem wurden visuelle Vergleiche mit optischen Daten (METEOSAT MSG und ENVISAT MERIS) durchgeführt. Die beobachteten Unterschiede wurden hinsichtlich ihrer jahreszeitlichen Änderungen statistisch ausgewertet.

1) Dipl.-Geol. Michael Schäfer, TU Clausthal, Institut für Geotechnik u. Markscheidewesen, Erzstraße 18, 38678 Clausthal-Zellerfeld, E-Mail: michael.schaefer@signale.de, WWW: <http://radar.signale.de>

Die Untersuchungen wurden anhand von SAR-Daten des Südraums von Leipzig durchgeführt. Hier kommt es durch die Flutung aufgelassener Braunkohletagebaue in enger räumlicher Nachbarschaft mit der Entwässerung von zwei aktiven Tagebauen zu leichten Hebungen und Senkungen der Geländeoberfläche. Beide Prozesse verursachen im Untersuchungsgebiet in der Regel nur geringe Höhenänderungsraten von maximal einem Zentimeter pro Jahr.

2 Atmosphäre in differentiellen Interferogrammen

Die Erdatmosphäre besitzt einen bedeutenden Einfluss auf die Ausbreitung elektromagnetischer Wellen. Dabei spielen insbesondere kleinräumige Inhomogenitäten in der Troposphäre, vor allem bedingt durch das Wetter, eine Rolle. Beispielsweise führen Bereiche mit abweichender Temperatur, Luft- und/oder Wasserdampfdruck zu Refraktionsunterschieden (z.B. in Form von Wolken). Refraktionsunterschiede führen einerseits zu einer direkten Wellenverzögerung durch die Verringerung der Ausbreitungsgeschwindigkeit, andererseits durch die geometrische Änderung des Weges der Wellenfront. Ferner können Hydrometeore (z.B. Regentropfen) zu einer Wellenverzögerung durch Streuung führen. Des Weiteren bewirken unterschiedliche Elektronendichten in der Ionosphäre eine Änderung der Refraktion, welche jedoch lediglich auf langwellige Radarstrahlung (bspw. ALOS im L-Band) signifikante Auswirkungen hat.

Nach HANSSEN (2001) können zwei übergeordnete Ursachen für troposphärisch bedingte Phasenverschiebungen unterschieden werden: Turbulente Durchmischungsprozesse, die zu einer räumlichen Heterogenität der Refraktion führen, sowie die vertikale Schichtung der Atmosphäre, die zu Phasenverschiebungen in bergigen Gebieten führt. Letztere kommt vor allem im Gebirge vor und korreliert mit der Topographie. Da die in dieser Arbeit untersuchten Gebiete lediglich eine geringe Orographie aufweisen, werden im Folgenden nur die durch turbulente Durchmischungsprozesse (also durch das Wetter) bedingten Auswirkungen der Atmosphäre behandelt. Der atmosphärische Phasenbestandteil kann sich in differentiellen Interferogrammen durch ebene Trends und durch räumlich korrelierende Phasenwerte in der Größenordnung weniger hundert Meter bis zu mehreren zehner Kilometern äußern.

Differentielle Interferogramme zeigen immer die Differenz zwischen den atmosphärischen Zuständen zu den beiden Aufnahmezeitpunkten. Von Belang ist nicht die absolute Beeinflussung durch die Atmosphäre, sondern lokale Unterschiede zwischen den Aufnahmen. Abb. 1 zeigt schematisch die Auswirkungen verschiedener Wetterlagen auf differentielle Interferogramme. Die Zeitpunkte A und B weisen völlig unterschiedliche Wetterlagen auf, die jedoch im Interferogramm $A_B = B - A$ keine lokalen Inhomogenitäten verursachen. Zu Zeitpunkt C herrscht dagegen eine kleinräumige Atmosphäre vor, die im Interferogramm B_C Phasenverschiebungen ähnlich wie Senkungsgebiete bewirkt. Im zeitlich nachfolgenden Interferogramm C_D zeigen sich die gleichen Strukturen, jedoch auch mit einem umgekehrten Vorzeichen (und erscheinen nun wie Hebunggebiete). Zusätzlich beinhaltet Interferogramm C_D die Atmosphäre zum Zeitpunkt D. Diese bewirkt positive Phasenwerte, welche sich mit der Atmosphäre aus Zeitpunkt C durch Subtraktion überlagern. Werden die Interferogramme miteinander verrechnet (z.B. im Zuge eines Stapelungsverfahrens) rechnet sich somit die Atmosphäre eines Zeitpunkts wieder heraus. Der Referenzzeitpunkt des Stapels bzw. bei der Persistent Scatterer Interferometrie (PSI) sollte jedoch möglichst frei von Atmosphäre sein.

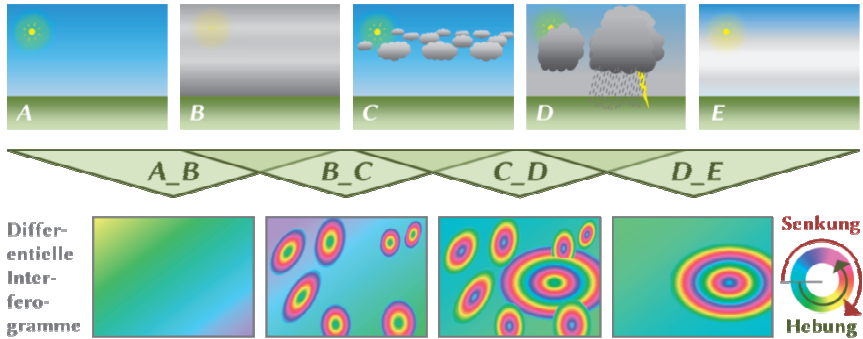


Abb. 1: Schematische Auswirkungen verschiedener Wetterlagen auf differenzielle Interferogramme

3 Detektion der atmosphärischen Phasenverschiebung

Differenzielle Interferogramme zeigen immer die Überlagerung der atmosphärischen Signale zu den zwei Aufnahmezeitpunkten. Die im Folgenden gezeigten atmosphärischen Phasenverschiebungen wurden mit einem eigenentwickelten Verfahren ermittelt, welches erstmals in SCHÄFER & HANNEMANN (2010) veröffentlicht wurde. Mit dem Verfahren ist es möglich, atmosphärische Phasenverschiebungen zu jedem einzelnen Zeitpunkt eines Datenstapels zu ermitteln.

Die Berechnungen basieren auf einem Datenstapel von SAR Szenen zu verschiedenen Aufnahmezeitpunkten. Hiervon wird ein Multi-Referenz-Stapel von Interferogrammen gebildet, d.h. unter Berechnung sämtlicher Kombinationsmöglichkeiten. Die differenziellen Interferogramme werden mittels der sogenannten Two-Pass Interferometrie erzeugt, wobei bei Bedarf eine räumliche Mittelung durch sogenanntes Multilooking erfolgen kann. Die interferometrischen Eingangsdaten können sowohl rasterbasiert (DInSAR), als auch punktbasiert (PSI) sein. Dabei besitzt das neue Verfahren den großen Vorteil, dass Mehrdeutigkeiten der im Bereich $-\pi \dots +\pi$ gemessenen Phasenwerte nicht zuvor räumlich oder zeitlich gelöst werden müssen. Dieser Schritt der Phasenabwicklung (Phase Unwrapping) ist oftmals problematisch, vor allem für Bereiche mit geringer interferometrischer Kohärenz. Alle Interferogramme, bei denen ein bestimmter Zeitpunkt in die Berechnung eingeflossen ist (entweder als Master oder als Slave), beinhalten auch das atmosphärische Signal dieses Zeitpunkts sowie das eines weiteren Zeitpunkts. Durch Mittelwertbildung der Phasenwerte dieser Interferogramme bleibt die in jedem Interferogramm vorherrschende atmosphärische Phase des gewählten Zeitpunkts erhalten, wohingegen die übrigen atmosphärischen Phasenanteile zu allen anderen Zeitpunkten nur ein einziges Mal auftreten und im Mittel null ergeben. Der Wegfall der Phasenabwicklung ist der hauptsächlichliche Unterschied (und Vorteil) des hier vorgeschlagenen Ansatzes zu einem ähnlichen von LEIJEN & HANSEN (2004) beschriebenen Verfahren. Hierdurch ist es möglich, sämtliche (z.T. weit über tausend) Interferogrammkombinationen zu nutzen, was durch eine vorher nötige Phasenabwicklung erschwert würde. Für weitergehende Informationen s. SCHÄFER (2012).

Ein Beispiel für die ermittelte atmosphärische Phasenverschiebung ist in Abbildung 2 (links) gegeben. Nach der Ermittlung können die atmosphärischen Phasenverschiebungen abgewickelt werden, um absolute Phasenwerte zu erhalten. Hierbei sind die vorherige räumliche Filterung der Phasenwerte sowie die Ausmaskierung dekorrelierter Bereiche sinnvoll. Die so erzeugten abgewickelten Phasenwerte können in Verschiebungsbeträge in Blickrichtung des Satelliten (in Line of Sight, LOS) umgerechnet werden.

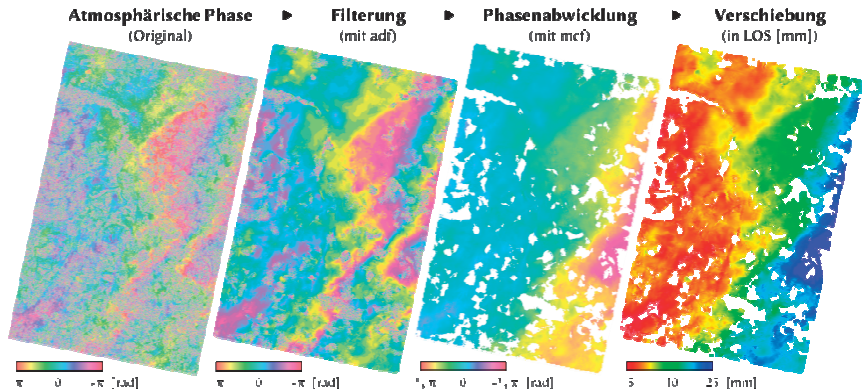


Abb. 2: Prozessierungskette von atmosphärischer Phasenverschiebung zu LOS Verschiebung am Beispiel der TerraSAR-X Descending Szene vom 11.09.2009

4 Vergleich mit optischen Satellitendaten

Für visuelle Vergleiche standen Bilddaten der geostationären Wettersatelliten METEOSAT Second Generation (MSG) zur Verfügung. Der direkte Vergleich erweist sich als schwierig, da die Daten im Gegensatz zu den SAR Daten eine stark unterschiedliche geometrische Auflösung besitzen (mehrere Kilometer im Vergleich zu wenigen Metern). Zudem wurden sie zu leicht unterschiedlichen Aufnahmezeitpunkten erfasst (führt zu einem zeitlichen Versatz durch die Bewegung der der Wolken), sowie in einer stark abweichenden Aufnahmegeometrie (Blickrichtung und -winkel). Beides führt zu einem räumlichen Versatz von bspw. Wolken zwischen den optischen Bildern und SAR Aufnahmen. Drei Beispiele für METEOSAT MSG sind in den Abbildungen 3-5 gegeben.

Zusätzlich standen Daten des Sensors MERIS an Bord von ENVISAT zur Verfügung. Diese wurden zeitgleich mit den SAR Daten von ENVISAT ASAR aufgezeichnet und besitzen zudem die identische Aufnahmegeometrie. In Verbindung mit der deutlich höheren Bodenaufklärung von ca. 300 m erlauben die MERIS Daten somit einen weitaus besseren visuellen Vergleich mit den ermittelten atmosphärischen Phasenverschiebungen. Beispiele für ENVISAT MERIS Daten siehe Abbildungen 4 und 5.

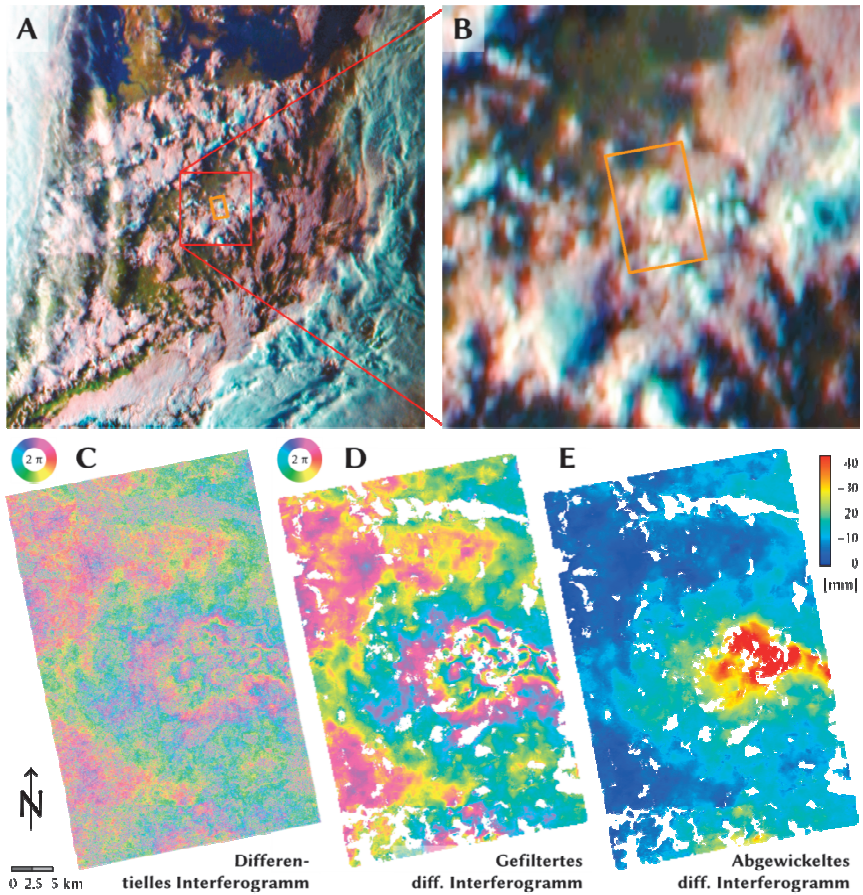


Abb. 3: Vergleich zwischen METEOSAT MSG (A und B) und atmosphärischer Phasenverschiebung von TerraSAR-X zum Zeitpunkt 04.04.2011 (C – E, Abdeckungsbereich s. gelbes Rechteck in A und B)

Abbildung 3 zeigt exemplarisch den Vergleich zwischen einer METEOSAT Aufnahme und der nahezu zeitgleichen SAR Aufnahme von TerraSAR-X am 04.04.2011. Das METEOSAT Bild zeigt im Bereich der Radarszene eine hochreichende Gewitterwolke (Cumulonimbus) mit Eisschirm (cyanfarben). Diese führt in den SAR Daten zu einer Phasenverschiebung um bis zu -5 cm im Vergleich zu ihrer Umgebung. Im Süden der SAR Szene deutet sich bereits der Rand der nächsten Gewitterzelle an, welche ebenfalls in der MSG Aufnahme zu erkennen ist.

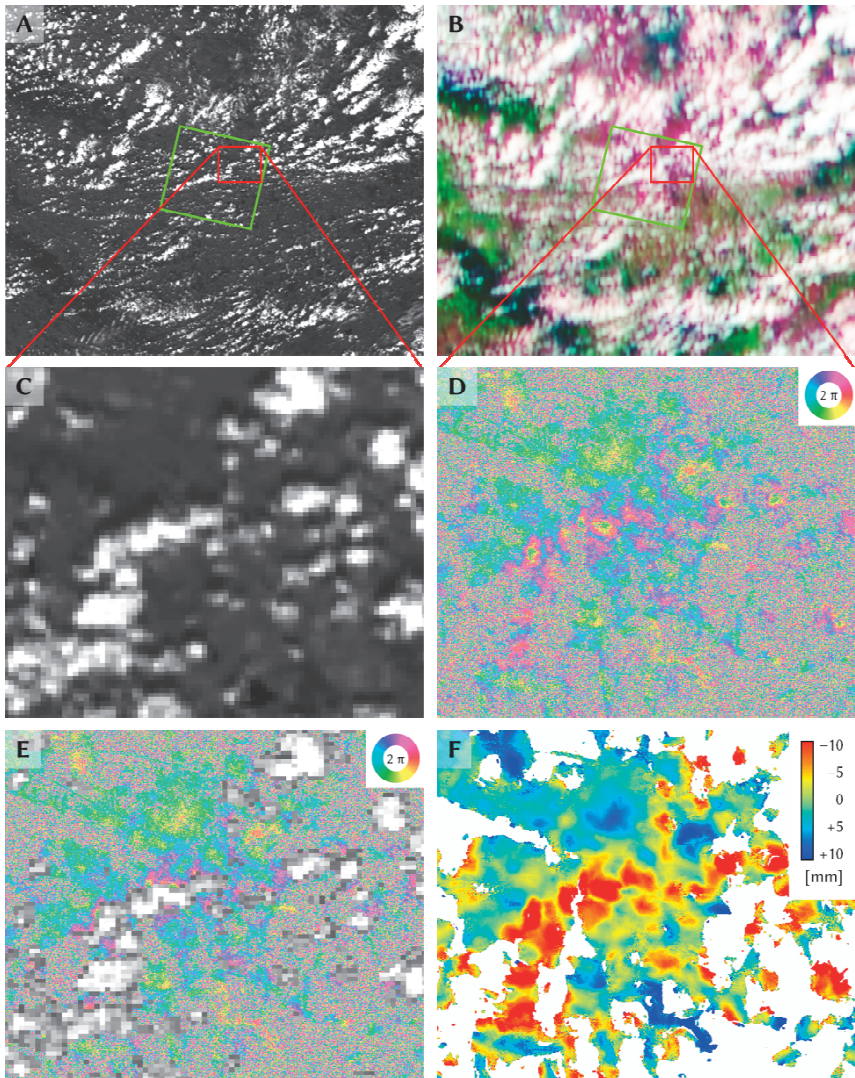


Abb. 4: Vergleich zwischen ENVISAT MERIS Kanal 9 (A, C und E), METEOSAT MSG (B) und der ermittelten atmosphärischen Phasenverschiebung von ENVISAT ASAR (D – F) zum Zeitpunkt 16.07.2009

In Abbildung 4 ist am Beispiel von ENVISAT ASAR Daten ein Vergleich zwischen den optischen Daten von METEOSAT MSG und ENVISAT MERIS dargestellt. Die MERIS Aufnahme (A) vermittelt einen Überblick über die vorherrschende Wetterlage, überwiegend bestehend aus kleineren Cumuluswolken, welche bereichsweise größere Wolkenstraßen bilden. Bild B zeigt den gleichen Ausschnitt wie Bild A, jedoch mit Daten von METEOSAT MSG, welcher die kleinräumigen Wolken aufgrund der geringeren Bodenauflösung nur unzureichend vermittelt. Die Bilder C bis F zeigen in Vergrößerung das Stadtgebiet von Leipzig. Die Überlagerung mit dem ENVISAT MERIS Produkt „Cloud Albedo“ in Bild E zeigt eine gute Übereinstimmung mit den ermittelten Phasenverschiebungen, welche in Bild F in Verschiebungsbeträge in Millimetern entlang LOS Richtung umgerechnet wurden.

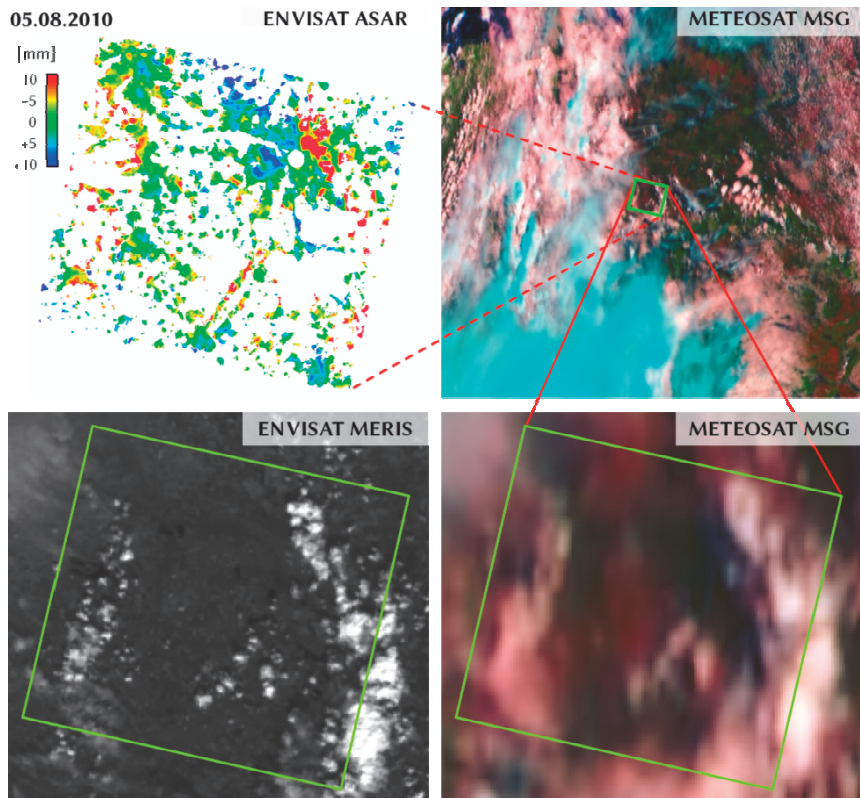


Abb. 5: Vergleich zwischen ENVISAT MERIS Kanal 9 und METEOSAT MSG mit der ermittelten atmosphärischen Phasenverschiebung von ENVISAT ASAR zum Zeitpunkt 05.08.2010

Ebenfalls eine gute Übereinstimmung mit optischen Fernerkundungsdaten weist die ASAR Szene vom 05.08.2010 auf. Die Überlagerung im GIS zeigt, dass sich jede negative atmosphärische Phasenverschiebung eindeutig mit einer Wolke erklären lässt. Diese Phasenverschiebungen sind allerdings nur in den kohärenten Gebieten von städtischen Bereichen sichtbar. Interessanterweise zeigen die Abbildungen 4 und 5 nicht nur die erwartete Pfadverlängerung durch den Einfluss der Wolken, welche sich in negativen Werten äußern und damit bei der Ermittlung von Höhenänderungen eine Senkung vortäuschen würden. Zusätzlich existieren zwischen den Wolken Bereiche mit positiven Werten, die eine relative Pfadverkürzung in diesem Bereich bedeuten (entsprechend einer Hebung). Über die Ursache für die Pfadverkürzung kann nur spekuliert werden. Vermutlich befinden sich zwischen den Wolken Bereiche mit einem geringeren Brechungsindex, die nicht in den optischen Daten ersichtlich sind.

5 Vergleich mit Winddaten

Die detektierte atmosphärische Phasenverschiebung lässt sich auch mit Winddaten vergleichen. Voraussetzung hierfür sind atmosphärische Strukturen, die sich nach dem Windeinfluss ausrichten. Hierfür eignen sich Abgasfahnen eines Kraftwerkes. Abbildung 6 zeigt einen $3 \square \times 4 \square \text{ km}^2$ großen Bereich um das Braunkohlekraftwerk Lippendorf südlich Leipzig.

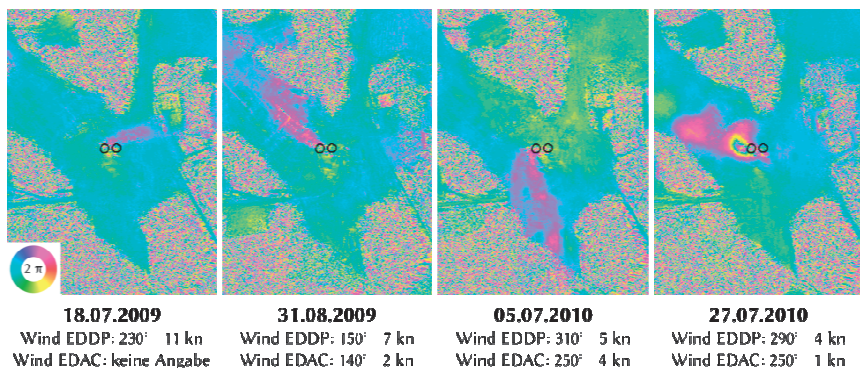


Abb. 6: Vergleich von atmosphärischer Phasenverschiebung von TerraSAR-X mit Winddaten im Bereich des Braunkohlekraftwerks Lippendorf (die schwarzen Kreise zeigen die Lage der beiden Kühltürme)

Verwendet wurden Winddaten aus METAR Wettermeldungen der zwei Flugplätze EDDP (Leipzig/Halle Airport, 28 km von Lippendorf entfernt) und EDAC (Leipzig-Altenburg Airport, Entfernung 25 km). Aufgrund der Höhe der Kraftwerkstürme von 174,5 m über Grund, sowie der Schrägsicht des Satelliten (von Osten nach Westen) und der Steigung der Abgasfahne (je nach Windstärke) werden die Phasenverschiebungen zum Teil auf der Erdoberfläche nach Westen versetzt abgebildet und korrelieren nicht direkt mit den beobachteten Windrichtungen.

Anhand von insgesamt 136 ENVISAT und TerraSAR-X Szenen konnte am Kraftwerk Lippendorf eine maximale Phasenverschiebung von 10 rad entsprechend 25 mm in LOS beobachtet werden (siehe Zeitpunkt 27.07.2010 in Abb. 6). Starke Phasenverschiebungen kommen vor allem bei schwachen Windgeschwindigkeiten vor. Bei stärkeren Windgeschwindigkeiten erscheint der beeinflusste Bereich schwächer und länglich erstreckt mit einer durchschnittlichen Phasenverschiebung um 2 rad (entsprechend ca. 5 mm).

6 Jahreszeitliche und sensorspezifische Ausprägungen der Atmosphäre

In SCHÄFER (2012) wurden insgesamt zehn verschiedene Parameter untersucht, die eine Charakterisierung und den Vergleich von atmosphärischen Phasenverschiebungen zu verschiedenen Zeitpunkten erlauben. Im Folgenden wird lediglich der Parameter „Spannweite_global“ gezeigt, der als Interquartilsabstand $Q_{98} - Q_{02}$ aller beobachteten Phasenverschiebungen zu einem Zeitpunkt definiert wurde. Die Parameter dienen der Charakterisierung von atmosphärischen Zuständen und ermöglichen zudem den statistischen Vergleich zwischen verschiedenen Zeitpunkten und zwischen den Sensoren.

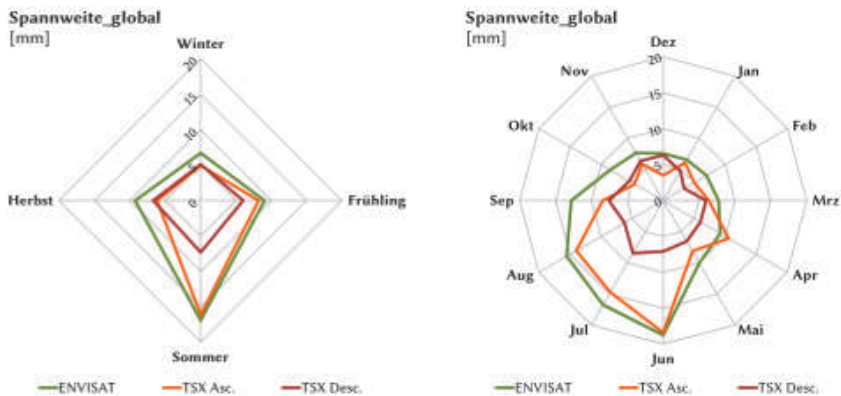


Abb. 7: Jahreszeitlicher und monatlicher Vergleich von Mittelwerten des Parameters Spannweite_global zwischen den drei SAR Datenstapeln von ENVISAT ASAR, TerraSAR-X Ascending und Descending

Abbildung 7 zeigt jahreszeitliche und monatliche Mittelwerte in der atmosphärischen Ausprägung der untersuchten SAR Datenstapel im Bereich Leipzig. Diese sind wie für die Nordhalbkugel zu erwarten im Winter am niedrigsten und im Sommer am höchsten. Zudem zeigen sich Unterschiede zwischen den Datenstapeln, welche sich vor allem durch die unterschiedlichen Tageszeiten ergeben, zu denen die SAR Daten aufgenommen wurden. Dabei zeigt der um 05:34 UTC (MEZ – 1 Std.) aufgenommene Descending Stapel von TerraSAR-X eine viel geringere atmosphärische Beeinflussung, als der um 16:52 UTC aufgezeichnete

Ascending Stapel. ENVISAT ASAR weist trotz einer Aufnahmezeit um 09:36 UTC eine leicht höhere Beeinflussung auf als TerraSAR-X Ascending.

Die (in Abb. 7 nicht dargestellten) statistischen Ergebnisse für ALOS PALSAR unterscheiden sich deutlich von den anderen drei Datenstapeln. Aufgrund ihrer Wellenlänge und der Aufnahmetageszeit um 21:40 UTC zeigen diese eher kleinräumige Inhomogenitäten der Ionosphäre. Vermutlich lassen sich die beobachteten Phasenverschiebungen mit MSTID Phänomenen erklären (vgl. z.B. SAITO et al., 1998). Die jahreszeitlichen Schwankungen der Ionosphäre führen zu zwei Maxima im Jahr von bis zu 30 mm Spannweite um die Monate der Äquinoktium (Tagundnachtgleiche) herum. Für ausführliche Informationen zu den detektierten Phasenverschiebungen siehe SCHÄFER (2012).

7 Danksagung

Die dargestellten Ergebnisse sind im Zuge des Forschungsvorhabens "MultiSAR" entstanden. Dieses Vorhaben wurde aus Haushaltsmitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi) über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen "Otto von Guericke" e.V. (AiF) gefördert unter der Vorhaben-Nr. 15880 N.

Die TerraSAR-X Daten wurden durch das DLR e.V. im Rahmen des TerraSAR-X Forschungsprojekts MTH 0528 zur Verfügung gestellt. Zudem wurde für die radarinterferometrischen Auswertungen ein vom DLR bereitgestelltes digitales Höhenmodell (SRTM-X) verwendet.

Die ENVISAT ASAR Daten wurden von der ESA über das Category-1 Projekt Nr. 3085 zu Forschungszwecken zur Verfügung gestellt. Die ENVISAT MERIS Daten wurden ebenfalls von der ESA über Category-1 Projekt Nr. 6708 bereitgestellt. Die ALOS PALSAR Daten wurden über das ALOS ADEN AO Nr. 3576 bei der ESA von der JAXA zur Verfügung gestellt.

Die verwendeten METEOSAT MSG Daten wurden freundlicherweise unentgeltlich für das Forschungsvorhaben zur Verfügung gestellt von EUMETSAT.

8 Literaturverzeichnis

- HANSEN, R. F., 2001: Radar Interferometry. Data Interpretation and Error Analysis. Remote Sensing and Digital Image Processing, Vol. 2, 308 S., Kluwer, New York.
- LEIJEN, F. & HANSEN, R. F., 2004: Interferometric Radar Meteorology: Resolving the acquisition ambiguity. In: Proc. of CEOS SAR Workshop, 6 S., 27.-28.05.2004, Ulm.
- SAITO, A., FUKAO, S. & MIYAZAKI, S., 1998: High resolution mapping of TEC perturbations with the GSI GPS network over Japan. Geophysical Research Letters, Vol. 25, No. 16, S. 3079-3082, American Geophysical Union, Washington D.C.
- SCHÄFER, M. & HANNEMANN, W., 2010: Atmospheric phase shift identification for individual dates based on multi-reference DInSAR or PSI data. In: Proc. of ESA Living Planet Symposium 2010, 8 S., 28.06.-02.07.2010, Bergen.
- SCHÄFER, M., 2012: Atmosphäre als Phasenbestandteil der differentiellen Radarinterferometrie und ihr Einfluss auf die Messung von Höhenänderungen. Diss. TU Clausthal, 133 S., Clausthal-Zellerfeld (in Druck). <http://radar.signale.de/diss>

Genauigkeitspotential der photogrammetrischen Bildauswertung für Daten unbemannter Luftfahrzeuge

MICHAEL CRAMER & NORBERT HAALA¹

Kurzfassung: Unbemannte Flugsysteme (UAV) gewinnen auch für photogrammetrische Anwendungen zunehmend an Bedeutung. Insbesondere für die zeitlich und räumlich hochauflösende Erfassung kleinräumiger Gebiete bieten UAV auch aufgrund der preiswerten Systemkomponenten eine flexible und kostengünstig Alternative zur klassischen bemannten Luftbildphotogrammetrie. Im Beitrag soll das Genauigkeitspotential der photogrammetrischen Datenauswertung für solche Systeme exemplarisch anhand von Testflügen im Bereich des Testgebiets Vaihingen/Enz untersucht werden. Für diese Testgebiete stehen unter anderem aus Befliegungen und Auswertungen während des DGPF-Projekts zur Evaluierung digitaler photogrammetrischer Luftbildkamerasysteme Referenzdaten zur Verfügung, die zu Vergleichszwecken herangezogen werden können. Zur Erfassung der untersuchten Daten wurde ein an der Universität Stuttgart entwickeltes System als Trägerplattform genutzt. Dieses besteht aus einem seriengefertigten Fluggerät mit eigenentwickelten Navigations- und Steuerkomponenten, als Kamera kommt eine Standard-Digitalkamera aus dem Consumerbereich zum Einsatz. Die Plattform wurde in diesen Tests erstmals für photogrammetrische Anwendungen eingesetzt.

Im Rahmen der Untersuchungen wird das geometrische Genauigkeitspotential der UAV-Bilddaten zunächst anhand der erreichbaren Qualität der durchgeführten Bündelblockausgleichung analysiert. Hierfür stehen eine Reihe signalisierter Pass- und Kontrollpunkte zur Verfügung. Schwerpunkt ist dann die Untersuchung der durch Bildzuordnung abgeleiteten Digitalen Oberflächenmodelle (DOM) beziehungsweise 3D Punktwolken. Aufgrund der vergleichsweise niedrigen Fluggeschwindigkeit von UAV können Luftbilder mit hohen Überdeckungsraten erfasst werden. Die Vorteile der so erhöhten Redundanz bei der DOM-Gewinnung durch geeignete Multi-Stereoverfahren werden innerhalb des Beitrags ebenfalls aufgezeigt.

1 Einleitung

Unbemannte Luftfahrzeuge erlauben eine flexible und oftmals auch kostengünstige Erfassung von kleinräumigen Gebieten, für die bemannte, herkömmliche Flüge oftmals zu kostspielig sind. Mit der Miniaturisierung von Navigationskomponenten, der Verfügbarkeit von entsprechenden Trägerplattformen und den entsprechenden Verfahren zur autonomen Flugdurchführung und automatisierten Datenauswertung erschließen sich UAVs neue Anwendungsfelder. Dementsprechend wird diese Technologie sowohl in Forschung als auch für kommerzielle Anwendungen zur Zeit intensiv untersucht. Dem großen Potenzial einer flexiblen Datenerfassung stehen allerdings auch gravierende Nachteile gegenüber. Dieses sind insbesondere die noch großen Einschränkungen im Bereich der Fluggenehmigung (vor allem Sicht-Bedingung) aber auch die limitierte Nutzlastaufnahme und eingeschränkte Flugdauer. Teilweise wiegen diese Nachteile nicht so schwerwiegend, sofern nur an kleinräumige Anwendungen gedacht wird. Der photogrammetrisch entscheidende Punkt ist jedoch die Frage nach

¹ Dr.-Ing. Michael Cramer, Universität Stuttgart, Institut für Photogrammetrie (ifp), 70174 Stuttgart, Tel.: +49-711-685-84118, e-mail: michael.cramer@ifp.uni-stuttgart.de.

Prof. Dr.-Ing. Norbert Haala, Universität Stuttgart, Institut für Photogrammetrie (ifp), 70174 Stuttgart, Tel.: +49-711-685-83383, e-mail: norbert.haala@ifp.uni-stuttgart.de.

den Auswerteprodukten und deren Genauigkeiten. Daher liegt der Schwerpunkt hier auf der Untersuchung des photogrammetrischen Genauigkeitspotenzials dieser Systemkonstellation. Im Zuge der Auswertungen wurde eine vollständige Prozesskette realisiert, die die Orientierung der Bilder und spätere Ableitung von digitalen Oberflächenmodellen und Orthophotos erlaubt. Da es sich um eine photogrammetrische Erstauswertung von UAV-Daten handelt, konnten die eigentlich erwarteten Genauigkeiten nicht vollständig erreicht werden. Dieses ist vor allem durch die nicht optimale Kamera verursacht, die zudem für die Befliegungen unzureichend konfiguriert war. Diese Punkte werden im weiteren Verlauf separat diskutiert werden. Vor diesem Hintergrund ist dieser Beitrag eher als eine Art Erfahrungsbericht zu verstehen, auch für Leser, die sich erstmals mit dieser Technologie beschäftigen wollen.

2 UAV-Plattform

Die UAV-Plattform wurde vom Institut für Flugmechanik und Flugregelung (IFR) der Fakultät Luft- und Raumfahrttechnik & Geodäsie der Universität Stuttgart zur Verfügung gestellt. Es handelt sich um einen Starrflügler mit zwei Elektromotoren, einer Spannweite von 1,4 m und einem Abfluggewicht von ca. 1,3 kg. Das Flugzeug aus Elapor Schaumstoff ist damit eine sehr leichte aber auch sehr robuste und preisgünstige Trägerplattform. Der Flugzeugkörper, die elektrischen Motoren, Servos und Stromversorgung sind Standardkomponenten. Das Computersystem im Flugzeug ist eine Eigenentwicklung des IFR und basiert auf einer anwendungs-programmierbaren Logik-Anordnung (FPGA) (WEIMER et al., 2010). Die Trägerplattform fliegt mit einer Geschwindigkeit von ca. 20 m/s. Die maximale Flugdauer mit einer Akkuladung liegt bei ca. 20 min. Dies entspricht einer Flugstrecke von ca. 20 km unter Berücksichtigung von entsprechenden Zeitintervallen für Auf- und Abstieg bzw. Start- und Landung. Die Abb. 1 zeigt das Flugzeug in einer Gesamtaufnahme. Auf dem Rumpf kurz vor dem Höhenleitwerk ist die GPS-Empfangseinheit zu sehen. Die Kamera wird in einer entsprechenden Aussparung des Flugzeugrumpfs mit Klebeband fixiert.



Abb. 1: UAV-Plattform.

2.1 Navigationssensorik im Flugzeug

Die Sensorik im Flugzeug umfasst neben der Kamera verschiedene Komponenten zur Echtzeitnavigation, deren Navigationsdaten später auch für die photogrammetrische Auswertung verwendet werden können. Es handelt sich dabei um eine low-cost inertielle Messeinheit (IMU), ein Magnetometer, barometrische Höhenmesser und Drucksensoren und ein L1-Code GPS-Empfänger. In einem dezentralen erweiterten Kalmanfilter wird daraus die aktuelle Navigationsinformation berechnet. Die Genauigkeit der (Horizontal-)Position wird dabei wesentlich durch die Spezifikationen des verwendeten GPS-Empfängers bestimmt und ist für den eingesetzten Locosys LS20031 Empfänger mit 3 m RMS angegeben. Die Genauigkeit

der Vertikalkoordinaten hängt wesentlich von der barometrischen Höhenmessung ab. Weitere Details zur Systemkonfiguration sind HAALA et al. (2011) zu entnehmen.

2.2 Kamerasystem

Für die Aufnahme der Bilder wird eine Canon IXUS 100 Kompaktdigitalkamera mit 12 MPix (3000 x 4000 pix) eingesetzt. Die Kamera hat eine nominelle Brennweite von 5.9 mm. In Kombination mit einer 1/2.3" CCD – korrespondierende CCD-Fläche 4.62 x 6.16 mm², Bild-diagonale 7.7 mm – realisiert die Kamera einen maximalen Bildwinkel von ca. 66°, im regulären Kleinbildformat entsprechend einer Weitwinkelbrennweite von ca. 35 mm. Die individuellen Pixel auf der CCD haben nur eine Größe von 1.54 x 1.54 μm^2 , was sich auf die Empfindlichkeit bzw. das Rauschverhalten der Kamera auswirken kann. Daher verfügt die Kamera auch über einen optischen Bildstabilisator, der zur Steigerung der Bildqualität in vielen vergleichbaren Systemen im Consumersektor verwendet wird. Zu dem Zeitpunkt, als die Kamera als optischer Sensor für diese Plattform ausgewählt wurde, war nicht primär an photogrammetrische Anwendungen gedacht. Die Kamera wurde in erster Linie ausgewählt, da neben ihrem geringen Gewicht von 140 g (ohne Akku) für Canon Kameras eine Schnittstelle zur Verfügung steht (sog. Canon Hack Development Kit (CHDK)). Mit dieser Schnittstelle kann direkt in die Funktionalität der Kamera eingegriffen werden. Damit kann über den Flugzeugrechner und somit ferngesteuert die rechnergestützte Auslösung der Kamera kontrolliert werden.

2.3 Laborkalibrierung Kamera

Im Vorfeld der photogrammetrischen Befliegung wurde die Kamera im Labor kalibriert. Um eine erste Aussage über die Stabilität des Kamerasystems zu treffen, wurden insgesamt 3 Kalibrierungen durchgeführt, in denen das terrestrische Testfeld mit jeweils 8 Bildern gemäß der bekannten 8-Standpunkt-Kalibrierung aufgenommen wurde. Die Auswertung wurde mit Australis (FRASER, 1997) durchgeführt. Das verwendete Kalibriermodell entspricht im Wesentlichen dem ursprünglich von BROWN (1976) entwickelten physikalischen Parametersatz zur Kamerakalibrierung. Um die Reproduzierbarkeit der Kalibrierungen zu analysieren wurde die Kamera nach der ersten Aufnahmesequenz ausgeschaltet. Die 16 Bilder der zweiten und dritten Aufnahmesequenz wurden dann in einem Durchgang aufgenommen, d.h. die Kamera wurde während dessen nicht ausgeschaltet.

Die Kalibrierparameter aus den drei Kalibrierläufen ergeben sich leicht unterschiedlich, was auch an den Korrelationen der Parameter untereinander liegen kann. Im hier vorliegenden Fall tritt eine hohe Korrelation zwischen der Kamerakonstante und der x-Komponente des Bildhauptpunktes auf. Dies kann an der Aufnahmekonstellation liegen – es wurde ein ebenes Testfeld verwendet – oder auch an der beweglichen Linse des nicht fixierten optischen Bildstabilisators, die sich beim Verkatzen der Kamera mitbewegt.

Um die Übereinstimmung der drei separaten Kalibrierungen abschätzen zu können, werden die Bildpunkte per Vorwärtsschnitt unter Verwendung der jeweiligen Kalibrierterme in den Objektraum gerechnet und die Objektkoordinaten untereinander verglichen. Die RMS-Werte der Differenzen erreichen Werte von bis zu 1.4 cm. Diese Abweichungen sind aufgrund der kurzen Aufnahmeentfernungen und der guten Schnittgeometrie signifikant. Die maximalen Differenzen treten auf, wenn die Parameter einer Kalibrierung für einen Datensatz verwendet werden, zwischen der die Kamera aus- und wieder eingeschaltet worden ist. Damit muss von nicht reproduzierbaren Kalibriertermen ausgegangen werden, vor allem nach Ein- und Ausschalten und dem damit verbundenen Ein- und Ausfahren der Optik.

3 Prozesskette

UAV-Bildverbände unterscheiden sich von üblichen photogrammetrischen Bildflügen vor allem dadurch, dass klein-formatigere Kamerasysteme in unkonventionelleren Aufnahmeanordnungen zum Einsatz kommen. Im Falle von Luftbildern, die wie in diesem Fall mit Starrflügler-UAVs erfasst werden, orientiert sich die Aufnahmeplanung zwar oft an der klassischen Planung von photogrammetrischen Bildstreifen. Aufgrund der im Vergleich zu einem herkömmlichen Bildflugzeug deutlich instabileren Fluglage und dem Fehlen einer stabilisierenden Aufhängung kommt es zu deutlich höheren Abweichungen vom Nadirfall und zu deutlich unregelmäßigeren Bildüberdeckungen. Im Regelfall ist es daher selten möglich, die UAV-Bilder ohne eine Vororientierung einer klassischen photogrammetrischen Auswertekette, wie diese z.B. in Match-AT (SIGLE & HEUCHEL, 2001) realisiert ist, zuzuführen – vor allem wenn zudem keine hinreichend genaue Sensororientierung aus den Navigationsdaten zur Verfügung steht.

Im Bereich der Computervision existieren Bildorientierungsverfahren, die mit quasi unstrukturierten, irregulären und hoch-redundanten, hoch-überdeckenden Bildverbänden zurechtkommen (sog. structure and motion Verfahren). An der Universität Washington wurde von SNAVELY et al. (2007) die open-source Software „Bundler“ entwickelt, die unter der GNU General Public License zur Verfügung steht. Ursprünglich sollten im Rahmen des Photo Tourism Projekts beliebige Bilder (auch aus Bildquellen im Internet) von bekannten Sehenswürdigkeiten oder ganzen Städten orientiert und eine zugehörige 3D-Punktwolke im Objektraum generiert werden.

Dieses Verfahren kann natürlich auch auf die Bilder einer UAV-Befliegung angewandt werden. Im ersten Schritt werden die entsprechenden Überdeckungen zwischen den Bildern analysiert, die Messung der Verknüpfungspunkte basiert auf dem SIFT-Operator (LOWE, 2004). Die resultierende Punktwolke wird in einem vom Bundler festgelegten, quasi beliebigen lokalen Koordinatensystem geliefert.

Für die hier durchgeführten empirischen Untersuchungen wurde die Bundler-Software entsprechend modifiziert (ABDEL-WAHAB et al., 2011), vor allem um die Punktkorrespondenzen hinsichtlich Genauigkeit, Verteilung und Zuverlässigkeit zu erhöhen. Da die bislang vorhandene Bundler-Implementierung keine Möglichkeit zulässt, manuelle Messungen von Passpunkten in den Orientierungsprozess einzubeziehen, werden die Ergebnisse der Bundler-Auswertung in die Standardsoftware Match-AT übertragen. Dazu muss ein Übergang vom lokalen Bundler-Koordinatensystem in das Objektkoordinatensystem realisiert werden. Durch den Vergleich der im lokalen Bundler-Koordinatensystem bestimmten Projektionszentrumskoordinaten mit den GPS-Positionen (z.B. UTM-Koordinatensystem) lassen sich die 7-Parameter der räumlichen Helmerttransformation ableiten. So können die Orientierungselemente und auch 3D-Punktwolke aus der Bundler-Auswertung in Abhängigkeit von der Genauigkeit der GPS-Projektionszentren in das gewünschte Objektkoordinatensystem transformiert werden. Damit liegen für alle Bilder (Näherungs-)Werte für die äußere Orientierung vor. Mit diesen Werten wird dann das photogrammetrische Projekt in Match-AT aufgesetzt, um so z.B. die erforderliche Passpunktmessung durchzuführen. Anschließend kann die Bündelausgleichung mit Passpunkten erfolgen, wobei es dem Anwender prinzipiell freigestellt ist, vorab eine erneute automatische Verknüpfungspunktmessung mit Match-AT vorzunehmen oder alternativ die bereits durch Bundler ermittelten Punktkorrespondenzen für die Ausgleichung zu verwenden. Im Rahmen der hier durchgeführten empirischen Untersuchungen wurden beide Varianten durchgeführt, wie in dem nachfolgenden Abschnitt vorgestellt wird.

4 Empirische Testbefliegungen

4.1 Datenerfassung

Das Testfeld Vaihingen/Enz des Instituts für Photogrammetrie (ifp) der Universität Stuttgart ist bislang fast ausschließlich für Genauigkeitsuntersuchungen großformatiger Luftbildkamerasysteme in üblichen photogrammetrischen Bildflugzeugen verwendet worden. Das Testfeld existiert seit 1995 (CRAMER, 2005) und wurde im Sommer 2008 auch für die Befliegungen im Rahmen des Kameraevaluierungstests der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation (DGPF) genutzt (CRAMER, 2010). Das Testfeld liegt ca. 30 km nord-westlich von Stuttgart und umfasst insgesamt eine Ausdehnung von 7.4×4.7 km² mit ca. 200 signalisierten Pass- und Kontrollpunkten. Für die hier durchgeführten UAV-Untersuchungen wurde nur ein Teilbereich des Testgebiets mit einer Größe von knapp 2 km² (Ausdehnung 1.3×1.5 km²) befliegen. Zur Verdichtung der vorhandenen Passpunktinformationen wurden dazu am Flugtag weitere temporäre Signalisierungstafeln ausgebracht und vor Ort mit GPS und real-time Korrekturdaten eingemessen. Die Genauigkeit der Passpunktinformation ist im Bereich von 1 – 3 cm, vergleichbar mit der Genauigkeit der permanent signalisierten Punkte im Testgebiet. Allerdings konnten bei der späteren Auswertung der Bilder nicht alle Punkte verwendet werden, was Großteils durch die unzureichende Qualität der Bilder verursacht wurde.

Die eigentlichen Befliegungen sind mit Bodenpixelgrößen (GSD) von nominell 8 cm bzw. 5 cm geplant, woraus zwei unterschiedlichen Flughöhen von ca. 300 m ü.G. bzw. 200 m ü.G. resultieren. Die tatsächlichen Geländehöhen variieren im Überfliegsgebiet zwischen 250 m und 330 m. Die beiden Bildverbände sind als klassische Blöcke konzipiert mit parallelen Flugstreifen in Ost-West Richtung. Aufgrund der nicht stabilisierten Aufhängung der Kamera in der Trägerplattform und der damit verbundenen großen Abweichungen der Aufnahmerichtungen von der idealen Nadiraufnahme sind die Überdeckungen zwischen den benachbarten Flugstreifen mit geplanten 70% sehr hoch. Die Überdeckung innerhalb des Flugstreifens wird festgelegt durch das Auslöseintervall der Kamera. Die Bilder der Kamera werden mit einem festen Auslöseintervall von 1.5 s aufgenommen, was bei einer mittleren Fluggeschwindigkeit von 20 m/s zu einer Basislänge von 30 m führt. Die korrespondierende Überdeckung in Flugrichtung beträgt knapp 90%.

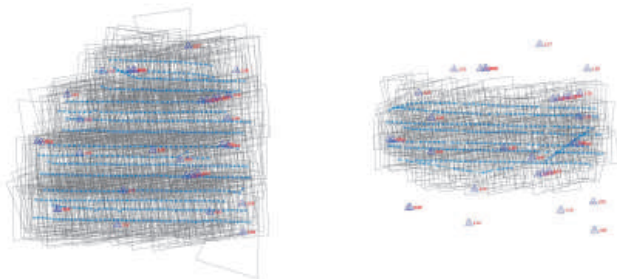


Abb. 2: Blockgeometrie Bildflug GSD 8 cm (links), Bildflug GSD 5 cm (rechts).

Die Abb. 2 zeigt die Blockkonfiguration der GSD 8 cm bzw. GSD 5 cm Befliegung mit den entsprechenden Bildüberdeckungen und signalisierten Bodenpunkten. Der Block GSD 5 cm wurde in einem Flug erfasst (8 Flugstreifen, 334 Bilder), für die insgesamt 16 Flugstreifen (621 Bilder) des GSD 8 cm Blocks musste dreimal gestartet werden, da das abgedeckte Gebiet im Vergleich zum GSD 5 cm Block größer und mehr Flugzeit für Steig- und Sinkflug

kalkuliert werden musste. Zudem wurden aufgrund starker Gegenwinde die Akkus der Elektromotoren deutlich stärker belastet, was die effektive Flugzeit verkürzt hat.

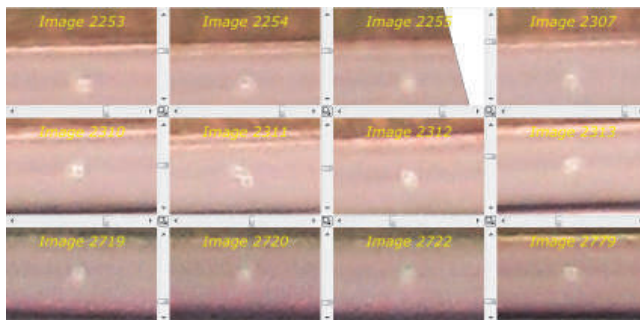
Variationen in der Fluggeschwindigkeit durch Windbeeinträchtigungen wirken sich aufgrund des konstanten Auslöseintervalls auf die Basislängen und damit auch auf die Überdeckung in Flugrichtung aus. Für die Befliegung GSD 8 cm variiert die Fluggeschwindigkeit zwischen 22 m/s für die in Ost-West-Richtung geflogenen Streifen und 18 m/s für die in Gegenrichtung geflogenen Streifen, was zu Basislängenvariationen zwischen 25 m – 35 m führt. Bei einer nominellen Bildgröße im Gelände von 240 x 320 m² (GSD 8 cm) beeinflusst diese Variation die nominelle Überdeckung um $\pm 2\%$, für die Befliegung mit GSD 5 cm (Bildgröße entsprechend 150 x 200 m²) variiert die Überdeckung in Flugrichtung zwischen 76 – 83%, da aufgrund der kleineren Bildgröße die vorgegebene nominelle Basislänge von 30 m einer Vorwärtsüberdeckung von 80% entspricht. Der Einfluss auf die Überdeckung aufgrund der Variation der Basislänge ist aber im Vergleich zu den Variationen der Neigungswinkel fast vernachlässigbar. Im Rahmen der späteren Auswertungen konnten Abweichungen vom Nadirfall in der Größenordnung von mehr als $\pm 30^\circ$ (Rollwinkel) und $\pm 10^\circ$ (Nickwinkel) nachgewiesen werden. Da sich diese Abweichungen vom Normalfall in Abhängigkeit von der Flughöhe auf die Lage der Bilder im Objektraum niederschlagen, muss für den GSD 8 cm Flug mit Variationen in einer Größenordnung von 50 m in Flugrichtung und 170 m quer dazu gerechnet werden. Die größere Dynamik um die Rollachse ist demzufolge bei der Planung der Flugstreifenabstände entsprechend zu berücksichtigen.

Die eigentliche Befliegung wurde am 04. März 2011 durchgeführt. Es war der erste Flug, der in Zusammenarbeit mit dem IFR mit dem Schwerpunkt auf der photogrammetrischen Auswertung und Genauigkeitsanalyse realisiert werden konnte. Aus dieser Erstdatenerfassung und den beiderseits noch mangelnden Erfahrungen lassen sich gewisse Defizite erklären, die die weitere Auswertung der Daten negativ beeinflusst haben. Die eigentliche Flugplanung konnte aber, wie die Blockkonfigurationen in Abb. 2 bereits gezeigt haben, gut umgesetzt werden. Bei einigen Streifen traten Ablagen von der geplanten Streifenachse in einer Größenordnung von etwa 10 m auf, was durch fehlerhafte Trimmung der Ruder verursacht werden kann. Im Vergleich zu den oben dargestellten Effekten beeinflusst diese Ablage aber die geplanten Überdeckungen in deutlich geringerem Maße.

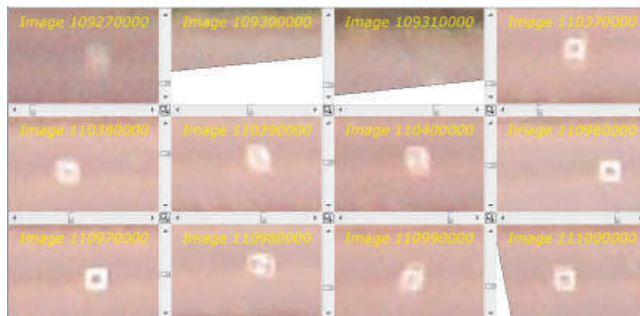
Ein wesentliches Problem bei der Bilddatenerfassung waren die deutlich zu langen Belichtungszeiten, die sich negativ auf die Bildschärfe auswirken. Aufgrund von falschen Kameraeinstellungen sind die Befliegungen mit einer Empfindlichkeit von ISO 200 durchgeführt wurden, was bei einer vorgegebenen Blendenzahl $f/9$ in Belichtungszeiten von 1/250 s (GSD 5 cm) bzw. 1/80 s, 1/125 s, 1/160 s für die drei Flüge mit GSD 8 cm resultiert. Diese Belichtungszeiten sind dadurch verursacht, dass das Normaldichtefilter bei dieser Kamera in der Automateinstellung standardmäßig aktiviert ist, d.h. die Kamera entscheidet je nach Beleuchtungsbedingungen selbstständig über den Einsatz des Filters. Das ND-Filter ist eigentlich für Aufnahmesituation vorgesehen, in denen bei guten Beleuchtungsbedingungen längere Belichtungszeiten erwünscht sind ohne die Kamera dafür stark abblenden zu müssen. Dieses kann in der Motivfotografie zur bewussten Erzeugung von Bewegungsunschärfen eingesetzt werden, ist aber in der UAV-Anwendung gänzlich kontraproduktiv. Eine korrekte Deaktivierung des ND-Filters hätte bei gleicher Beleuchtung und unveränderter ISO Empfindlichkeit Belichtungszeiten von 1/640 s im Vergleich zu den realisierten 1/80 s ermöglicht.

Derartig lange Belichtungszeiten verursachen für die UAV-Anwendung schon aufgrund der reinen Fluggeschwindigkeit von 20 m/s nominelle Unschärfen im Bereich von 1 – 3 Pixel im Bild, ohne Berücksichtigung von zusätzlichen Unschärfen hervorgerufen durch Orientierungswinkeländerungen. Die Abb. 3 zeigt den Einfluss dieser Effekte. Dargestellt ist ein permanent signalisierter Passpunkt, der durch die hohe Überdeckung in mehreren Bildern gemessen werden kann. Die Passpunktmarkierung in der Örtlichkeit besteht aus einer 60 x 60

cm² großen weißen Farbmarkierung, die in ihrer Mitte eine weitere 30 x 30 cm² schwarze Markierung aufweist und auf einem asphaltierten Feldweg aufgebracht ist. Die hier exemplarisch dargestellten Bildausschnitte zeigen wie schlecht dieses eigentlich ca. 10 x 10 Pixel große Objekt in den Bildern zu erkennen ist. Neben den Unschärfen, die z.T. zu einer Art Doppelabbildung des Signals führen, fällt aber auch die insgesamt sehr schlechte radiometrische Qualität der Bilder auf, was auf die sehr kleine CCD-Pixelgröße und nicht optimale Kameraeinstellung rückführbar ist.



Passpunkt #138 in Bildflug GSD 8 cm



Passpunkt #138 in Bildflug GSD 5 cm

Abb. 3: Qualität der Abbildung eines signalisierten Passpunktes in den Bildern der UAV-Befliegung.

4.2 Photogrammetrische Genauigkeitsuntersuchung

Für die photogrammetrischen Auswertungen wurden zwei grundsätzlich unterschiedliche Wege beschrieben. Im Fall der GSD 8 cm Befliegung beruht die mit Match-AT durchgeführte Aerotriangulation auf den zuvor mit Match-AT zugeordneten Verknüpfungspunkten. Die zuvor ermittelten Resultate der Bundler-Auswertung (Elemente der äußeren Orientierung) wurden nur zu Vororientierung der Bilder verwendet. Die Bilder wurden ohne Vorabverzeichungskorrekturen in die AT eingeführt. Im Rahmen der Auswertung des GSD 5 cm Bildverbandes wurden die Bildkoordinaten aus der Bundler-Auswertung mit in das Match-AT Programm übernommen und keine weitere Verknüpfungspunktmessung durchgeführt. Das heißt, in diesem Fall beruht die AT ausschließlich auf den zuvor im Bundler zugeordneten Verknüpfungspunkten. Des Weiteren wurden die Bilder vorab um die mittlere Verzerrung aus der Laborkalibrierung korrigiert. Die Passpunktmessung erfolgte manuell in allen Bildern, in denen die Punkte unter Berücksichtigung der bereits besprochenen Bildqualität erkennbar und messbar waren.

Zur weiteren Stabilisierung der Blockgeometrie wurden die direkt beobachteten Projektionszentrumskordinaten aus der GPS-Messung verwendet. Die angenommene Genauigkeit der GPS-Projektionszentrumskordinaten aus den Systemspezifikationen liegt bei 3 m (RMS). Diese Genauigkeit konnte durch die Vergleich mit den im Rahmen der AT geschätzten Projektionszentren bestätigt werden. Die Abb. 4 zeigt die Differenzen an den geschätzten 334 Kamerastationen der GSD 5 cm Befliegung. Die AT wurde dafür als freies Netz ohne Verwendung von Passpunkten bzw. weiteren Zusatzparametern durchgeführt. Die RMS-Werte der Differenzen sind 4.6 m, 3.1 m bzw. 4.2 m für die Ost, Nord und Vertikalkomponente. Für die späteren AT-Läufe wurden die GPS-Projektionszentren mit einer Genauigkeit (Std.Abw.) von 4 m eingeführt.

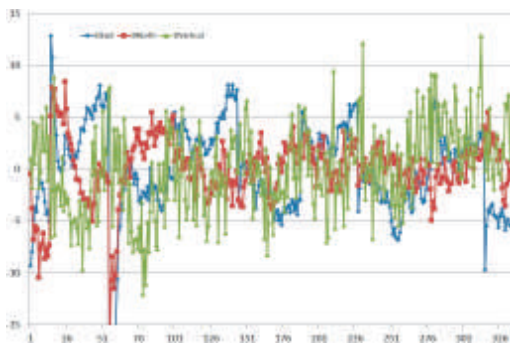
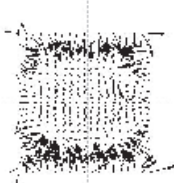
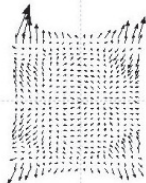


Abb. 4: Differenzen an den der GPS und AT-Projektionszentren aller Bilder (in [m]).

Tab. 1: Genauigkeit der GPS-gestützten AT mit Match-AT

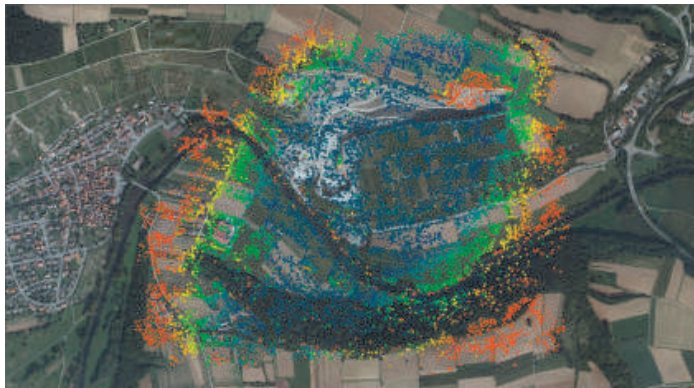
	GSD 8 cm 621 Bilder, 9483 Blockpunkte	GSD 5 cm 334 Bilder, 1321732 Blockpunkte
Sigma0 (a posteriori)	2.2	1.6
Residuen Bildpunkte (RMS)	x= 8.4 µm, y=10.2 µm Manuelle Messung Automatische Messung x= 1.5 µm, y=1.5 µm	x=15.5 µm, y=17.6 µm x= 1.3 µm, y=1.3 µm
Residuen (RMS) 3D Kontrollpunkte	X= 1.64 m, Y=1.52 m, Z= 1.69 m	X= 0.01 m, Y= 0.04 m, Z= 0.27 m
Genauigkeit (Std.Abw.) Neupunkte Objektraum	X=0.04 m, Y= 0.05 m, Z= 0.12 m	X=0.03 m, Y=0.05 m, Z= 0.15m
Restsystematik im Bildraum nach Selbstkalibrierung	 Max. Residuum 3.5 µm	 Max. Residuum 3.2 µm

Die Bündelausgleichung wurde als GPS-gestützte AT mit Passpunkten für die Bildverbände beider Flughöhen getrennt durchgeführt. In beiden Fällen wurden zusätzliche Parameter zur Selbstkalibrierung gemäß dem 44-Parametermodell von GRÜN (1978) eingeführt. Die wesentlichen Ergebnisse der Ausgleichungen (Residuen im Bildraum, Residuen der Kontrollpunkte,

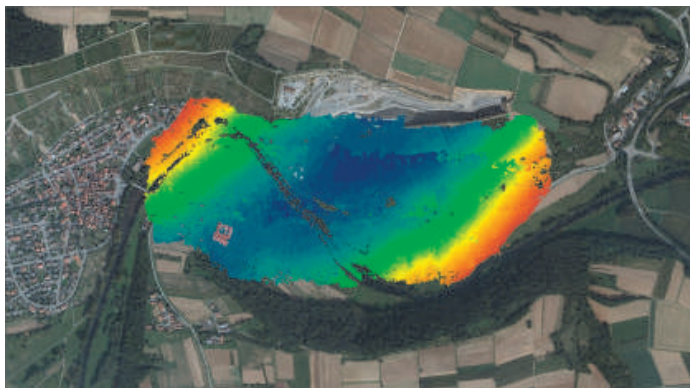
geschätzte Genauigkeit Objektpunkte) sind in der Tab. 1 aufgeführt. Des Weiteren zeigt die Tabelle die mittlere Restverzeichnung, die nach der Korrektur durch die 44 Parameter in den Bildern noch vorhanden ist.

Die RMS-Werte der Bildpunktmessung zeigen die Unterschiede zwischen den automatischen und manuell gemessenen Punkten, was auf die Probleme der Punktidentifikation zur Messung der signalisierten Passpunkte rückführbar ist. Da die Passpunkte im Objektraum für die GSD 5 cm Befliegung mit einer höheren Gewichtung eingeführt wurden (Std.Abw.: GSD 8 cm $X, Y=0.5$ m, $Z=0.8$ m; GSD 5 cm $X, Y=0.011$ m, $Z=0.035$ m), zeigen sich für diesen Flug auch größere Residuen an den manuellen Messungen im Bildraum. Analog ergeben sich auch größere Verbesserungen im Objektraum.

Die theoretische Genauigkeit (Std.Abw.) der Objektpunktbestimmung liegt im Bereich von einem Pixel für die Lagekoordinate, in der Vertikalkoordinate wird eine theoretische Genauigkeit im Bereich von 1.5 – 3 pix erreicht. Dieses deutet darauf hin, dass die Daten noch mit gewissen systematischen Effekten überlagert sind, die auch nicht durch die in der AT eingeführten 44 Zusatzparameter kompensierbar sind. Die entsprechenden Vektorplots zeigen die gemittelten Residuen im Bildraum an 25×25 Gitterpunkten in der Bildebene. Die maximalen Residuen sind vergleichbar, die Struktur des Vektorfeldes ist aber unterschiedlich. Für den Flug GSD 8 cm zeigt sich ein irreguläreres Bild, für den GSD 5 cm ist das Vektorfeld wesentlich regelmäßiger. Für den Fall GSD 8 cm wurde für den gesamten Block, der ja aus drei Einzelflügen zusammengesetzt ist, nur ein Satz von 44 Parametern eingeführt. Nach den Resultaten der Laborkalibrierung, wonach die Reproduzierbarkeit der Kalibrierung der Kamera nach Ein- und Ausschaltvorgängen nicht gewährleistet ist, hätten diese Zusatzparameter individuell für die Befliegung jedes Fluges angesetzt werden müssen. Die GSD 5 cm Befliegung besteht nur aus einem Flug, sodass das vorige Kriterium hier erfüllt wurde. Hinzu kommt, dass an den Bildern der GSD 5 cm Befliegung eine mittlere Verzeichnungskorrektur aus der Laborkalibrierung bereits angebracht wurde. Dennoch zeigen sich auch hier noch deutliche Restsystematiken, die durch eine Veränderung der Kamerageometrie während des Fluges verursacht sein könnten, u.U. verursacht durch den optischen Bildstabilisator.



Bildflug GSD 8 cm



Bildflug GSD 5 cm

Abb. 5: Vertikaldifferenzen der Verknüpfungspunkte durch Vergleich mit Laser-DOM.

Aufgrund der nur geringen Passpunktanzahl mussten alle verfügbaren Punkte als Passpunkte in den Ausgleichungen behandelt werden. Damit sind keine absoluten Genauigkeitsabschätzungen durch Vergleiche an Kontrollpunkten möglich. Stattdessen wurde das vorhandene Laser-DOM herangezogen, das im Rahmen der DGPF-Testbefliegungen als Referenzdatensatz erfasst und zur Verfügung gestellt wurde. Dieses DOM liegt mit einer Rasterweite von 25 cm mit einer Genauigkeit von wenigen Zentimetern vor. Für die im Rahmen der Bündelausgleichung bestimmten Geländekoordinaten der Verknüpfungspunkte wurden die korrespondierenden Höhenwerte aus dem Laser-DOM interpoliert und dann die Differenzen statistisch analysiert. Eine farbkodierte Darstellung dieser Höhendifferenzen ist mit der Abb. 5 gegeben. Die Differenzen sind für die Punkte aus der GSD 8 cm und GSD 5 cm Befliegung gesondert dargestellt. Die Farbkodierung für beide Grafiken ist identisch.

Die Differenzen sind in ca. 30 gleichabständige Klassen der Weite von 20 cm eingeteilt. Die maximalen negativen Differenzen liegen in der Klasse $d_{\text{Vertikal}} < -3.40$ m (braun-rot) die maximalen positiven Differenzen sind der Klasse $d_{\text{Vertikal}} > 1.80$ m (dunkel-blau) zugewiesen. Die grünen Bereiche zeigen demnach diejenigen Bereiche, in denen die geringsten Differenzen auftreten.

Für den GSD 8 cm Flug treten auch größere Differenzen auf (max. Abweichung 51.8 m, min. Abweichung -55.4 m), die für die Abbildung aber der niedrigsten bzw. größten Klasse zugeschlagen wurden. Diese Differenzen lassen sich tlw. auf den Einfluss von Vegetation (Zuordnungen in Bäumen) oder tatsächliche Änderungen der Geländeoberfläche (Steinbruchbereich) zurückführen. Ein weiterer Grund können aber auch fehlerhaft bzw. ungenau zugeordnete Punkte sein, da bei der Match-AT Verknüpfungspunktmessung auch auf 2-Strahlpunkte zugegriffen wird, die für die Bundler-Verknüpfungspunkte in der modifizierten Implementierung ausgeschlossen worden sind. Dieses wirkt sich vor allem auch für Zuordnungen in der Vegetation bzw. auf Gebäuden aus. Für die GSD 5 cm Auswertungen werden in diesen Bereichen keine Punkte zugeordnet, was auch in der Differenzpunktwolke zu sehen ist. Für das große landwirtschaftliche Gebäude und auch einzelne kleinere Baumgruppen innerhalb des Testgebiets können daher keine Höhendifferenzen berechnet werden.

Deutlich ist in beiden Blöcken eine systematische Aufwölbung im Bereich der Blockmitte zu sehen, was darauf hindeutet, dass trotz der durchgeführten Selbstkalibrierung nicht kompensierbare Systematiken in der Kamera verbleiben, die sich dann in dieser Aufwölbung niederschlagen. Dieses ist mit hoher Wahrscheinlichkeit auf die nicht reproduzierbare und ggf. nicht stabile Kamerageometrie rückführbar, die sich schon in den vorigen Untersuchungen

und der Laborkalibrierung gezeigt hat. Vor diesem Hintergrund führt auch eine a priori Korrektur von Verzeichnungswerten aus der Laborkalibrierung zu keiner Verbesserung der Auswertungen. Die maximalen Differenzen für den Block GSD 8 cm sind zwar größer (Std.Abw. 4.57 m, im Vergleich zu 0.75 m Std.Abw. GSD 5 cm), es handelt sich aber auch um den größeren Bildverband mit kleinerem Bildmaßstab.

Da für den GSD 5 cm Block sehr viel mehr Punkte zugeordnet wurden und somit eine quasi flächendeckende Kontrolle der Vertikalgenauigkeit möglich ist, erkennt man in der Differenzpunktwolke weitere Effekte, wie die deutlichen Höhensprünge. Dieser Höhenversatz im nord-östlichen Bereich ist eindeutig den Flugstreifen zuzuordnen und kann durch unzureichende Verknüpfung zwischen den Streifen bzw. ungenauere Punktzuordnungen verursacht sein.

4.3 DOM-Generierung und Orthophoto

Basierend auf den Ergebnissen der AT war die weitere photogrammetrische Auswertung der erfassten Bilddaten mittels Standardsoftware problemlos möglich. Die DOM-Generierung durch MATCH-T war aufgrund der hohen Bildüberdeckung und der daraus resultierenden großen Redundanz trotz der relativ geringen radiometrischen Bildqualität gut möglich. Während sich die diskutierten systematischen Fehler der AT negativ auf die Absolutgenauigkeit des DOM auswirkten, konnte eine vergleichsweise gute Detailliertheit und Relativgenauigkeit erreicht werden. Dadurch war auch die Berechnung geometrisch korrekter Orthophotos gewährleistet. Die radiometrische Qualität der Orthophotos ist durch das relativ große Rauschen und die diskutierte Bewegungsunschärfe der zugrundeliegenden Bilder im Vergleich zu Daten großformatiger Luftbildkamerasysteme limitiert. Dennoch ist das Ergebnis visuell ansprechend und für viele Anwendungen absolut ausreichend (HAALA et al., 2010).

5 Zusammenfassung

Im Rahmen der hier vorgestellten Auswertungen konnten elementare Schwachpunkte kommerzieller Kompaktkameras aufgezeigt werden, die für zukünftige Testflüge abgestellt werden müssen.

- Der limitierende Faktor ist die offensichtlich nicht stabile Kamerageometrie, die eine Vorabkalibrierung im Labor bzw. klassische Selbstkalibrierung nicht zulässt. Vor allem der optische Bildstabilisator spielt neben der veränderlichen Brennweite eine entscheidende Rolle. In entsprechenden Internet-Foren wird daher die mechanische Fixierung des Stabilisators empfohlen. Dieses soll auch für die Canon Ixus 100 durchgeführt werden. Alternativ wären Verfahren zur bildvarianten Kalibrierung denkbar (LÄBE & FÖRSTNER, 2008).
- Die richtige Einstellung der Kamera ist entscheidend für die Bildqualität. Bei entsprechend kurzen Belichtungszeiten ist eine deutlich bessere Bildqualität zu erwarten. Zukünftig soll jedoch eine Kamera verwendet werden, die über größere CCD-Pixel verfügt, was sich positiv auf die radiometrische Qualität auswirkt.
- Die neu am Markt verfügbaren Systemkameras bieten die Möglichkeit ein kompaktes und damit leichtes Kameragehäuse mit professionellen Objektiven zu verbinden. Durch entsprechende Adapter können sogar klassische Festbrennweitenobjektive mit diesen Kameras kombiniert werden.
- Im Prinzip sind auch Industriekameras denkbar. Diese haben aber im Vergleich zu den Kompaktkameras den Nachteil, dass sie eine direkte Rechneranbindung zur Datenspeicherung und Stromversorgung benötigen, was das Bordsystem zusätzlich belastet. Hinzu kommt die i.d.R. deutlich geringere Pixelanzahl.

Trotz dieser Defizite und Probleme war es aber möglich die prinzipielle Machbarkeit und damit das Potenzial photogrammetrischer Auswertung von UAV-Daten nachzuweisen. Erneute Testbefliegungen mit einem modifizierten System sind für das Frühjahr 2012 geplant. Anhand dieser Auswertungen wird dann auch das Genauigkeitspotenzial nachweisbar sein.

Dank

Die Autoren bedanken sich sehr herzlich bei Florian Weimer und Martin Trittler, beide Mitarbeiter am IFR, die mit ihrer Flugplattform nicht nur die Befliegungen ermöglicht haben, sondern bei Auswertung der empirischen Datensätze auch immer sehr unkompliziert und allseits kooperativ zur Seite standen. Des Weiteren bedanken wir uns herzlich bei den Studierenden Beatrice Appenzeller, Gesine Gleffe, Roman Hasert und Benedikt Leinss, die sich in unterschiedlichster Weise in die Vorbereitung und Durchführung der Flüge und Auswertung dieser Datensätze eingebracht haben. Ohne die Unterstützung dieser Personen wäre die Durchführung und Auswertung dieser Testflüge kaum möglich gewesen!

Literatur

- ABDEL-WAHAB, M., WENZEL, K. & FRITSCH D. (2011): Reconstruction of Orientation and Geometry from large Unordered Datasets for Low Cost Applications. Proceedings LC3D Workshop, Berlin, Dezember 2011.
- BROWN, D., 1976: The bundle method – progress and prospects, – International Archives of Photogrammetry, 21(3), ISP congress, Helsinki, 1-33.
- CRAMER, M. (2010): The DGPF-Test on Digital Airborne Camera Evaluation – Overview and Test Design, Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation (PFG). Heft 2(2010), pp. 75-84, online verfügbar unter <http://www.dgpf.de/neu/WWW-Projekt-Seite/PDF/01-PFG02-2010-Ueberblick-FinalVersion-20100112.pdf> (letzter Zugriff am 27.01.2012).
- CRAMER, M. (2005): 10 Years ifp Test Site Vaihingen/Enz: An Independent Performance Study. Photogrammetric Week '05, Wichmann, Heidelberg, pp. 79-92, online verfügbar unter <http://www.ifp.uni-stuttgart.de/publications/phowo05/120cramer.pdf> (letzter Zugriff am 27.01.2012).
- FRASER, C. (1997): Digital camera self-calibration, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Volume 52, Issue 4, August 1997, Pages 149–159.
- GRÜN, A. (1978): Accuracy, reliability and statistics in close-range photogrammetry, Inter-congress symposium, International Society for Photogrammetry, Com. V, Stockholm, Sweden.
- HAALA, N., CRAMER, M., WEIMER, F. & TRITTLER, M. (2011): Performance test on UAV-based photogrammetric data collection, Proceedings of the International Conference on Unmanned Aerial Vehicle in Geomatics (UAV-g), Zurich, Switzerland, September 14-16, 2011, online verfügbar unter http://www.geometh.ethz.ch/uav_g/proceedings/haala (letzter Zugriff am 27.01.2012).
- LÄBE, T. & FÖRSTNER, W. (2008): Geometric stability of low-cost consumer cameras, in IAPRS, Vol.XXXV, part B1, online verfügbar unter <http://www.isprs.org/proceedings/XXXV/congress/comm1/papers/95.pdf> (letzter Zugriff am 27.01.2012).
- LOWE, D. (2004): Distinctive image features from scale-invariant keypoints, 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, Wichmann, Heidelberg, pp. 189-194. online verfügbar

unter <http://www.ifp.uni-stuttgart.de/publications/phowo01/Sigle.pdf> (letzter Zugriff am 27.01.2012).

SNAVELY, N., SEITZ, S. & SZELISKI, R. (2007): Modeling the World from Internet Photo Collections. *International Journal of Computer Vision*, 2007.

WEIMER, F., TRITTLER, M., JOOS, A., GROS, M., POSCH, A. & FICHTER, W. (2010): FPGA-based onboard computer system for mini aerial vehicles. *International Micro Air Vehicle Conference*, Braunschweig, 2010.

Potential neuer großformatiger digitaler Kameras

KARSTEN JACOBSEN

Zusammenfassung: Mit den neuen großformatigen digitalen Kameras DMC II 140, 230 und 250 hat sich das Potential der digitalen Kameras weiter verbessert und erlaubt eine Steigerung der Wirtschaftlichkeit. Allerdings sollten die Spezifikationen der Kameras nicht ungeprüft für Projektplanungen verwendet werden um die Erfüllung der verlangten Genauigkeit und Objekterkennbarkeit garantieren zu können. Die Systeme müssen auf geometrische Genauigkeit und effektive Pixelgröße untersucht werden. Anhand mehrerer Testfeldbefliegungen und eines operationellen Bildflugs wurden die genannten Systeme untersucht, womit eine Grundlage für Projektplanungen gegeben ist.

1 Einleitung

Digitale Luftbildkameras haben analoge Kameras weitgehend ersetzt. Die Vorteile der original digitalen Luftbilder gegenüber gescannten Fotos sind zu offensichtlich als dass noch Zweifel am Sinn des Einsatzes digitaler Kameras bestehen. Die Kapazität der digitalen Luftbildkameras hat erneut zugenommen. Mit der Z/I Imaging DMC II und der UltraCam Eagle stehen jetzt Kameras mit 250 bzw. 260 Mega Pixel zur Verfügung. Die Erhöhung der Pixelzahl wurde bei der DMC II durch sehr großformatige monolithische CCDs und bei der UltraCam Eagle durch weitere Verkleinerung der Pixel erreicht. Sehr großformatige CCDs stellen eine sehr hohe Anforderung an die Ebenheit der Sensoren und die Verkleinerung der Pixel bei den zusammengesetzten UltraCam-Bildern erhöhen relativ die geometrischen Probleme der Zusammensetzung der virtuellen Bilder. Aus diesen Gründen ist eine Untersuchung des geometrischen Potentials der neuen Kameras erforderlich. Um den Informationsgehalt der Bilder durch eine Verkleinerung der Pixel voll ausnutzen zu können sind entsprechend gute Optiken erforderlich. Eine Untersuchung der effektiven Pixelgröße ist deswegen eingeschlossen. Leider hat sich ein Testflug verzögert weswegen in die schriftliche Version die Ergebnisse der UltraCam Eagle nicht mit aufgenommen werden konnte. Die Kombinationen von Mittelformatkameras werden hier nicht betrachtet da sie nicht direkt mit den vorgenannten Kameras vergleichbar sind.

2 Technische Daten der neuen großformatigen Kameras

Die Versionen der DMC II basieren auf von DALSA neu entwickelten, sehr großformatigen CCD-Arrays von etwa 96 mm x 82 mm (Abb. 1). CCDs dieser Größe hatten zuvor eine eingeschränkte Qualität, lange Auslesezeiten oder Ausschussraten, die sie zu teuer machten. Die lithographische Herstellungsmaske für die CCDs ist für das Großformat nicht ausreichend weswegen der Waver schrittweise belichtet wird. Die Zusammensetzungsgenauigkeit der Einzelbelichtungen soll im Bereich von 0,1 μm liegen (STOLDT 2010) und wäre dementsprechend vernachlässigbar. Im Gegensatz zu Z/I-Imaging hat Vexcel Imaging die CCD-Größe nicht verändert, sondern die Pixelanzahl vergrößert indem die Pixel verkleinert wurden. Diese unveränderte Technologie von Vexcel Imaging erfordert nach wie vor die geometrisch nicht unproblematische Zusammensetzung der Einzelbilder.

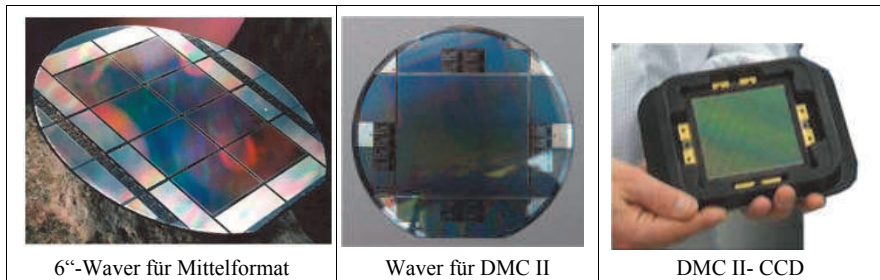


Abb. 1: Waver und CCD-Größe (STOLDT 2010)

Kamera	Pixelanzahl (Kamera)		Pixelgröße [µm]	f [mm]	Δt [sec]	Bildgröße [mm]		Pan/ms	Mega-pixel
	x	y				x	y		
DMC	7680	13824	12,0	120	2	49,15	86,02	1:4,6	106
DMCII 140	11200	12096	7,2	92	2	80,64	87,09	1:2,0	135
DMCII 230	14144	15556	5,6	92	1,7	79,21	87,11	1:2,5	220
DMCII 250	14656	17216	5,6	112	2,3	82,41	96,41	1:3,2	249
UC D	7500	11500	9,0	101,4	1	67,50	105,5	1:3,0	86
UC X	9420	14430	7,2	100,5	1,4	67,82	103,9	1:3,0	136
UC Xp	11310	17310	6,0	100	2	67,86	103,9	1:3,0	196
UC Eagle	13080	20010	5,2	80 / 210	1,8	68,02	104,1	1:3,0	261

Tab. 1: Technische Daten der DMC und der UltraCam-Versionen

Wie aus Tabelle 1 ersichtlich, hat sich das Format der virtuellen Bilder der UltraCam über die verschiedenen Versionen praktisch nicht verändert, das CCD-Format liegt nach wie vor bei etwa 24mm x 36mm und erfordert ein Stitching der 9 Teilbilder (LADSTÄDTER u.a. 2010). Das stitching basiert auf der Geometrie des grünen Farb-CCDs auf das die panchromatischen Teilbilder eingepasst werden, wodurch einige vorher aufgetretene Geometrie-probleme beseitigt wurden. Die Einpassung der 9 panchromatischen Teilbilder auf das um den Faktor 3,0 linear kleinere Farbbild ist allerdings auch nicht optimal.

Die monolithischen DMCII-CCDs zeigten keinerlei Tendenzen eines Einflusses der schrittweisen Belichtung der CCDs, die Herstellerangaben (STOLDT 2010) über die Genauigkeit scheinen somit realistisch zu sein. Da ein geometrischer Einfluss der Lage der einzelnen Pixel innerhalb eines CCDs bekanntermaßen keinen relevanten Einfluss hat, verbleibt, wie bei allen CCDs, ein Einfluss durch die Unebenheit, die auch durch thermische Deformation hervorgerufen oder verändert werden kann. Deformationen durch thermische Einflüsse sind vor allem zu erwarten, wenn die CCDs an mehreren Stellen am Kamerakörper fixiert sind, wie es bei einigen Mittelformatkameras der Fall ist. Durch die unterschiedliche Ausdehnung des Kamerakörpers und des Keramikträgers der CCDs kommt es dann zu Aufwölbungen der CCDs. Diese Einflüsse

sind zu untersuchen. Bei großen CCDs, wie sie die DMCII-Versionen verwendet, ist eine Ebenheit innerhalb von 1 µm praktisch nicht erreichbar sondern hat im Rahmen der Kamerakalibrierung bestimmt und berücksichtigt zu werden. Dieses setzt eine unveränderte 3D-Oberfläche der CCDs voraus. Die Kamerakalibrierung wird bei der Erstellung der DMCII-Farbbilder berücksichtigt, womit die verfügbaren Bilder weitgehend eine exakt perspektive Geometrie haben sollten.

3 Untersuchung der Kamerageometrie

Das Potential und die Genauigkeit der DMCII-Kameras wurden anhand von Testflügen und eines operationellen Bildfluges der Stadt Hannover untersucht. Die Ergebnisse der Untersuchung der DMCII 140 wurden bereits in JACOBSEN 2011 publiziert. Die DMCII 140 und die DMCII 250 wurden mittels jeweils dreier Flughöhen und entsprechenden Objektpixelgrößen (ground sampling distance GSD) von etwa 5 cm, 9 cm und 15 cm mit großer Bildüberdeckung untersucht. Bei der DMCII 230 beschränkte sich die Untersuchung von zwei Kameras auf jeweils einen Flug mit etwa 5,4 cm GSD wie auch die Untersuchung einer zweiten DMCII 250. Mittels des Bildfluges Hannover, der 957 Bilder mit 7 cm GSD umfasst, wurde die DMCII 230 zusätzlich verifiziert.

<p>Bildmaßstab 1:9658 5,4 cm GSD 60% Längsüberdeckung 40% Querüberdeckung + Querstreifen Objektbild: 758m x 906m Flughöhe über Grund: 1081m</p>	<p>Bildmaßstab 1:16813 9,4 cm GSD 60% Längsüberdeckung 60% Querüberdeckung + Querstreifen Objektbild: 1320m x 1579m Flughöhe über Grund: 1883m</p>	<p>Bildmaßstab 1:27824 15,6 cm GSD 80% Längsüberdeckung 80% Querüberdeckung + Querstreifen Objektbild: 2184m x 2613m Flughöhe über Grund: 3116m</p>

Abb. 2: Flugstreifen und Projektionszentren der Befliegungen mit der DMCII 250

Die Bildüberdeckungen und technischen Daten der DMCII 140-Testflüge sind ähnlich der Bildanordnung der Testflüge mit der DMCII 250 (Abb. 2). Dagegen wurde der Testblock mit der DMCII 230 nur mit 4 Ost-West-Flugstreifen und zwei Querstreifen befliegen. Wegen der

unterschiedlichen Kammerkonstanten sind die Flughöhen über Grund etwas voneinander abweichend.

Alle Testblöcke waren ähnlich stark verknüpft wie der in Tabelle 2 näher dargestellte Block der DMCII 250 mit 9,4 cm GSD. Die Verteilung der Bild- und Objektpunkte, sowie die Bildverknüpfung dieses Blocks sind auch in Abb. 3 näher dargestellt. Alle Blöcke haben im Durchschnitt über 200 Bildpunkte je Bild, der operationelle Block sogar 744. Mit Ausnahme des operationellen Blocks sind die Bildpunkte in den Bildern ähnlich gleichmäßig verteilt wie in Abb. 3 dargestellt.

In Bild	25	102 Punkte = kleinste Anzahl										
In Bild	11	303 Punkte = größte Anzahl										
Anzahl der Bilder je Objektpunkt												
Bilder/Punkt:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Anzahl der Objektpunkte:	130	196	303	387	203	305	69	49	50	6	3	1
Maximale Anzahl Bilder/Punkt	:	12										
Objektpunkte	:	1572										
Bilder	:	32										
Summe der Bildpunkte	:	7124										

Tab. 2: Informationen über die Bildverknüpfung – DMCII 250, 9,4 cm GSD

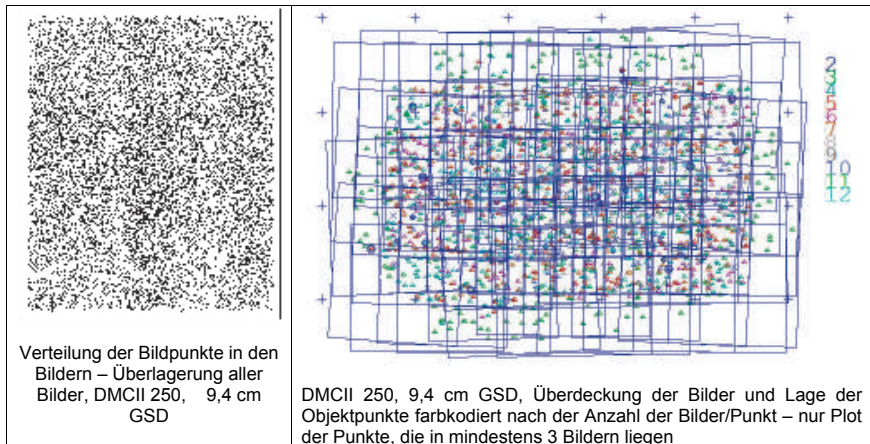


Abb. 3: Beispiel der Verteilung der Bildpunkte in den Bildern und Überblick über die Blockverknüpfung

Die Untersuchung der Kameras erfolgte mittels des Hannoverschen Blockausgleichungsprogrammsystems BLUH. Systematische Bildfehler wurden mit dem Standardsatz zusätzlicher Parameter (Parameter 1 – 12) und einer Gruppe von 8 zusätzlichen Parametern (Parameter 81 - 88), die besonders die Deformation der Bildecken modellieren können, berechnet (JACOBSEN et al. 2010). Die spezielle Modellierung der Bildecken hatte sich besonders für Mittelformat-

kameras als notwendig herausgestellt. Zusätzlich zu der Bildgeometrie ließ sich die Objektpunktgenauigkeit mittels einer ausreichenden Anzahl von unabhängigen Vergleichspunkten bestimmen.

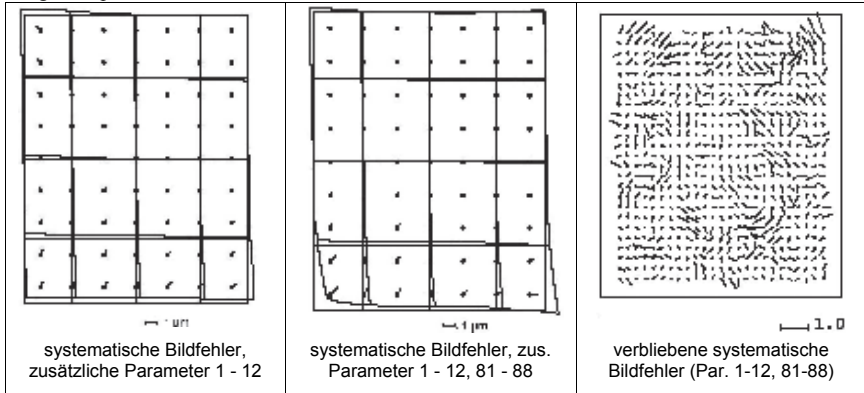


Abb. 4: systematische Bildfehler DMCII 250, 9,4 cm GSD

Die durch Selbstkalibrierung mit zusätzlichen Parametern bestimmten systematischen Bildfehler (Abweichung der tatsächlichen Bildgeometrie vom Modell der Zentralperspektive) sind, wie aus Abbildung 4 und Tabelle 3 ersichtlich, für alle DMCII-Blöcke sehr klein. Durch die speziellen Parameter 81 - 88, die die Geometrie der Bildecken erfassen können, werden noch kleine Deformationen der Bildecken erfasst, die aber im gezeigten Beispiel 1,3 µm nicht überschreiten. Aus der Analyse der Residuen lassen sich die nicht durch Selbstkalibrierung erfassten systematischen Bildfehler abschätzen (Abb. 4 rechts). Sie erreichen in obigem Beispiel, das typisch für die DMCII ist, im Quadratmittel 0,15 µm und maximal 0,66 µm.

	GSD	Zusätzliche Parameter 1 - 12			Zusätzliche Parameter 1 – 12, 81-88		
		Sx	Sy	Max	Sx	Sy	Max
DMCII 140	5,7cm	0,31	0,30	0,90	0,46	0,42	1,74
	9,5cm	0,22	0,18	0,60	0,15	0,16	0,84
	20,2cm	0,62	0,63	1,60	0,68	0,65	1,90
DMCII 230	5,4cm	0,19	0,11	0,50	0,13	0,18	0,90
	7cm	0,22	0,15	0,50	0,21	0,31	0,90
DMCII 250	5,4cm	0,23	0,37	0,90	0,23	0,37	0,90
	9,4cm	0,17	0,23	0,50	0,23	0,22	1,10
	15,6cm	0,13	0,16	0,50	0,14	0,42	1,80
	2/5,3cm	0,21	0,36	0,90	0,21	0,27	0,70

Tab. 3: Quadratmittel und maximale Beträge der systematischen Bildfehler [µm]

In der Regel sind die systematischen Bildfehler mit dem Standardsatz der zusätzlichen Parameter (1 – 12) etwas kleiner als mit dem erweiterten Ansatz (1 – 12, 81 – 88). Durch die Parameter 81 bis 88 können geometrische Abweichungen der Bildecken besser erfasst werden, wie aus dem Vergleich der Abbildungen 4 Mitte und 4 links ersichtlich. Diese systematischen Bildfehler sind aber insgesamt sehr klein und überschreiten selbst im Extremfall 0,34 Pixel nicht. Mit dem Standardsatz der zusätzlichen Parameter wird nur in einem Fall der Extremwert von 1,60 μm erreicht. Das liegt in diesem Fall an einer kleinen radialsymmetrischen Verzeichnung. Ohne die radialsymmetrische Verzeichnung liegt der Maximalbetrag nur bei 0,5 μm . Der operationelle Block (DMCII 230 mit 7 cm GSD), der 957 Bilder enthält, liegt eher im unteren Niveau der Größe der systematischen Bildfehler. Er zeigt, dass die intern berücksichtigte Kamerakalibrierung der DMCII-Versionen auch über einen längeren Zeitraum zwischen Firmenkalibrierung und Bildflug stabil ist. Insgesamt sind die systematischen Bildfehler der DMCII-Versionen erheblich kleiner als für alle im Rahmen des DGPF-Kameratests untersuchten Kameras (JACOBSEN et al. 2010). Das bezieht sich auch auf die radialsymmetrische Verzeichnung, die bei anderen Kameras deutlich von der Flughöhe, entsprechend der Temperatur, abhängig ist. Die hervorragende geometrische Stabilität der DMCII-Versionen wirkt sich auch auf den Unterschied der Blockausgleichsgenauigkeit mit und ohne Selbstkalibrierung aus.

4 Genauigkeit der Objektpunkte

Die mittels Blockausgleichung an unabhängigen Vergleichspunkten erzielten Objektkoordinatengenauigkeiten sind in der Regel schwierig miteinander zu vergleichen da sie meist von der Genauigkeit und Identifizierbarkeit der Pass- und Vergleichspunkte sowie der Anzahl und Verteilung der Passpunkte abhängen. Aussagekräftig sind dagegen die relativen Vergleiche innerhalb des gleichen Testfeldes bei ähnlicher Objektpixelgröße.

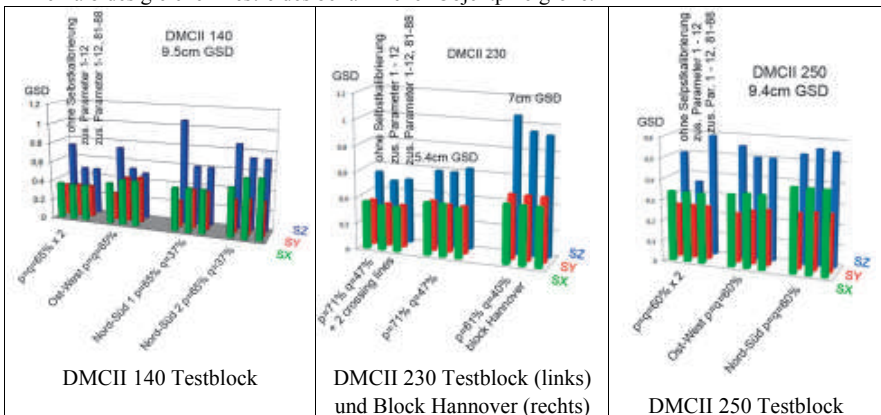


Abb. 5: Quadratmittel der Widersprüche unabhängiger Vergleichspunkte [GSD]
 p = Längsüberdeckung, q = Querüberdeckung

Die in Abb. 5 dargestellten Ergebnisse basieren auf Ausgleichungen mit jeweils etwa 9 Passpunkten, nur im Fall des Blocks Hannover war eine deutlich höhere Anzahl von Passpunkten erforderlich. Die mit dem Block Hannover erzielte Genauigkeit (Quadratmittel der Widersprüche an unabhängigen Vergleichspunkten) liegen nicht auf dem gleichen Niveau wie die der Testblöcke, was auf eine beschränkte Genauigkeit der Pass- und Vergleichspunkte des Praxisblocks Hannover zurückzuführen ist. Generell führt der erweiterte Ansatz der zusätzlichen Parameter (81 – 88), der die Geometrie der Bildecken besser modellieren kann, nicht zu einer Verbesserung der Objektkoordinaten. Die systematischen Bildfehler werden damit zwar besser erfasst, wegen des kleinen Betrags wirkt sich das aber nicht auf die Objektkoordinaten aus. Für die Verbesserung der Höhengenaugigkeit ist eine Ausgleichung mit dem Standardsatz der zusätzlichen Parameter sinnvoll, führt aber wegen der kleinen systematischen Bildfehler nicht in jedem Fall zu besseren Standardabweichungen der unabhängigen Vergleichspunkte. Die Lagegenauigkeit wird praktisch von der Selbstkalibrierung nicht beeinflusst. Die nicht dargestellten Ergebnisse der anderen Objektpixelgrößen bestätigen den Trend der gezeigten Ergebnisse. Generell liegt die empirische Standardabweichung der Höhenkomponente auch für Blöcke mit einfacher Überdeckung unter einem GSD. Auch für den etwas schmaleren Bildwinkel der DMCII 250 der zu einem Basis-Höhenverhältnis bei $p=60\%$ von 1:3,4 statt 1:2,9 bei der DMCII 230 führt, wurden praktisch die gleichen Höhengenaugigkeiten erzielt wie mit den beiden anderen DMCII-Versionen.

5 Bildqualität

Die nominelle Pixelgröße muss nicht mit der für die Bildqualität wirksamen Pixelgröße übereinstimmen (JACOBSEN 2008). Je kleiner die Pixel sind und je größer die Blendenzahl (kleinere Optik), desto kritischer wird die tatsächliche Bildqualität. Die DMCII begrenzt diese Probleme mit der großen Optik. Trotzdem sollte die wirksame Pixelgröße durch Kantenanalyse untersucht werden.

Kamera	blau	grün	rot
DMCII 230	0,98	0,97	0,98
DMCII 250	0,87	0,88	0,84

Tab. 4: Faktor für effektive Pixelgröße bestimmt durch Kantenanalyse

Eine plötzliche Helligkeitsänderung im Objektraum, wie sie bei Schatten oder Gebäuden auftritt, wirkt sich im Bildraum mit einer kontinuierlichen Grauwertänderung aus. Eine Differenzierung des Grauwertprofils im Bild führt zur Punktverbreitungsfunktion (point spread function). Die Punktverbreitungsfunktion ist theoretisch eine Gaußfunktion. Aus der Breite der Funktion ergibt sich der Faktor für die effektive Pixelgröße. Der Faktor multipliziert mit der tatsächlichen Pixelgröße ergibt die effektive Pixelgröße. Dementsprechend bedeutet der Faktor 1,0, dass die tatsächliche Pixelgröße mit der nominellen übereinstimmt. Ein größerer Faktor bedeutet, dass das Bild eine schlechtere radiometrische Qualität hat als es der nominellen Größe entspricht. Ein

Faktor kleiner als 1,0 sollte nicht auftreten, es sei denn, dass das Bild kontrastverstärkt wurde und ein niedriges Signal-Rausch-Verhältnis hat. Leicht verrauschte Bilder sind durch Kontrastverstärkung nicht zu verbessern. Die Werte in Tabelle 4 bedeuten somit, dass die untersuchten Bilder der DMCII 230 und der DMCII 250 radiometrisch einwandfrei sind und der nominellen Pixelgröße entsprechen. Es wurden die für den praktischen Gebrauch zur Verfügung stehenden Farbbilder untersucht, die aus der Fusion der niedriger aufgelösten Farbkanaäle mit dem hochaufgelösten panchromatischen Bild entstehen. Da diese fusionierten Bilder vom panchromatischen Kanal dominiert werden, ist es nicht verwunderlich, dass die in Tabelle 4 gezeigten Werte für die Farbkanaäle derselben Kamera gut übereinstimmen. Es zeigte sich keine Abhängigkeit der Faktoren von der Lage der untersuchten Kanten im Bild, speziell dem radialen Abstand vom Bildzentrum.

6 Zusammenfassung und Schlussfolgerung

Alle untersuchten Bildverbände der drei DMCII-Versionen zeigen systematische Bildfehler die deutlich kleiner sind als bei allen von mir vorher untersuchten Kameratypen. Damit ist das Problem nicht berücksichtigter systematischer Bildfehler bei der Einzelmodellauswertung gelöst, sie können einfach ignoriert werden.

Die durch Blockausgleichung ermittelten Objektkoordinaten haben selbst für die kritische Höhenkomponente bei Verbänden mit einfacher Bildüberdeckung Standardabweichungen unter einer Objektpixelgröße.

Die radiometrische Bildqualität der DMCII-Bilder ist einwandfrei, die für die Bildqualität wichtige effektive Pixelgröße entspricht der nominellen.

7 Literaturverzeichnis

- JACOBSEN, K., 2008: Sagt die Anzahl der Pixel alles? DGPF Jahrestagung Oldenburg 2008
- JACOBSEN, K., 2009: Effective resolution of digital frame images, ISPRS Hannover Workshop 2009, IntArchPhRS. Vol XXXVIII-1-4-7/W5
- JACOBSEN, K., CRAMER, M., LADSTÄDTER, R., RESSL, C., SPRECKELS, V., 2010: DGPF project: Evaluation of digital photogrammetric camera systems - geometric performance. PFG 2010 (2), pp 85 - 98
- JACOBSEN, K., 2011: Geometric Property of Large Format Digital Camera DMC II 140, PFG 2011/2, pp 71 -79
- LADSTÄDTER, R., GRUBER, M. & WIECHERT, A., 2010: Monolithic Stitching: One sensor geometry for multiple sensor camera. ASPRS 2010 Annual Conference San Diego.
- STOLDT, H., 2010: DALSA Ultra large CCD technology Customized for Aerial Photogrammetry, Vortrag bei ASPRS annual convention 2010, San Diego

Das komplette Sensor-Portfolio aus einer Hand – Hexagon GeoSpatial Solutions

MATHIAS MOTZ¹ & GERHARD LAUENROTH²

Zusammenfassung: Im Jahr 2010 übernahm der schwedische Hexagon-Konzern die Firma Intergraph. Diese Übernahme machte es möglich, die beiden weltweit führenden Anbieter auf dem Gebiet der Photogrammetrie-Sensorik - den Bereich Airborne Sensors der Firma Leica Geosystems und den bis dahin in der Firma Intergraph integrierten Geschäftsbereich Z/I Imaging – zu einem neuen Bereich Hexagon Geospatial Solutions unter dem Dach von Hexagon Geosystems zusammenzuschließen. Damit hat der Markt erstmals die Möglichkeit, von einem einzigen Anbieter alle gebräuchlichen Sensoren zu beziehen – sowohl großformatige Zeilen- und Flächenkameras als auch Mittelformat-Kameras und LIDAR-Systeme verschiedenster Leistungsklassen in Verbindung mit eigenen Flight-Management- und GNSS/IMU-Systemen. Bei allen diesen Produktfamilien gab es im Jahr 2011 Innovationen, die im nachfolgenden Beitrag vorgestellt und erläutert werden sollen.

1 Einleitung

Derzeit liegen die Hauptaufgaben photogrammetrischer Sensoren weltweit vorrangig auf dem Gebiet der Orthophotoproduktion. Das heißt: Erfassung hochqualitativer Bild- und Orientierungsdaten, Gewinnung hoch aufgelöster digitaler Höhenmodelle und möglichst vollautomatische Erstellung von Orthophotomosaiken. Diesem Trend folgt Hexagon Geospatial Solutions mit seinem gesamten Sensor-Portfolio: Die neue modulare LIDAR-Sensorfamilie (ALS70) ermöglicht die hochgenaue Messung digitaler Geländemodelle, wobei der Anwender wählen kann, welchen Level bezüglich Punktdichte und Flughöhe er vorrangig benötigt. Sollten die Anforderungen steigen, kann der Sensor jederzeit auf den höheren Level umgerüstet werden. Da beim Laserscanning immer mehr Firmen eine Kombination mit einer Mittelformatkamera einsetzen, bietet auch Hexagon Geospatial Solutions hier ein Mittelformat-System (RCD30) an, das sich gegenüber dem Wettbewerb durch eine mechanische FMC-Lösung und die Aufnahme von 4 – Kanal- Bildern (R, G, B, NIR) auszeichnet. Die photogrammetrischen Flächensensoren (DMC II) bieten höchstmögliche Genauigkeit in Verbindung mit radiometrischer Qualität zum Einsatz in der klassischen photogrammetrischen Auswertetechnologie. Die großformatigen 3-Zeilen-Sensoren (ADS80) ermöglichen im Zusammenspiel mit der aktuellen Auswertesoftware XPro eine extrem produktive Orthophoto-Generierung höchster Qualität.

1) Mathias Motz, Hexagon Geosystems, Heinrich-Wild-Str., CH-9345 Heerbrugg; E-Mail: mathias.motz@hexagongeosystems.com

2) Gerhard Lauenroth, Z/I Imaging GmbH, Ziegelstraße 12, 73431 Aalen; E-Mail: gerhard.lauenroth@ziimaging.com

2 ALS70 – die neue LIDAR-Generation



Abb. 1: ALS70 - Gesamtsystem

Alle Modelle in der ALS70-Reihe nutzen ein revolutionäres neues Systemsteuermodul (Point Density Multiplier). Dieser Modul gleicht das Verhältnis von Scanrate und Pulsrate aus und ermöglicht so in jeder Flughöhe Pulsraten, die den theoretischen Limits nahekommen. Zusätzlich bringt diese Technologie die Vorteile des MPiA-Verfahrens (MultiPulse in Air) voll zur Geltung. Das Verfahren bringt folgende Vorteile:

- Keine Beschränkung für die Anzahl der Echos pro Puls für größere Detailerkennung in der forstlichen Anwendung.
- 40% bessere Signaltrennung zwischen einzelnen Echos zur besseren Erkennbarkeit der Bodenhöhe bei niedriger Vegetation.
- 25% weniger elektronische Baugruppen verbessern die Zuverlässigkeit.
- 3 nutzerdefinierbare Scan-Pattern (Sinus, Dreieck, Raster) zur beliebigen Vorgabe der Punktverteilung.
- AutoScan: automatische Justierung der Scanrate für eine gleichmäßigere Punktverteilung in Flugrichtung bei Variationen der Fluggeschwindigkeit (ALS70-CM und ALS70-HP).
- Optional voll integrierter Full Waveform Digitizer (FWD) für die Waveform-Auswertung bis zu 120 kHz.

ALS70-CM und ALS70-HP verfügen über ein einzigartiges Mehrstrahl-Scansystem. Dieses neue Scanverfahren ermöglicht es, die Pulsrate gegenüber herkömmlichen Systemen praktisch zu verdoppeln, ohne mehrere Scanner oder Laser zu benutzen. Diese Lösung hat den Reiz, dass man das bei gleichbleibender Stabilität und Konsistenz der gemessenen Daten erreicht, ohne das System komplexer und die Steuerung komplizierter zu machen.

Tab. 1: Vergleich der Parameter von ALS70 CM, HP und HA

Main performance specifications	Model		
	ALS70CM	ALS70HP	ALS70HA
Maximum range (ft/m)	1500	3500	5000
Maximum Measurement Rate (Hz)	500	500	250
Altitude (degrees)	0.1 to 90 degrees, user definable		
Roll (degrees) (automatic attitude degrees)	70 degree, 00		
Scan Pattern (user definable)	Sine, Triangle, Raster		
Maximum Scan Rate (Hz)	200	100	100
	140	70	70
	70	40	40
Number of Scans	Unlimited		
Number of Density Measurements	2 per second, 100		
Accuracy	± 1cm (3.3ft)		
Storage Media	Removable 3.5" or 5.25" HD		
Storage Capacity (hours/minutes) - measurement rate	#		
Physical specifications (unmounted)			
Size (mm) (height)	100 x 100 x 100mm	100 x 100 x 100mm	100 x 100 x 100mm
Weight (kg)	4.0	4.0	4.0
Operating Temperature	-40 to 60 degrees Celsius		
Power Consumption	1.0 to 1.5 Watts		
Flight Mounting	Optional		
Accessories	ALS70-100, ALS70-200, ALS70-300		

Das modulare Design des ALS70 bietet viele Vorteile – inclusive einfacher Upgradeoptionen. Haben Sie Ihr Geschäft mit Corridor Mapping bei niedrigen Flughöhen begonnen, brauchen jetzt aber größere Leistung? Jeder ALS70-CM kann vor Ort zum ALS70-HP aufgerüstet werden. Und

jetzt müssen Sie Hochbefliegungen anbieten? Macht nichts - ALS70-CM und ALS70-HP können bei uns zum ALS70-HA umgerüstet werden ... und umgedreht.

3 RCD30 – das neue Mittelformat

Mittelformatkameras dienen heutzutage hauptsächlich zur Aufnahme kleiner oder mittlerer Projekte mit niedrigem Budget oder als Ergänzung zu LIDAR-Systemen, um die Punktwolken mit Bilddaten kombinieren, überprüfen oder gleich zur Orthophotoberechnung nutzen zu können. Dabei liegt das Manko beim Mittelformat einerseits darin, dass die hier üblicherweise verwendeten Bayer-Pattern-Sensoren nur eingeschränkt einen Bildwanderungsausgleich erlauben und andererseits darin, dass immer mehr Abnehmer auch den Infrarot-Kanal fordern. Diese Probleme löst die RCD30 in überzeugender Weise.



Abb. 2: RCD 30 – ein Größenvergleich

Folgende Eigenschaften zeichnen diese Kamera aus:

- Es ist eine metrische 60 MPixel Mittelformatkamera.
- Sie wird als modulares System für die Kombination mit dem ALS-LIDAR-System, aber auch als Standalone-Kamera angeboten. Hier gibt es Konfigurationen als Single- oder Dual-Head-System zur Aufnahme in einer kreiselstabilisierten Aufhängung.
- Die Kamera liefert RGB- und koregistrierte RGBN-Bilder.
- Sie verfügt über eine mechanische Forward Motion Compensation in zwei Richtungen.
- Speziell entwickelte Zeiss-Optik (Bajonett-Wechselobjektive $f= 50$ mm und $f= 80$ mm) mit im Feld wechselbarem Verschluss garantiert höchste Bildqualität.
- Durch die Kamerasteuerung werden bis zu fünf Einzelkameras unterstützt.
- Die Kamera ist bezüglich Flugplanung, Flight Management und GPS/IMU voll in den Leica-Workflow integriert.
- Die direkte Georeferenzierung kann auch im Standalone-Modus durch die integrierte GNSS/IMU-Prozessierung erfolgen.
- Das Postprocessing ist unkompliziert.
- Mit insgesamt 10,5 kg ist das komplette Kamerasystem ein ausgesprochenes Leichtgewicht.
- Das System entspricht natürlich allen gängigen Sicherheitsstandards.



Abb. 3: ALS 70 mit RCD 30 auf einer kreiselstabilisierten PAV 80-Aufhängung

4 DMC II – der Großformat-Flächensensor

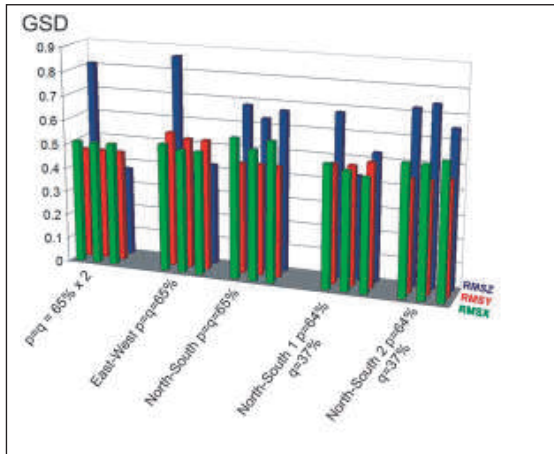
Seit 2010 wird die neue Frame-Sensor-Generation DMC II ausgeliefert – eine Familie von hochauflösenden Luftbildkameras, die als weltweit erster Großformat-Sensor das panchromatische Bild mit einem einzigen CCD-Chip abbilden, anstatt es aus vier oder mehr Einzelbildern zusammensetzen. Seit dem Jahr 2011 ist nun die Serie komplett: die DMC II₁₄₀ mit 92 mm Brennweite und 140 MPixel Bildgröße, die DMC II₂₃₀ mit 92 mm Brennweite und 230 MPixel Bildgröße und die die DMC II₂₅₀ mit 112 mm Brennweite und 250 MPixel Bildgröße.



Abb. 4: DMC II – Kamerakörper mit Objektivkonus und 2 SSD-Speichermodulen

Diese Konfiguration auf der Basis eines PAN-Sensors mit dem größten CCD-Chip der Welt und vier 40 MPixel-Farbsensoren für Rot, Grün, Blau und Infrarot bietet eine Reihe von Vorteilen. Hauptsächlich ist es natürlich die bestechende geometrische Genauigkeit, die einerseits einer speziell entwickelten Optik zuzuschreiben ist, aber andererseits davon herrührt, dass die ganzen systematischen Fehler beim Zusammenrechnen („Stitching“) von mehreren PAN-Sensoren entfallen. Eine Untersuchung der Universität Hannover zeigte ganz klar, dass die Genauigkeit

einer AT über einem Testfeld bei der DMC II₁₄₀ auch ohne Selbstkalibrierung und zusätzliche Parameter besser ist als bei allen Vorgängermodellen mit Selbstkalibrierung und zusätzlichen Parametern. Eine entsprechende noch unveröffentlichte Diplomarbeit zur DMC II₂₃₀ bei der HTW Dresden bestätigt diese Ergebnisse.



Tab. 2: DMC II₁₄₀ - Vergleich Bündelblock-Ausgleichsergebnisse mit 5.7cm GSD, RMS-Differenzen an Kontrollpunkten; linke Säulen: ohne zusätzliche Parameter, mittlere Säulen: zusätzliche Parameter 1 – 12, rechte Säulen: zusätzliche Parameter 1 – 12 + 81 – 88. Gesamter Block: 144 Bilder, mit p=q=65% 72 Bilder, mit q=37% 36 Bilder (JACOBSEN, PFG 2011 / 2, 071 – 079, MÄRZ 2011)

Ein weiterer Vorteil dieses Sensorkonzepts ist das sehr gute PAN-sharpening-Verhältnis (zwischen 1:2 und 1:3,3), das eine optimale Farbqualität der prozessierten Bilder gewährleistet. Und Last but not Least: Das fast quadratische Bildformat – fast so, wie wir es von den filmbasierenden Kameras kennen – bietet eine Reihe weiterer Vorteile bei der Weiterverarbeitung der Daten in den handelsüblichen photogrammetrischen Auswertesystemen. Einerseits sinkt die Anzahl der zu verarbeitenden Bilder gegenüber der DMC (1. Generation) bei gleicher Bodenauflösung dramatisch (z.B. um 52% bei der DMC II₂₃₀); andererseits reduzieren sich aber auch die Anzahl der Flugstreifen, die Anzahl der erforderlichen Passpunkte und auch die Länge der zu kontrollierenden und zu editierenden Seamlines bei der Orthophoto-Mosaikberechnung. Diese Dinge sind allesamt kostenrelevant und damit ein erheblicher ökonomischer Vorteil im gesamten Verarbeitungsprozess.

Die Kameras sind ab jetzt mit je 2 Hochleistungs-SSD-Speichermodulen a 1,3 TB ausgestattet. Diese Speicherkapazität reicht auch bei 5 cm Bodenauflösung für acht Stunden Bildflug aus.

5 ADS80 – der 3-Zeilen-Sensor

Im Jahr 2001 brachte Leica Geosystems mit der ADS40 erstmals ein 3-Zeilen-Sensorsystem in den Markt. Damit wurde die photogrammetrische Bildaufnahme mit dem Pushbroom-Prinzip eingeführt, was für einige Auswerteprozesse (speziell die Orthophotoberechnung) durch die Bildgeometrie und ein einfacheres mathematisches Modell von Vorteil ist.

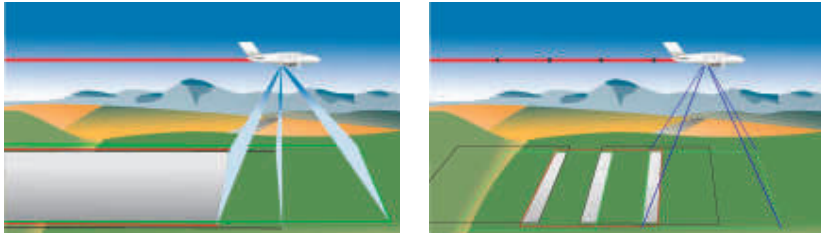


Abb. 5: Gegenüberstellung Pushbroom-Kamera und Flächensensor

Die neue Generation der Leica ADS80 gibt es mit zwei verschiedenen Sensorköpfen, die verschiedenen Anwendungsschwerpunkten Rechnung tragen. Sensorkopf SH91 als kostengünstigste Variante ist optimiert für die DTM-Generierung und Orthophotogenerierung sowie Stereobetrachtung in Schwarzweiß oder Farbe/Schwarzweiß; der Sensorkopf SH92 unterstützt zusätzlich die Stereoauswertung und weitere 3D-Anwendungen in Farbe.

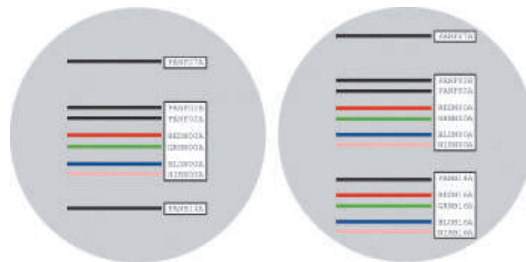







Abb. 6: Konfiguration Sensorkopf SH91 (links) und SH92 (rechts)

Bei beiden Sensorköpfen haben alle Sensorzeilen die gleiche Größe von 12.000 Pixeln; das heißt, dass diese Kamera von allen Großformat-Systemen die einzige ist, die die volle originäre Farbauflösung ohne Pan-Sharpening bietet. Aber: die zwei panchromatischen Zeilen des Nadir-Sensors sind um $\frac{1}{2}$ Pixel gegeneinander versetzt („staggered array“) und ermöglichen damit eine Verdopplung der Auflösung auf 24.000 Pixel im Nadir. Das ist die größte Flächenabdeckung im

Markt; das daraus resultierende Pan-sharpening-Verhältnis von 1 : 2 wird sonst nur von der DMC II140 erreicht, die aber nur das halbe Bildformat bieten kann.

In den letzten Jahren lag der Schwerpunkt der Entwicklung auf der Prozessierungssoftware XPro, die in viele Richtungen optimiert wurde. Der erreichte Status bei der Beschleunigung der Prozessierung ist beeindruckend. Inzwischen ist es bei geeigneter Server-Infrastruktur möglich, die Ergebnisse am nächsten Tag abzuliefern – ein erheblicher Nutzen speziell beim Einsatz in Katastrophengebieten.

		Total time WS with 6- server cluster	User action time
 Flight	1,200 km², 15cm GSD 12 lines, each 80 km, 3 Pan and 8 MS Approximately 7 hr flight at 130 knots		
 Download	400 GB ADS data format	4 h	0.5 h
 Geo-referencing	Trajectory calculation geo-referencing of L0 images	0.5 h 0.1 h	0.5 h 0.1 h
 Aerial triangulation	Automatic Point Measurement Bundle Adjustment	0.1 h 0.3 h	0.1 h 0.3 h
 Ortho photo	RGB or FCIR 1,200 km ²	1.7 h	0.1 h
		6.7 h	1.6 h

Tab. 3: Übersicht zu XPro-Prozessierungszeiten

Der im Modul XPro DSM neu integrierte Semi-Global-Matching-Algorithmus ermöglicht die Generierung von Oberflächenmodellen mit 1 Pixel Auflösung. Damit erschließen sich neue Anwendungen speziell im Bereich der Industriephotogrammetrie, der digitalen Stadtmodelle, der Hochwassersimulation oder der Erfassung von Verkehrswegen.

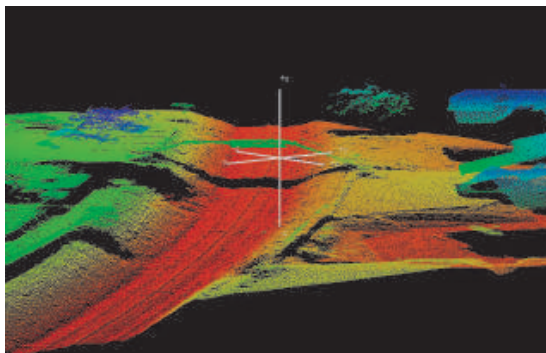


Abb. 7: Mit XPro DSM gerechnetes Oberflächenmodell mit 1 Pixel Auflösung

New Mathematical Self-calibration Models in Aerial Photogrammetry

RONGFU TANG¹, DIETER FRITSCH¹ & MICHAEL CRAMER¹

Zusammenfassung: In diesem Beitrag wird eine neue Gruppe von zusätzlichen Parametern (APs) zur Kalibrierung von Luftbildkamerasystemen vorgestellt. Die photogrammetrische Selbstkalibrierung kann zu einem wesentlichen Teil als funktionales Approximationsproblem der Mathematik verstanden werden. Unter Berücksichtigung der mathematischen Approximationstheorie, wird eine neue Gruppe von sogenannten Legendre APs basierend auf orthogonalen Legendre-Polynomen entwickelt. Der Theorie nach können Legendre APs die Verzeichnung aller digitalen flächenhaft aufzeichnenden Luftbildkameras kalibrieren, sofern eine hinreichend große Ordnung in den Polynomen gewählt wird. Diese Legendre APs können ebenfalls als überlegene Verallgemeinerung der konventionellen Polynommodelle vorgeschlagen von Ebner und Grün verstanden werden in den 1970er Jahren. Die hohe Leistungsfähigkeit dieser Legendre APs wird anhand der Datensätze des kürzlich durchgeführten DGPF-Projekts und anderer Testfeldbefliegungen demonstriert. Trotz der vielversprechenden Ergebnisse weisen wir auch auf wesentliche Schwachstellen aller auf Polynomen basierender APs hin, verursacht durch die hohen Korrelationen. Die Wahl algebraischer Polynome kann auch nicht optimal sein, und daher sind weiteren Arbeiten hin zu einer strengeren Selbstkalibrierung geplant.

1 Introduction

Aerial photogrammetry has seen a great revolution in the last decades. The navigation system, typically GPS/IMU integration, has been successfully incorporated into photogrammetry. It leads to direct georeferencing on camera exterior orientation and so-called integrated sensor orientation. This technique reduces the number of the ground control points (GCPs), increases realibility and flexibility and accelerates the photogrammetric mapping. Moreover, the introduction of various digital airborne cameras has greatly advanced the field. Most of the digital frame airborne cameras utilize multi-head construction and virtual large-image composition, while the latest DMC II cameras use very large single head system. Along with these remarkable developments, challenges have been raised. Of them, camera calibration is still a most crucial topic.

Camera calibration is an essential subject in photogrammetry and computer vision. Self-calibration by using additional parameters (APs) has been widely accepted and substantially utilized as an efficient calibration technique in photogrammetric society since 1970s. Traditionally, two types of self-calibration APs were developed for analogue single-head camera calibration: physical and mathematical. The development of physical APs was mainly attributed to D. C. Brown (BROWN, 1971) for close-range camera calibration and the APs later extended by attaching additional polynomials for aerial application (BROWN, 1976). The

¹ M.Sc. Rongfu Tang, Institut für Photogrammetrie, Universität Stuttgart, Geschwister-Scholl-Str. 24D, 70174 Stuttgart, Tel.: +49-711-68583387, e-mail: rongfu.tang@ifp.uni-stuttgart.de.

Prof. Dr.-Ing. Dieter Fritsch, Institut für Photogrammetrie, Universität Stuttgart, Geschwister-Scholl-Str. 24D, 70174 Stuttgart, Tel.: +49-711-68583386, e-mail: dieter.fritsch@ifp.uni-stuttgart.de.

Dr.-Ing. Micheal Cramer, Institut für Photogrammetrie, Universität Stuttgart, Geschwister-Scholl-Str. 24D, 70174 Stuttgart, Tel.: +49-711-68584118, e-mail: micheal.cramer@ifp.uni-stuttgart.de.

mathematical APs (or ‘polynomials APs’) were proposed by EBNER (1976) and GRÜN (1978), by using two- and four- order orthogonal bivariate polynomials respectively. For a review on the early work on camera calibration, see CLARKE & FRYER (1998). These APs, though being widely used for many years and even in digital era, may not be capable to fit the distinctive features of digital cameras, such as multi-head and virtual composition.

A considerable progress was made for the digital camera calibration. CRAMER (2009) and JACOBSEN et al. (2010) reported comprehensive empirical tests, in which lots of different APs were employed to compensate the image distortion. However, many of them are purely the combinations of the traditional APs while lack of solid physical or mathematical foundations. Further, the extra systematic effect caused by direct georeferencing demand overall system calibration rather than lens distortion calibration only (HONKAVAARA, 2004, CRAMER et al., 2010). Thus, self-calibration APs must be decoupled from the other correction parameters.

All the above motivate our present work on airborne camera calibration. We review the mathematical principle of self-calibration and point out that self-calibration can to a very large extent be considered as a function approximation problem in mathematics. Based on the mathematical approximation theory, a novel family of so-called Legendre APs is developed. The Legendre APs are orthogonal, rigorous, flexible and effective. The high performance of Legendre APs is extensively evaluated by using empirical test data. We also compare Legendre APs with other traditional APs from both theoretical and practical viewpoints. It is shown that Legendre APs can be considered in many ways as the superior generalization of the polynomials APs presented by EBNER (1976) and GRÜN (1978).

In spite of the encouraging results delivered by Legendre APs, we reveal one intrinsic deficiency of all polynomials APs, including those of EBNER (1976), GRÜN (1978) and Legendre APs. This deficiency is mainly caused by high correlations of their parameters. Consequently, polynomials may be a natural but probably not the optimal choice for self-calibration.

While some supplementary materials of our study on Legendre APs were presented in TANG et al. (2012), we will emphasize the mathematical principles behind self-calibration APs in this paper. In Section 2, the theory of polynomials approximation is reviewed and Legendre APs are constructed. The practical tests are demonstrated in Section 3. The comparisons are made between the Legendre APs and the traditional counterparts in Section 4, as well as the mathematical criticisms on polynomials APs.

2 Legendre self-calibration APs

The collinearity equation which is the mathematical fundamental of photogrammetry reads as follows.

$$\begin{aligned} x &= x_0 - c \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} + \Delta x(x, y) + \varepsilon \\ y &= y_0 - c \frac{r_{12}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{32}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} + \Delta y(x, y) + \varepsilon \end{aligned} \quad (1)$$

where Δx and Δy denote image distortion, ε random error. The denotations of other parameters can be seen in textbooks such like KRAUS (2007). The image distortion terms, $\Delta x(x, y)$ and $\Delta y(x, y)$, are two-variable functions whose form is unknown. They have to be approximated by some models, i.e., self-calibration APs.

This means, we need to seek a parametric model which can represent accurately the actual lens distortion. Do note that there are several kinds of basis functions available in

mathematics, whose combinations can approximate any unknown functions. Therefore, the distortion can be approximated by the linear combinations of the specific basis functions, even if little is known on the distortion. The coefficients of linear combinations can be fixed during the adjustment process. Therefore, photogrammetric self-calibration can to a very large extent be considered as a *function approximation* or, more precisely, a *curve fitting* problem in mathematics. In this paper, we adopt the algebraic polynomials as the basis functions for self-calibration. The general principle of the polynomial approximation is outlined as follows.

2.1 Orthogonal polynomials approximation

The algebraic polynomial approximation is founded on the Weierstrass Theorem (seen in many textbooks such as MASON & HANDSCOMB, 2002). It indicates that any univariate function can be approximated with arbitrary accuracy by a polynomial of sufficiently high degree. Among all the possible forms, the orthogonal polynomials (OPs) are often favored in both theoretical and practical applications. The OPs can be categorized into two types: discrete and continuous. The former is orthogonal on specific discrete measurements while the later is orthogonal over the whole domain of definition.

For the curve fitting problem, the analytical form of the function is unknown while some sample measurements are available. The unknown function can be approximated by the combination of OPs. If the number of the measurements is close to the degree of the used polynomials, the discrete OPs are usually employed and can be obtained by orthogonalization process. It is noteworthy that the discrete OPs are orthogonal on the measured locations only, but not necessarily on the others. Else, if the measurements are very dense and the number is much larger than the polynomials' degree, the continuous OPs is preferred. More theoretical materials can be seen in such as BERZTISS (1964) and MASON & HANDSCOMB (2002).

Legendre Polynomials, denoted by $\{L_m(x)\}_{m=0,1,\dots}$ where m indicates the order, are a series of continuous OPs over $[-1, 1]$, i.e.,

$$|L_m(x)| \leq 1, \quad -1 \leq x \leq 1 \tag{2}$$

$$\int_{-1}^1 L_m(x)L_n(x)dx = \begin{cases} 0, & m \neq n \\ 1, & m = n \end{cases} \tag{3}$$

Legendre polynomials grant the optimal approximation in the least-square sense (MASON & HANDSCOMB, 2002) and are widely used in many applications. The first few normalized Legendre Polynomials are listed in appendix A.

The bivariate OPs can be generalized from the univariate cases. They can be much more complicated, depending on the two-dimensional definition domain. Particularly, the two-dimensional generalization on the *rectangular* domain turns out to be rather straightforward. Namely, if $\{p_m(x)\}_{m=0,1,\dots}$ are a series of univariate OPs over $[-1, 1]$, then

$$\{p_{m,n}(x, y) = p_m(x)p_n(y)\}_{m=0,1,\dots, n=0,1,\dots} \tag{4}$$

are complete bivariate OPs over the rectangular domain $[-1, 1] \times [-1, 1]$, satisfying

$$\int_{-1}^1 \int_{-1}^1 p_{m,n}(x, y)p_{i,j}(x, y)dxdy = \begin{cases} 1, & \text{if } m = i \text{ and } n = j \\ 0, & \text{else} \end{cases} \tag{5}$$

“Complete” indicates that any two-variable function can be approximated well by the $\{p_{m,n}\}$ (KOORNWINDER, 1975).

2.2 Self-calibration APs

Let $2b_x$ and $2b_y$ denote the width and length of the image format, respectively. By scaling we obtain,

$$l_m(x, b_x) = L_m(x/b_x) \tag{6}$$

$$l_n(y, b_y) = L_n(y/b_y) \tag{7}$$

where x and y are the metric image coordinates, L_m and L_n are univariate Legendre Polynomials ($m, n = 0, 1, 2, \dots$). The first few $\{l_m(x, b_x)\}_m$ are,

$$\begin{aligned} l_0(x, b_x) &= 1 \\ l_1(x, b_x) &= x/b_x \\ l_2(x, b_x) &= (3(x/b_x)^2 - 1)/2 \\ l_3(x, b_x) &= (5(x/b_x)^3 - 3(x/b_x))/2 \\ l_4(x, b_x) &= (35(x/b_x)^4 - 30(x/b_x)^2 + 3)/8 \\ l_5(x, b_x) &= (63(x/b_x)^5 - 70(x/b_x)^3 + 15(x/b_x))/8 \\ l_6(x, b_x) &= (231(x/b_x)^6 - 315(x/b_x)^4 + 105(x/b_x)^2 - 5)/16 \end{aligned}$$

Similar formulae of $\{l_n(y, b_y)\}_n$ could be derived. Denote

$$f_{m,n} \square f_{m,n}(x, y; b_x, b_y) = l_m(x, b_x)l_n(y, b_y) \tag{8}$$

then $\{f_{m,n}\}_{m,n}$ are the bivariate OPs over the rectangular frame $[-b_x, b_x] \times [-b_y, b_y]$ and $|f_{m,n}| \leq 1$. Considering the image distortion is typically in the order of μm , we obtain $p_{m,n}$ by multiplying $f_{m,n}$ with 10^{-6} for numerical stability.

$$p_{m,n} = 10^{-6} f_{m,n}, \quad |p_{m,n}| \leq 10^{-6} \tag{9}$$

$\{p_{m,n}\}_{m,n}$ can be ordered lexicographically as Eq. (10), following KOORNWINDER (1975).

$$\begin{aligned} &P_{0,0} \\ &P_{1,0}, P_{0,1} \\ &P_{2,0}, P_{1,1}, P_{0,2} \\ &P_{3,0}, P_{2,1}, P_{1,2}, P_{0,3} \\ &P_{4,0}, P_{3,1}, P_{2,2}, P_{3,1}, P_{0,4} \\ &\dots \end{aligned} \tag{10}$$

Obviously,

$$\int_{-b_x}^{b_x} \int_{-b_y}^{b_y} p_{i,j} p_{m,n} dx dy = 0 \quad \text{if } i \neq m \text{ or } j \neq n \tag{11}$$

It indicates that if the image measurements are densely distributed, then

$$\sum_k p_{i,j}(x_k, y_k) p_{m,n}(x_k, y_k) \approx 0 \quad \text{if } i \neq m \text{ or } j \neq n \tag{12}$$

Eq. (12) implies that $\{p_{m,n}\}_{m,n}$ is (almost) orthogonal over the all image measurements.

Therefore, the bivariate distortion $\Delta x(x, y)$ and $\Delta y(x, y)$ in Eq. (1) could be respectively approximated by a series of continuous OPs $\{p_{m,n}\}_{m=0, n=0}^{m=M_x, n=N_x}$ and $\{p_{m,n}\}_{m=0, n=0}^{m=M_y, n=N_y}$, where M_x and N_x (M_y and N_y) are the chosen maximum degrees which are not necessarily equal. Further, six of them should be eliminated, as done by EBNER (1976) and GRÜN (1978). Specially, the constant terms $p_{0,0}$ in $\Delta x(x, y)$ and $\Delta y(x, y)$ are nothing but the principle point offset; $p_{1,0}$, $p_{0,1}$, $p_{2,0}$ and $p_{1,1}$ in $\Delta x(x, y)$ are highly correlated with $p_{0,1}$, $p_{1,0}$, $p_{1,1}$ and $p_{0,2}$ in $\Delta y(x, y)$, respectively. Thus, the number of the unknown parameters is $(M_x + 1)(N_x + 1) + (M_y + 1)(N_y + 1) - 6$. As examples, the APs with $M_x = M_y = 5$ and $N_x = N_y = 5$ are obtained in Eq. (13) with 66 unknown parameters (a_i , $i = 1, 2, \dots, 66$).

$$\begin{aligned}
 \Delta x &= a_1 p_{1,0} + a_2 p_{0,1} + a_3 p_{2,0} + a_4 p_{1,1} + a_5 p_{0,2} + a_6 p_{3,0} + a_7 p_{2,1} + a_8 p_{1,2} + a_9 p_{0,3} + a_{10} p_{4,0} \\
 &\quad + a_{11} p_{3,1} + a_{12} p_{2,2} + a_{13} p_{1,3} + a_{14} p_{0,4} + a_{15} p_{5,0} + a_{16} p_{4,1} + a_{17} p_{3,2} + a_{18} p_{2,3} + a_{19} p_{1,4} \\
 &\quad + a_{20} p_{0,5} + a_{21} p_{5,1} + a_{22} p_{4,2} + a_{23} p_{3,3} + a_{24} p_{2,4} + a_{25} p_{1,5} + a_{26} p_{5,2} + a_{27} p_{4,3} + a_{28} p_{3,4} \\
 &\quad + a_{29} p_{2,5} + a_{30} p_{5,3} + a_{31} p_{4,4} + a_{32} p_{3,5} + a_{33} p_{5,4} + a_{34} p_{4,5} + a_{35} p_{5,5} \\
 \Delta y &= a_2 p_{1,0} - a_1 p_{0,1} + a_{36} p_{2,0} - a_3 p_{1,1} - a_4 p_{0,2} + a_{37} p_{3,0} + a_{38} p_{2,1} + a_{39} p_{1,2} + a_{40} p_{0,3} + a_{41} p_{4,0} \\
 &\quad + a_{42} p_{3,1} + a_{43} p_{2,2} + a_{44} p_{1,3} + a_{45} p_{0,4} + a_{46} p_{5,0} + a_{47} p_{4,1} + a_{48} p_{3,2} + a_{49} p_{2,3} + a_{50} p_{1,4} \\
 &\quad + a_{51} p_{0,5} + a_{52} p_{5,1} + a_{53} p_{4,2} + a_{54} p_{3,3} + a_{55} p_{2,4} + a_{56} p_{1,5} + a_{57} p_{5,2} + a_{58} p_{4,3} + a_{59} p_{3,4} \\
 &\quad + a_{60} p_{2,5} + a_{61} p_{5,3} + a_{62} p_{4,4} + a_{63} p_{3,5} + a_{64} p_{5,4} + a_{65} p_{4,5} + a_{66} p_{5,5}
 \end{aligned} \tag{13}$$

The APs with 34 unknowns, $M_x = M_y = 4$ and $N_x = N_y = 3$, are given in Eq. (14).

$$\begin{aligned}
 \Delta x &= a_1 p_{1,0} + a_2 p_{0,1} + a_3 p_{2,0} + a_4 p_{1,1} + a_5 p_{0,2} + a_6 p_{3,0} + a_7 p_{2,1} + a_8 p_{1,2} + a_9 p_{0,3} + a_{10} p_{4,0} \\
 &\quad + a_{11} p_{3,1} + a_{12} p_{2,2} + a_{13} p_{1,3} + a_{14} p_{4,1} + a_{15} p_{3,2} + a_{16} p_{2,3} + a_{17} p_{1,4} + a_{18} p_{0,3} + a_{19} p_{4,3} \\
 \Delta y &= a_2 p_{1,0} - a_1 p_{0,1} + a_{20} p_{2,0} - a_3 p_{1,1} - a_4 p_{0,2} + a_{21} p_{3,0} + a_{22} p_{2,1} + a_{23} p_{1,2} + a_{24} p_{0,3} + a_{25} p_{4,0} \\
 &\quad + a_{26} p_{3,1} + a_{27} p_{2,2} + a_{28} p_{1,3} + a_{29} p_{4,1} + a_{30} p_{3,2} + a_{31} p_{2,3} + a_{32} p_{1,4} + a_{33} p_{0,3} + a_{34} p_{4,3}
 \end{aligned} \tag{14}$$

So far the whole family of APs has been completely constructed. The input of APs includes the image length and width ($2b_x$ and $2b_y$), and the chosen degrees (M_x , N_x , M_y and N_y). Usually, it can further adopt $M_x = M_y \square M$ and $N_x = N_y \square N$ in practice. This class of APs is based on Legendre Polynomials and thus called Legendre APs.

2.3 Overall system calibration

As mentioned previously, the systematic effects caused by direct georeferencing must be compensated. The effects of important interest include the misalignment between the camera and the navigation instruments and the shift/drift in direct georeferencing, if present. For the overall system calibration, one of the most challenging works is to minimize the coupling effect of the different correction parameters. The decoupling is of vital importance in the sense that each systematic error must be independently and properly corrected and the calibration results are block-invariant.

For this purpose, we suggest the joint application of the Legendre APs (for calibrating the image distortion) with other correction parameters, i.e., the three interior orientation (IO) parameters used for correcting the principle point offset and the focal length deformation, and

GPS/IMU shift/drift and misalignment correction parameters. The low correlation must be warranted among these calibration parameters and between them and exterior orientation (EO). As will be seen in Section 4, the correlations between Legendre APs and EO, and between Legendre APs and other correlation parameters, are fairly small. The low correlation is one advantage of Legendre APs over the traditional APs.

3 Practical tests

The Legendre APs are tested by using the data from the recent DGPF camera calibration project (German Society for Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation), which was performed under the umbrella of DGPF and carried out in the test field Vaihingen/Enz nearby Stuttgart, Germany (CRAMER, 2010, DGPF website, 2010). This successful project aims at an independent and comprehensive evaluation on the performance of digital airborne cameras, as well as offering a standard empirical dataset for the next years.

Four flights' data of the frame cameras are adopted: DMC (GSD 20cm, ground sample distance), DMC (GSD 8cm), UltracamX (GSD 20cm) and UltracamX (GSD 8cm). Each camera is flid at two heights. For each flight, we are interested in two most often contexts: the in-situ calibration one and the operational project one. The former context is with high side overlapping ($\approx 60\%$) and dense GCPs and the later with low side overlapping ($\approx 20\%$) and few GCPs. The block configuration is depicted in Appendix C and the readers are referred to the relevant references for the project details.

3.1 In-situ calibration context

The system calibration strategy in Section 2.3 is adopted for all the blocks. Particularly, IMU misalignment, horizontal GPS shift (factually insignificant in our tests), IO parameters and Legendre APs with $M_x = N_x = M_y = N_y = 5$ are employed. The order of Legendre APs is empirically selected by the compromise between achieving the optimal accuracy and reducing overparameterization. The derived external accuracy, indicated by "self calibrating", would be compared to the theoretical accuracy and the "without APs" one, for which the same correction parameters except Legendre APs are used.

The derived external accuracy is demonstrated in Fig. 1. By comparing "Self calibrating" with "Without APs", the refinement of Legendre APs is significant in all tests, up to 10 cm in the DMC (GSD 20cm) block. Moreover, all the "self calibrating" accuracy reaches very close to the theoretical one and it means that the optimal accuracy has been achieved. All the "self calibrating" accuracy reaches to 1/5 GSD in the horizontal directions and 2/5 GSD in the vertical directions in four blocks. It is also interesting to notice that although the DMC and UltracamX cameras are differently manufactured, very similar external accuracy can be obtained by using Legendre APs in the blocks of similar configuration, i.e., similar GSD, similar forward and side overlapping levels and similar GCPs distribution. This fact, independent of the used cameras, coincides well with our photogrammetric accuracy expectation.

Now look at the estimation of the precision of the image measurements. The posterior std. dev. estimation is 1.6, 1.4, 0.89 and 0.78 (unit: μm) for DMC (GSD 20cm, GSD 8cm) and UltracamX (GSD 20cm, GSD 8cm) blocks, respectively. These values are around 0.12 pixel size, which are $12 \mu m$ and $7.2 \mu m$ for DMC and UltracamX cameras, respectively. They well match the expected precision of the automatic tie point transfer techniques, which are 0.1-0.2 pixel size for aerial images.

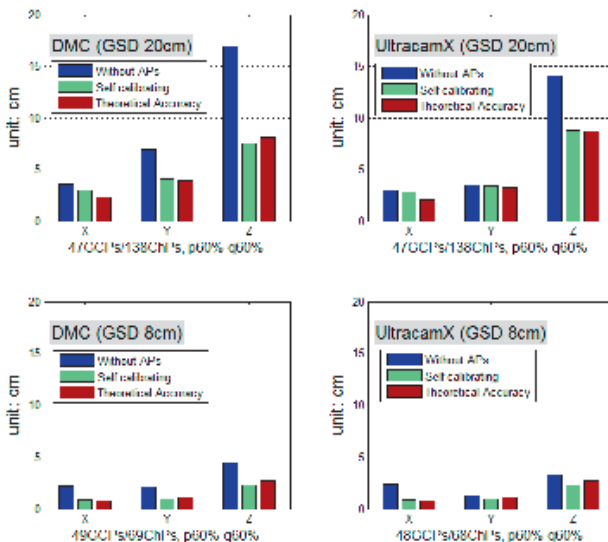


Fig. 1: External accuracy in four in-situ calibration blocks, dense GCPs and p60%-q60% ('without APs' indicates without using Legendre APs only)

3.2 Operational project context

There are 4 GCPs and 20% side overlapping level in each block, which is much weaker than the in-situ calibration context. The IMU misalignment, IO parameters and the Legendre APs with $M_x = M_y = 4, N_x = N_y = 3$ are employed in the adjustment. Using Legendre APs of lower degree tries to avoid the potential overparameterization. This derived external accuracy is analogously denoted as “self-calibrating” one. Due to 4 GCPs available only, the GPS/IMU observations have to be weighted carefully to achieve best accuracy.

We also evaluate the quality of the in-situ calibration in last sub-section. The calibration results of IO parameters and image distortion in Section 3.1 are utilized as fixed known values in the adjustment of the corresponding “reduced” operational block, i.e., the cameras are assumed being calibrated and need no further self-calibration. The derived external accuracy is named as “after calibration”. We compare “after calibration” with “self-calibrating”, “without APs” and theoretical ones.

The adjust accuracy in four blocks is illustrated in Fig. 2. From those results, the self-calibrating Legendre APs help improve the external accuracy and the “after calibration” yields further refinement, more than 1/2 GSD in DMC (GSD 8cm) block. It is also interesting to see that for the blocks of p60%-q20% and few GCPs, the accuracy in vertical direction is general worse than 1/2 GSD. Nevertheless, the “self-calibrating” accuracy can be even worse for larger blocks. The “after calibration” accuracy is very close to the optimal theoretical one in every block. Therefore, these tests not only recognize the sufficient accuracy obtained by Legendre APs in the operational projects, but also confirm again their great efficiency in the in-situ calibration.

It is also worth mentioning that the Legendre APs have also been assessed by the flight data of other airborne cameras in other test fields, like medium-format DigiCAM and large-format

UltracamXp. The similiary good results are confirmed while the details are not published here.

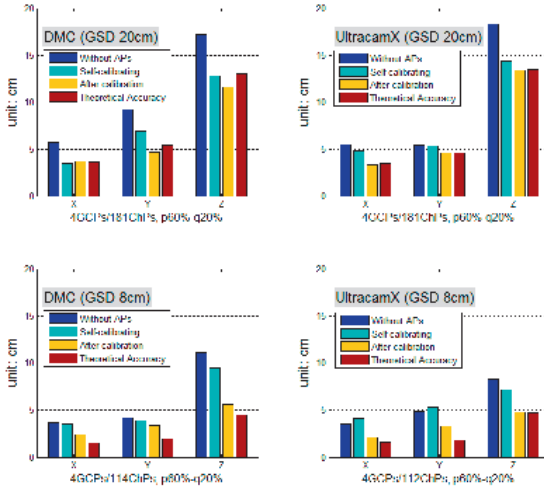


Fig. 2: External accuracy in in four operational project blocks, 4 GCPs and p60%-q20% ('without APs' indicates without using Legendre APs only).

4 Discussions

4.1 Comparisons

In this section, we make comparisons between Legendre APs and the conventional APs from the theoretical and practical viewpoints.

First, the mathematical links between Legendre APs and Ebner and Grün APs can be derived as follows. Assume that there are $(2m + 1) \times (2m + 1)$ points distributed equidistantly on a *square* image dimension. We consider the two-degree monic polynomial $p_2(x)$ (the leading coefficient is one). It corresponds to the term k in Ebner and Grün APs (see Appendix B) and $p_{2,0}$ in Legendre APs, respectively. Neglecting one scale factor ($b = 1$ for Ebner and Grün APs, see Appendix B), $p_2(x)$ could be obtained as Eq. (15) by using the Gram-Schmidt process.

$$p_2(x) = x^2 - \frac{\sum_{i=-m}^m \sum_{j=-m}^m (j/m)^2}{\sum_{i=-m}^m \sum_{j=-m}^m 1} = x^2 - \frac{(2m+1) \sum_{j=-m}^m (j/m)^2}{(2m+1)^2} = x^2 - \frac{m+1}{3m} \quad (15)$$

Then,

$$p_2(x) = x^2 - 2/3 = k, \text{ if } m=1 \text{ (3} \times \text{3 point distribution, Ebner APs)}$$

$$p_2(x) = x^2 - 1/2 = k, \text{ if } m=2 \text{ (5} \times \text{5 point distribution, Grün APs)}$$

$$p_2(x) = x^2 - 1/3 = p_{2,0}, \text{ if } m \rightarrow \infty \text{ (Legendre APs)}$$

This is the exact relation between the discrete and the continuous orthogonality, as mentioned

in Section 2.1. Therefore, the polynomials used in Ebner and Grün APs are belong to discrete orthogonal polynomials while Legendre APs are continuous orthogonal polynomials. In fact, Ebner and Grün APs can also be derived in the exact way as Legendre APs. Briefly speaking, orthogonalizing univariate polynomials as Eq. 15 (over 3 and 5 equidistant points); then applying Eq. (4) and eliminating six parameters will obtain Ebner and Grün APs.

Ebner and Grün restricted their APs in the assumed regular 3×3 and 5×5 “grid points” configurations. It is known, somewhat confusingly, that both Ebner and Grün APs can substantially reduce the image residuals and refine the accuracy, even if the regular grid patterns are not satisfied. This is a source of the criticism as “have no foundations based on observable physical phenomena” (CLARKE & FRYER, 1998). However, this confusion can be clarified easily by using the theory of function approximation. The mathematical principle behind Ebner and Grün APs is Weierstrass theorem as well, exactly the same foundation of Legendre APs. Therefore, the irregular patterns only affect the correlations among APs rather than the effect in compensating lens distortion. It is also easy to understand from the approximation view why Ebner APs sometimes achieve quite poor performance. That is, the distortion is too complex for two-order polynomials to well approximate. Higher degree’s polynomials are required and that is why Grün APs perform better in general. Two examples are illustrated for the comparison on the external accuracy in DMC (GSD 20cm) calibration and operational blocks in Fig. 3. It is clear that Ebner APs obtain quite worse accuracy, particularly in the calibration block (Fig. 3 left).

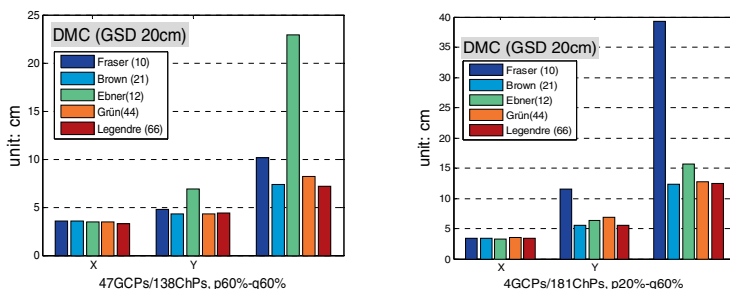


Fig. 3: Comparisons on the external accuracy in DMC (GSD 20cm) calibration block (left) and operational block (right).

Tab. 1: Correlation analyses in DMC (GSD 20cm) calibration block

APs	corr.	EO	IO	IMU	Intra-corr
Grün APs (44)	< 0.1	100%	80%	83%	88%
	max	---	0.73	0.53	0.93
Brown APs (21)	< 0.1	98%	78%	86%	78%
	max	0.19	0.87	0.55	0.92
Legendre APs (66)	< 0.1	100%	97%	100%	96%
	max	---	0.44	---	0.57

However, Legendre APs must be preferred to these two traditional polynomials APs. Firstly, Ebner and Grün APs are single order polynomials while Legendre APs are a whole family of polynomials. Thus, Legendre APs offer much more flexibility for applications. Secondly, from the mathematical viewpoint, continuous polynomials (Legendre APs) are more appropriate than discrete polynomials (Ebner and Grün APs) for digital camera calibration, mainly since the total number of image measurements is much larger than number of unknown APs. Thirdly, Legendre APs are advantageous in low correlations. An example in

DMC (GSD 20cm) calibration block is illustrated in Tab. 1, where '<0.1' indicates the percentage of correlations smaller than 0.1 and 'max' denotes the maximum correlations. It is demonstrated that Legendre APs have much lower correlations with IO and IMU than Grün APs. The intra-correlations among APs (denoted by 'intra-corr') show that Legendre APs are 'more orthogonal'. Fig. 3 also illustrates that Legendre APs deliver slightly better accuracy than Grün APs. In fact, Legendre APs can also be seen as the superior generalization of the traditional polynomials APs. The discussions were also detailed in TANG et al. (2012).

We also compare Legendre APs with the physical APs proposed in BROWN (1971) (FRASER (1997) as well) and BROWN (1976), which are denoted by 'Fraser (10)' and 'Brown (21)' respectively. Although 'Brown (23)' model achieves the comparable accuracy as Legendre APs in Fig. 3, the later possesses much better performance in low correlations, as demonstrated in Tab. 1. In fact, the image distortion of the multi-head airborne cameras is not dominated by the radial-symmetric distortion; and this is the main reason why Fraser model delivers rather poor accuracy in Fig. 3 (right). Besides, the mathematical APs hold one inherent advantage, which is again attributed to their mathematical approximation nature. Any physical models, no matter how sophisticated and accurate they might be, can be precisely approximated by the (Legendre) polynomials of proper degree. Although the polynomials APs are sometimes dubbed as 'empirical' (MCGLONE et al., 2004), they are in fact 'more objective' in many senses.

4.2 Deficiencies of the Polynomials APs

The solid mathematical principle of Legendre APs (as well as Ebner and Grün APs) is algebraic polynomials approximation. The high performance of Legendre APs has been demonstrated. Generally speaking, Legendre APs are orthogonal, flexible, generic and effective for all the airborne frame-format cameras calibration.

As mentioned in Section 2.1, algebraic polynomials are just one of mathematical basis functions for approximation and can thus serve for calibration purpose. Nevertheless, they may be not the optimal choice. In fact, there is an intrinsic deficiency of all polynomials APs, which is detailed as follows.

It is known that all polynomials APs need to eliminate four high correlated parameters (NOT six, since two of them, i.e. two constant terms, are purely principle point offsets). The elimination imposes four constraints on self-calibration APs. For example, the constraints on Legendre APs are (see Eq. (13) or (14)),

$$(\Delta x): +a_1 p_{1,0}, +a_2 p_{0,1}, +a_3 p_{2,0}, +a_4 p_{1,1}$$

$$(\Delta y): +a_2 p_{1,0}, -a_1 p_{0,1}, -a_3 p_{1,1}, -a_4 p_{0,2}$$

The same occurs to the Ebner and Grün APs (see Appendix B). However, these four constraints, which are caused by high correlations, violate the mathematical principle of polynomials APs. According to approximation theory and Weierstrass Theorem, all APs in Δx should be fully independent on the APs in Δy . In other words, for 5-order Legendre APs (Ebner and Grün APs), the theoretical number of unknown APs should be 70 (16 and 48) rather than 66 (12 and 44). Therefore, the elimination, which is an indispensable procedure for building all polynomials APs, degrades their rigorosness. This is the intrinsic deficiency of all polynomials APs. Although the negative effect of this deficiency seems insignificant in all our tests, the harmful effect of the deviation from the theory deserves further exploring. Besides, another practical inconvenience is that Legendre APs usually require more unknowns than the physical APs, such as extended Brown models with 21 parameters.

It must be noted that these deficiencies does not imply the failure of the idea of mathematical approximation. Instead, it indicates merely that algebraic polynomials may not be the most

proper mathematical basis functions for self-calibration. We shall continue seeking the alternative mathematical basis functions for rigorous self-calibration, which are more justifiable in theory and more efficient in practice.

5 Conclusions

We proposed a new class of self-calibration Legendre APs for calibrating digital frame-format airborne cameras. The prime theoretical foundations of Legendre APs are mathematical polynomial approximation and the renowned Weierstrass Theorem. Theoretically, Legendre APs of proper degree can calibrate the image distortion of all frame cameras.

The high performance of Legendre APs is demonstrated in the many tests on various airborne cameras, including DMC, DigiCam, UltracamX and UltracamXp. Legendre APs are generally effective and flexible for calibrating all digital frame airborne camera architectures, no matter which system design have been chosen by the camera manufacturer. Moreover, the very low correlations between Legendre APs and other correction parameters guarantee reliable calibration results.

We also compare Legendre APs with other traditional APs. Both the theoretical investigations and the practical experiments show Legendre APs are superior to the conventional Ebner and Grün APs. Compared with the physical APs, Legendre APs show its advantages in general effectiveness and very low correlations. In spite of the encouraging results of Legendre APs, however, we reveal one intrinsic deficiency of all polynomials APs, including those APs in EBNER (1976), GRÜN (1978) and Legendre APs. It is suggested that further work shall be continued to seek the optimal mathematical choice for rigorous, flexible and efficient self-calibration.

Acknowledgements

Dipl.-Ing. Werner Schneider is greatly appreciated for his assistance. This work benefited much from his rich practical experiences. We also thank Dipl.-Ing. Dirk Stallmann for his programming help. The first author is grateful to China Scholarship Council for the financial support during this work in Stuttgart, Germany.

Appendices

Appendix A: Orthogonal Legendre polynomials

$$L_0(x) = 1$$

$$L_1(x) = x$$

$$L_2(x) = \frac{1}{2}(3x^2 - 1)$$

$$L_3(x) = \frac{1}{2}(5x^3 - 3x)$$

$$L_4(x) = \frac{1}{8}(35x^4 - 30x^2 + 3)$$

$$L_5(x) = \frac{1}{8}(63x^5 - 70x^3 + 15x)$$

$$L_6(x) = \frac{1}{16}(231x^6 - 315x^4 + 105x^2 - 5)$$

Appendix B: Two conventional polynomials APs

Polynomials APs proposed by Ebner (1976)

$$\Delta x_E = a_1x + a_2y - a_3k + a_4xy + a_5l + a_7xl + a_9yk + a_{11}kl$$

$$\Delta y_E = -a_1y + a_2x + a_3xy - 2a_4l + a_6k + a_8yk + a_{10}xl + a_{12}kl$$

$$k = x^2 - 2/3b^2, \quad l = y^2 - 2/3b^2$$

Polynomials APs proposed by Grün (1978)

$$\Delta x_G = a_1x + a_2y + a_3xy - a_4l - 10/7a_6k + a_7xp + a_8yk + a_9xl + a_{10}yq + a_{15}r + a_{16}xyp + a_{17}kl$$

$$+ a_{18}xyq + a_{19}s + a_{25}yr + a_{26}xlp + a_{27}ykp + a_{28}xs + a_{33}lr + a_{34}xypq + a_{35}ks + a_{39}yqr + a_{40}xps + a_{43}rs$$

$$\Delta y_G = -a_1y + a_2x + a_3 - 10/7l - a_5k + a_6xy + a_{11}xp + a_{12}yk + a_{13}xl + a_{14}yq + a_{20}r + a_{21}xyp + a_{22}kl$$

$$+ a_{23}xyq + a_{24}s + a_{29}yr + a_{30}xlp + a_{31}ykp + a_{32}xs + a_{36}lr + a_{37}xypq + a_{38}ks + a_{41}yqr + a_{42}xps + a_{44}rs$$

$$k = x^2 - 1/2b^2, \quad l = y^2 - 1/2b^2, \quad p = x^2 - 17/20b^2, \quad q = y^2 - 17/20b^2$$

$$r^2 = x^2 \left(x^2 - 31/28b^2 \right) + 9/70b^4 \quad s^2 = y^2 \left(y^2 - 31/28b^2 \right) + 9/70b^4$$

Appendix C: Block Configuration Overview

Tab. C.1 Test Block Configuration

Context	In-situ calibration	Operational project
Sensor orientation	ISO	ISO
Forward overlap (p)	60% ~70%	60% ~70%
Cross strip	NO	NO
Side overlap (q)	60%	20%
Image number		
DMC (GSD 20cm)	3 lines × 14/line = 42	2 lines × 14/line = 28
Ultracam-X (GSD 20cm)	3 lines × 12/line = 36	2 lines × 12/line = 24
DMC (GSD 8cm)	5 lines × 22/line = 110	3 lines × 22/line = 66
Ultracam-X (GSD 8cm)	5 lines × 35/line = 175	3 lines × 35/line = 105
GCP/ChP distribution		
DMC (GSD 20cm)	47 GCPs /138ChPs	4GCPs/181ChPs
Ultracam-X (GSD 20cm)	47 GCPs /138ChPs	4GCPs/181ChPs
DMC (GSD 8cm)	49 GCPs /69ChPs	4GCPs/114ChPs
Ultracam-X (GSD 8cm)	48 GCPs /68ChPs	4GCPs/112ChPs

References

- BERZTISS, A., 1964: Least squares fitting of polynomials to irregularly spaced data, – SIAM Review, 6(3): 203-227.
- BROWN, D., 1971: Close-range camera calibration, – Photogrammetric Engineering, vol. 37, 855-866.
- BROWN, D., 1976: The bundle method – progress and prospects, – International Archives of Photogrammetry, 21(3), ISP congress, Helsinki, 1-33.
- CLARKE, T. & FRYER J., 1998: The development of camera calibration methods and models. – Photogrammetric Record, 16(91): 51-66.
- CRAMER, M., 2009: Digital camera calibration, – EuroSDR official publication No. 55, 257p.
- CRAMER, M., 2010: The DGPF-test on digital airborne camera evaluation – overview and test design, – Photogrammetrie-Fernerkundung-Geoinformation (PFG), No.2, 75-84.

- CRAMER, M., et al., 2010: In situ digital airborne camera validation and certification – the future standard? – IAPRS, Vol. 38, 6 pages on CD-ROM.
- DGPF PROJECT, 2010: Evaluation on digital airborne camera systems, URL: <http://www.ifp.uni-stuttgart.de/dgpf/DKEP-Allg.html> (last accessed: July 2011).
- EBNER, H., 1976: Self-calibrating block adjustment, – *Bildmessung und Luftbildwesen*, Vol.44, 128-139.
- FRASER, C., 1997: Digital camera self-calibration, – *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 52(4): 149-159.
- GRÜN, A., 1978: Progress in photogrammetric point determination by compensation of systematic errors and detection of gross errors, – *Symposium of Comm. III of the ISP, Moscow*, 113-140.
- HONKAVAARA, E. et al. 2006: Geometric test field calibration of digital photogrammetric sensors, – *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 60, 387-399.
- JACOBSEN, K., et al. 2010: DGPF-project: evaluation of digital photogrammetric camera systems – geometric performance. – *Photogrammetrie - Fernerkundung - Geoinformation (PFG)*, No.2, 85-98.
- KOORNWINDER, T., 1975: Two-variable analogues of the Classical orthogonal polynomials, – *Theory and Application of Special Functions* (R. Askey ed.), Academic Press, New York, 435-495.
- KRAUS, K., 2007: *Photogrammetry: Geometry from Images and Laser Scans – Second Edition*, de Gruyter, 459p.
- MASON, J. & HANDSCOMB, D., 2003: *Chebyshev Polynomials*, Chapman and Hall/CRC, 360p.
- MCGLONE C. et al. (ed.): 2004. *Manual of Photogrammetry*, – Fifth Edition, ASPRS, 1151p.
- TANG R., FRITSCH, D. & CRAMER M., 2012: A novel family of mathematical self-calibration additional parameters for airborne camera systems, – *European Calibration and Orientation Workshop (EuroCOW 2012)*, February 2012.

Aktuelle Normungsverfahren im DIN-Normungsausschuss "Photogrammetrie und Fernerkundung"

SVEN BALTRUSCH¹

Zusammenfassung: In diesem Beitrag werden die aktuellen DIN-Normen und Normvorhaben des DIN-Normungsausschusses NA005-03-02 AA „Photogrammetrie und Fernerkundung“ vorgestellt. Dazu gehören neben dem bereits bekannten Standard für digitale Luftbildkameras, die neu veröffentlichten Normen zu den Anforderungen an die Klassifizierung von optischen Fernerkundungsdaten und der Standard für das Pan-Sharpening. Der Normungsausschuss will mit dem Beitrag die neu veröffentlichten DIN-Normen bekanntgeben und deren Einsatz fördern. Die sich in Vorbereitung befindlichen Normen sollen frühzeitig mit interessierten Anwendern diskutiert werden.

1 Der DIN-Normungsausschuss NA005-03-02 „Photogrammetrie und Fernerkundung“

Der DIN-Normungsausschuss NA005-03-02 AA „Photogrammetrie und Fernerkundung“ setzt sich aus Vertretern von Behörden bzw. Verwaltungen, von Universitäten und Fachhochschulen sowie von Firmen zusammen. Außerdem werden projektbezogene Arbeitskreise eingerichtet, in denen Fachleute, zeitlich befristet, für das jeweilige Normungsvorhaben mitwirken.

Die Mitarbeit im DIN-Normungsausschuss erfolgt ehrenamtlich und wird von seinem Obmann Prof. Dr. rer. nat. Ralf Reulke koordiniert. Neben den Treffen der Ad hoc - Arbeitskreise finden zwei Sitzungen des Arbeitsausschusses im Jahr statt. Der Arbeitsausschuss ist weiterhin offen für neue Mitarbeiter. Internationale Aktivitäten sind in die Normungsarbeit integriert.

Behörden und Industrie geben Themen vor, begleiten die Normentwicklung und wenden die Normen an. Die Normen vereinfachen das Verhältnis Auftraggeber – Auftragnehmer durch klare Festlegung der Ausgangssituation und der Angabe von Qualitätsmaßen. Ein entsprechendes Formblatt in der Normenreihe DIN 18740 formalisiert diese Beziehung.

Im Arbeitsausschuss werden aktuelle, dringende Probleme von Behörden und Industrie aufgegriffen und beraten (z.B. im Zusammenhang mit dem Normungsprojekt DIN 18740-6). Ein weiteres Beispiel ist die Beteiligung an einer Kameraevaluierung aktueller digitaler Kameras (DIN 18740-4), in Zusammenarbeit mit der EuroSDR und der DGPF.

Normen unterstützen die Lehrtätigkeit an den Universitäten, da sie fachliche Grundlagen komprimiert und übersichtlich darstellen.

2 Normenreihen DIN 18740

Die Normenreihe DIN 18740 legt Qualitätsanforderungen an photogrammetrische Produkte fest. Veröffentlicht wurden:

¹ Sven Baltrusch, Amt für Geoinformation, Vermessungs- und Katasterwesen, Lübecker Str. 289, 19059 Schwerin; E-Mail: sven.baltrusch@laiv-mv.de

- DIN 18740-1:2001-11, Photogrammetrische Produkte - Teil 1: Anforderungen an Bildflug und analoges Luftbild (ohne Ersatz zurückgezogen)
- DIN 18740-2:2005-02, Photogrammetrische Produkte - Teil 2: Anforderungen an das gescannte Luftbild (ohne Ersatz zurückgezogen)
- DIN 18740-3:2003-10, Photogrammetrische Produkte - Teil 3: Anforderungen an das Orthophoto
- DIN 18740-4:2007-09, Photogrammetrische Produkte - Teil 4: Anforderungen an digitale Luftbildkameras und an digitale Luftbilder (wird aktuell überarbeitet)

Aktuell in Vorbereitung sind:

- DIN 18740-5, Photogrammetrische Produkte - Teil 5: Anforderungen an die Klassifizierung optischer Fernerkundungsdaten (Einspruchsphase abgeschlossen)
- DIN 18740-6, Photogrammetrische Produkte - Teil 6: Anforderungen an digitale Höhenmodelle (in Vorbereitung)
- DIN 18740-7, Photogrammetrische Produkte - Teil 7: Anforderungen an Datenfusionsverfahren (in Vorbereitung)

Im Folgenden werden die in Vorbereitung befindlichen Normen der Reihe 18740 kurz vorgestellt.

2.1 DIN 18740-5: Anforderungen an die Klassifizierung optischer Fernerkundungsdaten

Diese Norm gilt für Landbedeckungsklassifizierungen auf der Grundlage multispektraler Luft- und Satellitenbilddaten, die mittels digitaler optischer Sensoren (Flächen- oder Zeilenkameras) hergestellt werden. Diese Sensoren müssen messtechnische Anforderungen (radiometrisch und geometrisch) erfüllen.

Satellitengestützte Sensoren stellen inzwischen eine geometrische Auflösung zur Verfügung, die bisher den Luftbildkameras vorbehalten war. Andererseits haben sich seit der Einführung digitaler Luftbildkameras auch die verwendeten geometrischen Auswertemethoden weitgehend angenähert, so dass frühere Unterscheidungsmerkmale zwischen flugzeug- und satellitengestützten Sensoren ihre Bedeutung verloren haben.

Die hohe geometrische Auflösung dieser digitalen Systeme bedingt dabei neue Algorithmen und Verfahren für die Auswertung und Interpretation der Bilddaten, insbesondere auch im Bereich der Klassifizierung und computergestützten Objekterkennung.

Digitale bildgebende Satellitensensoren sind im Gegensatz zu analogen (filmbasierten) Luftbildkameras in der Regel absolut kalibriert. Die radiometrischen Kalibrierinformationen ermöglichen eine Umrechnung der Bildgrauwerte ($DN = \text{„Digital Number“}$) in absolute Strahldichten. Für Satellitensysteme wird auf Grund des großen Abstandes zwischen Sensor und Objekt üblicherweise der Atmosphäreneinfluss korrigiert.

Aus der absoluten radiometrischen Kalibrierbarkeit digitaler Sensoren ergeben sich neue Möglichkeiten für die Erstellung abgeleiteter Produkte, (z. B. bei der Klassifizierung), da diese Kameras die Eigenschaften hoher geometrischer Qualität mit denen radiometrischer Standards von Erdbeobachtungssystemen verbinden.

Die Klassifizierung setzt eine aus der fachlichen Sicht des Anwenders erfolgte genaue Festlegung und Beschreibung der zu klassifizierenden Objekte voraus. Sie erfordert eine Objektidentifikation und Objektbeschreibung durch multispektrale und strukturelle Merkmale im

Bild, die gegebenenfalls durch multitemporale Objekteigenschaften (z. B. Zu- oder Abnahme eines Merkmalswertes in einem festgelegten Zeitintervall) in ihrer Aussagefähigkeit ergänzt werden. Der Klassifizierungsprozess im engeren Sinne realisiert die Abbildung der aus den Bilddaten abgeleiteten Objekte auf die fachlichen, anwenderspezifischen Objektfestlegungen. Die Klassifizierung erfordert eine Vorverarbeitung der Bilddaten zur Herstellung einer vergleichbaren Datenqualität, die Gewinnung, Bereitstellung und Bearbeitung von Referenzdaten und Zusatzinformationen sowie die Nachbearbeitung.

DIN 18740-5 behandelt drei Schwerpunktthemen:

- Anforderungen an Sensoren und Aufnahmebedingungen;
- Anforderungen an Algorithmen und Verfahren;
- Genauigkeitsanforderungen.

In dieser Norm werden aktive Sensoren (Radarsysteme und Laserscanner) und hyperspektrale Scanner nicht betrachtet.

2.2 DIN 18740-6: Anforderungen an Digitale Höhenmodelle

Diese Norm gilt für die Ableitung von digitalen Höhenmodellen, die auf der Grundlage terrestrischer oder flugzeug- bzw. satellitengestützter Erfassungsmethoden hergestellt werden. Diese Sensoren müssen geometrische Anforderungen erfüllen. Es werden sowohl Digitale Geländemodelle als auch Digitale Oberflächenmodelle behandelt. Die Höhenmodelle finden u.a. Anwendung in geobezogenen Aufgabenstellungen der Landesvermessung, der Umweltverwaltung, der Lagerstättenforschung und der Archäologie.

Die dreidimensionale Punktmenge eines Digitalen Höhenmodells (DHM) kann durch verschiedene Methoden erfasst werden. Hierbei reicht die Bandweite von der Digitalisierung analoger Quellen über photogrammetrische Methoden bis zum Airborne Laserscanning. Die Verfahren kommen je nach Projektdefinition hinsichtlich der erforderlichen Genauigkeit und Punktdichte unter der Beachtung der Wirtschaftlichkeit zum Einsatz.

Ebenfalls aufgabenspezifisch werden die erforderlichen Elemente, wie z.B. Massenpunkte und geländecharakteristische Strukturelemente zur Beschreibung von DHM festgelegt. Die Oberflächenmodellierung ist letztendlich vom mathematischen Ansatz, z.B. der Wahl des Interpolationsverfahrens, Methodik der Vermaschung etc., abhängig.

Zunehmend gewinnt die dritte Dimension bei der Erfüllung von geo-bezogenen Aufgabenstellungen an Bedeutung. Das Anforderungsprofil der tatsächlichen Anwendung setzt hierbei die Genauigkeitsanforderungen und folglich die Klassenzugehörigkeit fest.

DIN 18740-6 behandelt drei Schwerpunktthemen:

- Erfassungsmethoden
- Klassifizierung von DHM
- Produktableitung aus DHM-Datensätzen und ihr praktischer Einsatz

In dieser Norm werden bathymetrische Sensoren (Echolotung) nicht betrachtet.

2.3 DIN 18740-7: Anforderungen an das PAN-Sharpener

Diese Norm gilt für Bilddaten, die durch Datenfusionsverfahren erzeugt wurden. Je nach eingesetzten Verfahren bilden fusionierte Bilddaten die Grundlage für Anwendungen in der Photogrammetrie, Kartographie und Fernerkundung.

Zur Verbesserung der Messgenauigkeit und damit auch zur Erweiterung der Verwendbarkeit von Sensoren ist es zweckmäßig, spektrale Daten unterschiedlicher Sensoren miteinander zu fusionieren, um eine verbesserte geometrische und radiometrische spektrale Datengrundlage für eine digitale Weiterverarbeitung zu erhalten.

Daneben gibt es in der Photogrammetrie und Fernerkundung eine Vielzahl von zusätzlichen Anwendungen, die Fusionstechnologien verwenden:

- Auflösungsverbesserung
- Fusion von Bild- und Abstandsdaten (Orthophotoerstellung)
- Monitoring (Change Detection, Objektverfolgung/Tracking) mit Multisensorsystemen
- Orientierung (Kombination aus GPS, IMU, etc)
- Integration von Daten verteilter und mobiler Sensoren auf der Basis von Geosensornetzwerken, Sensorschwärme, Muster- und Ereigniserkennung in verteilten Geodaten (-banken)

Diese Norm betrifft abbildende Sensoren und legt Anforderungen an Verfahren zum Pansharpener (Fusion auf Daten-/Signalniveau), der Fusion von niedriger aufgelösten multispektralen mit höher aufgelösten panchromatischen Daten, fest. Bei der Kombination von Daten unterschiedlicher Sensoren ist die exakte Koregistrierung der unterschiedlichen Datensätze im Subpixelbereich von entscheidender Bedeutung.

3 Normenreihen DIN 18716

Die Normenreihe DIN 18716 gilt für die photogrammetrische Auswertung, legt dafür besondere Begriffe fest und dient zu deren Vereinheitlichung. Die ursprünglichen drei Teile:

- DIN 18716-1:1995-11, Photogrammetrie und Fernerkundung - Teil 1: Grundbegriffe und besondere Begriffe der photogrammetrischen Aufnahme
- DIN 18716-2:1996-07, Photogrammetrie und Fernerkundung - Teil 2: Besondere Begriffe der photogrammetrischen Auswertung
- DIN 18716-3:1997-07, Photogrammetrie und Fernerkundung - Teil 3: Begriffe der Fernerkundung

wurden hinsichtlich des Wandels der analogen zur digitalen Photogrammetrie überarbeitet und zu einer neuen

- DIN 18716, Photogrammetrie und Fernerkundung - Begriffe

zusammengefasst. Die Einspruchsphase ist abgeschlossen. Die Neufassung wird kurzfristig veröffentlicht.

4 Bevorstehende Normungsvorhaben

4.1 Normprojekt "image quality (Bildqualität)"

Geplant ist eine Norm zur physikalisch begründeten Beschreibung der Qualität von digitalen Bilddaten (image quality). Der Hintergrund für dieses Projekt ist die Erfassung vielfältiger Bilddaten in den Fachgebieten Photogrammetrie und Fernerkundung. Die einfachen Verfahren zur Bildverbesserung reichen für die Aufgaben dieser Fachgebiete nicht aus, z.B. für die Wiederherstellung der spektralen Verteilung der Aufnahmesituation, um Bilder in den Originalfarben zu erzeugen, oder zur Klassifizierung und Identifizierung von Objekten aufgrund ihrer spektralen Charakteristik.

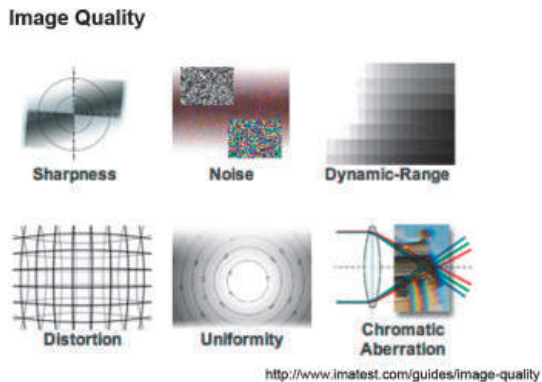


Abb. 1: Qualität von digitalen Bilddaten

5 Literaturverzeichnis

- DIN 18740-5: Anforderungen an die Klassifizierung optischer Fernerkundungsdaten
- DIN 18740-6 (Entwurfsstatus): Anforderungen an Digitale Höhenmodelle
- DIN 18740-7 (Entwurfsstatus): Anforderungen an das PAN-Sharpening
- REULKE, R., 2011: Unveröffentlichte Präsentation im NA005-03-02 "Photogrammetrie und Fernerkundung"

Auf dem Weg zu der INSPIRE-Datenspezifikation für Höhendaten

MICHAEL HOVENBITZER¹

Zusammenfassung: Im Rahmen des INSPIRE-Prozesses werden zu Themen mit photogrammetrischem Bezug (Orthophotos, Landbedeckung, Höhendaten, usw.) Datenspezifikationen erstellt, die einen interoperablen Austausch und die Nutzung europäischer Geodaten gewährleisten sollen. Ein Themenbereich ist hierbei die Modellierung von Höheninformationen hinsichtlich der Erdoberfläche bzw. des Meeresbodens (Bathymetrie). Das Paper gibt einen allgemeinen Überblick über die Ziele des INSPIRE-Prozesses und stellt das Datenmodell des Themenbereichs Höhendaten vor. Weiterhin werden geplante Veränderungen beschrieben, die sich durch die erst kürzlich abgeschlossene Kommentierungsphase ergeben haben. Da die Diskussion innerhalb des Expertenteams noch nicht abgeschlossen ist, können nur Zwischenergebnisse der Arbeit an den Spezifikationen dargestellt werden. Der Ausblick beschäftigt sich mit dem Zeitplan des INSPIRE-Prozesses und dessen Auswirkungen auf den Produktbereich Höheninformation.

1 Allgemeines zum INSPIRE-Prozess

Das Kürzel INSPIRE (Infrastructure for Spatial Information in Europe) steht für die Richtlinie 2007/2/EG des Europäischen Parlaments und des Rates zur Schaffung einer Geodateninfrastruktur in der europäischen Gemeinschaft. Diese Richtlinie ist am 15. Mai 2007 in Kraft getreten und musste innerhalb von zwei Jahren von den Mitgliedstaaten der EU in nationales Recht umgesetzt werden. Das Ziel der Richtlinie ist es, die Nutzung von Geodaten in Europa zu erleichtern. Durch INSPIRE ist der rechtliche Rahmen für den Aufbau von Geodateninfrastrukturen festgelegt. Die jeweiligen fachlichen und technischen Einzelheiten zu den INSPIRE-Themen werden in rechtlich verbindlichen Durchführungsbestimmungen geregelt. Diese werden schrittweise durch Expertenteams (Thematic Workings Groups – TWGs) erarbeitet. Der Anwendungsbereich von INSPIRE ist auf 34 Themenfelder, welche alle einen Raumbezug aufweisen, begrenzt. Hierzu gehören zum Beispiel Adressen, Verkehrsnetze, Schutzgebiete, Bodenbedeckung, Geographische Namen und auch Höhendaten. Weitere Einzelheiten über die konkreten fachlichen Inhalte der Themenfelder können im Internet unter [INSPIRE_JRC] bzw. in deutscher Sprache unter [INSPIRE_GDI-DE] eingesehen werden.

2 INSPIRE-Höhendaten – Was ist gemeint?

Unter Höhendaten werden im INSPIRE-Kontext digitale Modelle verstanden, die höhenmäßig die Erd-, Meeres- bzw. Eisoberfläche beschreiben. Es werden also nicht nur terrestrische Höhenmodelle (Höhen), sondern auch Bathymetrie-Daten (Tiefen) unter dieser Thematik zusammengefasst. Weiterhin können zur Beschreibung der Topographie zwei unterschiedliche

1) Dr. Michael Hovenbitzer, Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, Richard-Strauss-Allee 11, 60598 Frankfurt am Main; E-Mail: Michael.Hovenbitzer@bkg.bund.de

Modelle genutzt werden. Zum Einen ist dies das digitale Geländemodell, welches nur die reine Erdoberfläche beschreibt und zum Anderen das digitale Oberflächenmodell, welches auch die natürlichen und künstlichen Landschaftselemente enthält (beispielsweise Vegetation, Gebäude, Brücken, etc.).

3 Hauptelemente der Spezifikation für Höheninformationen

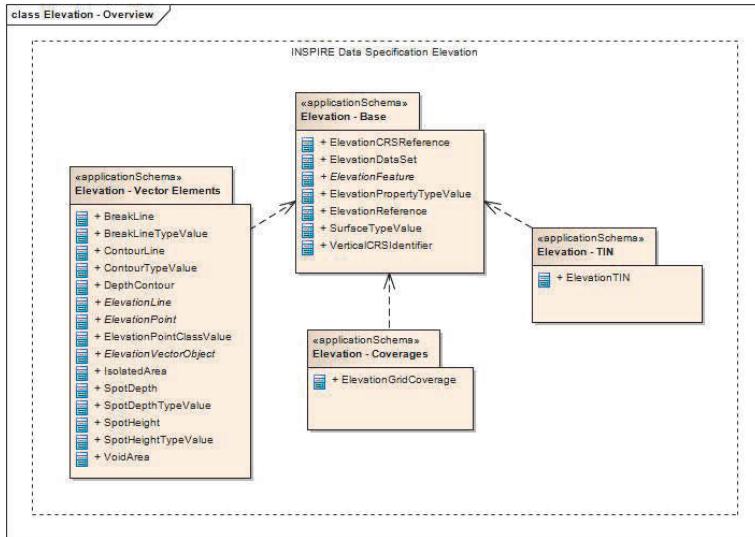


Abb. 1: UML-Schemaübersicht über die Hauptelemente der Spezifikation

Abbildung 1 gibt einen Überblick über die Hauptklassen der Spezifikation der Höhendaten und deren Unterklassen. Im Folgenden werden diese vier Hauptklassen näher beschrieben. Eine ausführliche Beschreibung und Erläuterung jeder einzelnen Klasse und jedes Attributs kann der aktuellen Version der INSPIRE-Datenspezifikation der Höhendaten (Elevation) entnommen werden [DS Elevation]

3.1 Hauptklasse Höhendaten (Elevation – Base)

In der Hauptklasse werden allgemeine Elemente und Charakteristiken bereitgestellt, die dann an die Unterklassen Vektor-Elemente, Gitterabdeckung (GridCoverage) und das TIN-Modell vererbt werden. Weiterhin besteht die Möglichkeit, einzelnen Teilen des Datensatzes jeweils unterschiedliche Georeferenzierungen zuzuordnen (ElevationCRSReference). Dies kann zur Kombination von terrestrischen und bathymetrischen Daten genutzt werden. Einen weiteren

Anwendungsfall stellt zum Beispiel die Modellierung eines Binnengewässers dar, da hier auch Tiefeninformationen bezüglich eines bestimmten Wasserspiegelniveaus abzubilden sind.

3.2 Vektor-Elemente (Vector Elements)

Die Unterklasse Vektor-Elemente besteht aus punkt-, linien- und flächenförmigen Elementen, welche die Morphologie des jeweiligen Modells detailliert beschreiben. Neben Geländekanten (Böschungskanten, Gerippllinien usw.) ist auch die Modellierung von Höhenpunkten und Höhenlinien (bzw. Tiefenpunkten und -linien) vorgesehen.

3.3 Gitterabdeckung (Elevation Coverages)

In der Unterklasse Gitterabdeckung wird ein Modell beschrieben, welches dazu dient, digitale Höhenmodelle in einer Gitterstruktur abzubilden. Da weitere Expertenteams anderer Themenbereiche auch diese Gitterstrukturen für ihre Datenmodelle nutzen, ist ein allgemeines Modell für Flächendarstellungen (Coverages) erstellt worden. Dieses allgemeine Modell beruht auf den Standards ISO 19123 [ISO19123] und dem im Aufbau befindlichen WebCoverageService 2.0 (WCS2.0). Es ist vorgesehen, dieses Gittermodell als verpflichtendes Element bei der Datenabgabe festzulegen.

3.4 TIN-Modelle (Elevation TIN)

Mittels der Unterklasse TIN-Modelle („Triangulated Irregular Network“-Modelle) kann eine Modellierung aufgebaut werden, welche zum Beispiel ein Geländere relief möglichst gut beschreibt. Es beschreibt auf Grundlage der ISO 19107 [ISO19107] ein trianguliertes Dreiecksnetz von 3D-Punkten. Werden beim Aufbau dieses Modells Geländekanten und 3D-Punkte berücksichtigt, so kann dem Endnutzer ein dem Geländere relief gut angepasstes Modell übergeben werden.

4 Diskussionspunkte der Kommentierungsphase

Vom 20. Juni bis zum 21. Oktober 2011 war es den am INSPIRE-Prozess beteiligten Behörden bzw. Interessengruppen möglich, Kommentare und Verbesserungsvorschläge im Rahmen des vorgesehenen Beteiligungsverfahrens in den Erstellungsprozess der Spezifikationen einzubringen. Diese Kommentare werden durch die Expertenteams ausgewertet und soweit zielführend und umsetzbar in die Spezifikation übernommen. Für den Bereich Elevation wurden annähernd 260 Kommentare abgegeben. Zirka 45 % der Kommentare beschäftigten sich mit konkreten Fragen zum eigentlichen Datenmodell. Der Rest der Kommentare bezog sich auf andere Kapitel der Spezifikation, zum Beispiel auf Abgabeformate oder die Georeferenzierung. Einige Hauptpunkte der Kommentierungsphase sollen im Weiteren detaillierter dargestellt werden.

4.1 Standardformate

Die Abgabe von Gittermodellen ist mit Hilfe der Geography Markup Language (GML) möglich, benötigt aber viel Datenspeicherplatz und ist unter Umständen zeitaufwendig. Zum Austausch von Gittermodellen sind auch Bildformate wie etwa GeoTiff bzw. Tiff geeignet. Die

ursprünglich vorgesehene Verwendung des JPEG2000-Formats wurde verworfen, weil darin nur Ganzzahlwerte gespeichert werden können. Weiterhin wurde das CityGML-Format für die TIN-Modelle in Frage gestellt, da hier nur ein geringer Unterschied zu GML vorhanden ist.

4.2 Kombinierte Datensätze bzw. Georeferenzierung

Viele Kommentare bezogen sich auf Datensätze, die sowohl terrestrische als auch Bathymetrie-Daten beinhalten und nicht speicherbar erschienen. Prinzipiell können diese Datensätze aber mittels der vorliegenden Spezifikation gespeichert werden. Da die Unterscheidung in Tiefen- und Höheninformation nur allgemein für den Datensatzbereich gesetzt werden kann, ist die Diskussion zu diesem Thema noch nicht abgeschlossen.

Bezüglich der Georeferenzierung (Objekt ElevationCRSReference) wurde eine Änderung innerhalb der Spezifikation diskutiert, die auf eine Verwendung des bereits bestehenden ISO-Standards 19111 (Klasse SC_CRS) abzielt.

4.3 Punktwolke des Laserscannings

Weiterhin wurde die Aufnahme von Standards zu Messergebnissen (z.B. Laserpunktwolken) vorgeschlagen. Da deren Modellierung generell nicht in den Anwendungsbereich der Spezifikation fällt, wurde dieser Vorschlag durch die Expertengruppe nicht weiter verfolgt.

5 Ausblick

Die Überarbeitungen der Spezifikationen (Annex II & III) durch die Expertenteams sind bis zum 24. Februar 2012 durchzuführen. Hieran schließt sich eine themenübergreifende Überprüfung der Spezifikationen an, die bis zum 20. April 2012 zur endgültigen Fassung (Version 3.0) führt. Anschließend werden beim Joint Research Center (JRC) auf Grundlage dieser Datenspezifikationen die endgültigen Durchführungsbestimmungen formuliert. Bis Ende des Jahres 2012 sollen diese dann durch das europäische Parlament beschlossen werden. Für die einzelnen Expertenteams bedeutet dies, unter Zeitdruck die jeweiligen Spezifikationen abzuschließen.

Bezüglich des Höhendatenbereichs wurden keine grundlegenden Kommentare eingereicht, so dass keine fundamentalen Spezifikationsänderungen vorgesehen sind. Die aktuelle Fassung der Spezifikation sieht zum Zwecke der Interoperabilität lediglich die verpflichtende Abgabe von Gittermodellen für terrestrische Höhendaten vor. Das Ziel der Expertengruppe, die Erstellung eines möglichst einfachen Datenmodells, scheint mit dem derzeitigen Stand der Spezifikation erreicht zu sein.

6 Literaturverzeichnis

DS_ELEVATION, 2012: Website zur INSPIRE Directive, Datenspezifikation Höhendaten, URL : http://inspire.jrc.ec.europa.eu/documents/Data_Specifications/INSPIRE_DataSpecification_EL_v2.0.pdf, (Letzter Zugriff : 25.01.2012)

INSPIRE_GDI-DE, 2012: Website der GDI-Deutschland, Themenbereich INSPIRE, URL : <http://www.gdi-de.de/inspire>, (Letzter Zugriff : 25.01.2012)

INSPIRE_JRC, 2012: Website zur INSPIRE Directive, <http://inspire.jrc.ec.europa.eu>, (Letzter Zugriff : 25.01.2012)
ISO 19107, 2003: ISO Standard 19107:2003, Geoinformation Raumbezugsschema
ISO 19123, 2007: DIN EN ISO Standard 19123:2007-06, Geoinformation Geometrie- und Funktionsschema, Beuth-Verlag

AUTORENVERZEICHNIS

AKBARI, B.: Siehe AKBARIMEHR, M., MOTAGH, M., AKBARI, B., PASHAZADEH, F. & WETZEL, H.-U.: InSAR and GPS analysis of landslides: Application to assess slope stability of Sarcheshmeh and Gougerd landslides, Iran.	210
AKBARIMEHR, M., MOTAGH, M., AKBARI, B., PASHAZADEH, F. & WETZEL, H.-U.: InSAR and GPS analysis of landslides: Application to assess slope stability of Sarcheshmeh and Gougerd landslides, Iran.	210
ANDERSSOHN, J.: Siehe LUBITZ, C., MOTAGH, M., WETZEL, H.-U., ANDERSSOHN, J., SASS, I. & KAUFMANN, H.: TerraSAR-X time series analysis of surface uplift in Staufen, South-West Germany.	231
AVERDUNG, C.: Einsatz von GML-Datenbanken in der 3D-Simulation.	156
BALTRUSCH, S.: Aktuelle Normungsverfahren im DIN-Normungsausschuss "Photogrammetrie und Fernerkundung".	470
BECKMANN, A.: Siehe WIEDEMANN, A. & BECKMANN, A.: Dense Image Matching in der Praxis.	149
BENEZETH, Y.: Siehe LOZANO-VEGA, G., BENEZETH, Y., UHLER, M., BOOCHS, F. & MARZANI, F.: Sketch of an automatic image based pollen detection system.	202
BERNARD, L.: Siehe RICHTER, S., PECH, K., KARRASCH, P. & BERNARD, L.: Potenziale und Grenzen einer gemeinsamen Nutzung von In-Situ- und Fernerkundungsdaten für umweltbezogene Gesundheitsanwendungen.	284
BEYER, F., GÖTZE, C., GLÄSER, C. & KOPAČKOVÁ, V.: Ableitung geochemischer Parameter aus dem Bedeckungsgrad der Pioniervegetation im Braunkohlerevier Sokolov unter Verwendung von Linear Spectral Unmixing. ...	294
BOOCHS, F.: Siehe LOZANO-VEGA, G., BENEZETH, Y., UHLER, M., BOOCHS, F. & MARZANI, F.: Sketch of an automatic image based pollen detection system.	202
BUCHROITHNER, M., EHLERT, G., HETZE, B., KOHLSCHMIDT, H. & PRECHTEL, N.: Ein Systemprototyp zur Unterstützung der Bergrettung auf Basis einer Interaktion zwischen GPS-Tracking und einem digitalen 3D-Felswandmodell.	256
BUCHROITHNER, M.: Siehe NEELMEIJER, J., MOTAGH, M., WETZEL, H.-U. & BUCHROITHNER, M.: Observation of the Surface Velocity Field of Inylchek Glacier (Kyrgyzstan) by means of TerraSAR-X Imagery.	242
BUCK, O.: DeCOVER 2. Aufbau von Fernerkundungsdiensten zur Aktualisierung der Landbedeckung.	9
CHRIST, I. & LESSING, R.: Semantische und geometrische Aspekte der Interoperabilität.	18
CHRISTEN, M.: Siehe LOESCH, B., CHRISTEN, M. & NEBIKER, S.: OpenWebGlobe – Ein quelloffenes Software Development Kit zur Entwicklung virtueller Globen auf Basis von HTML5 und WebGL.	275
CRAMER, M. & HAALA, N.: Genauigkeitspotential der photogrammetrischen Bildauswertung für Daten unbemannter Luftfahrzeuge.	428
CRAMER, M.: Siehe TANG, R., FRITSCH, D. & CRAMER, M.: New Mathematical Self-calibration Models in Aerial Photogrammetry.	457
DÖLLNER, J.: Siehe ENGEL, J. & DÖLLNER, J.: Immersive Visualisierung von virtuellen 3D-Stadtmodellen und ihr Einsatz in der Stadtplanung.	165
DÖLLNER, J.: Siehe KLIMKE, J. & DÖLLNER, J.: Datenintegration in dienstbasierte 3D-Geovisualisierungssysteme für mobile Geräte.	266
ECHTLER, H.: Siehe TESHEBAEVA, K., SUDHAUS, H., ECHTLER, H.: MOTAGH, M., ROESSNER, S., SCHURR, B., WETZEL, H.-U. & ZUBOVICH, A.: InSAR analysis of the coseismic deformation related to the 2008 Nura earthquake, Pamir-Alai mountains.	249
EHLERS, M.: Siehe JARMER, T., LILIENTHAL, H., EHLERS, M., KLONUS, S. & ROSSO, P.: Hyperspektraldaten zur Erfassung des organischen Kohlenstoffs landwirtschaftlicher Böden.	314
EHLERS, M.: Siehe KLONUS, S., EHLERS, M., SCHOOF, M., WOHLFAHRT, R. &	

JARMER, T.: Vergleich der radiometrischen und geometrischen Auflösung von RapidEye und SPOT 5.	44
EHLERT, G.: Siehe BUCHROITHNER, M., EHLERT, G., HETZE, B., KOHLSCHMIDT, H. & PRECHTEL, N.: Ein Systemprototyp zur Unterstützung der Bergrettung auf Basis einer Interaktion zwischen GPS-Tracking und einem digitalen 3D-Felswandmodell.	256
ENGEL, J. & DÖLLNER: Immersive Visualisierung von virtuellen 3D-Stadtmodellen und ihr Einsatz in der Stadtplanung.	165
FRANKE, J., KEUCK, V. & SIEGERT, F.: Methoden der Fernerkundung zur Unterstützung des FFH-Monitorings – DeCOVER2 Thematische Dienste.	26
FRANZKE, J.H., WETZEL, H.-U. & KNIEPER, M.: Einsatzmöglichkeiten der Fernerkundung für struktur- und ingenieurgeologische Fragestellungen in gering aufgeschlossenen Kristallingebieten (Süd-Schwarzwald).	217
FRITSCH, D.: Siehe TANG, R., FRITSCH, D. & CRAMER, M.: New Mathematical Self-calibration Models in Aerial Photogrammetry.	457
GLÄBER, C.: Siehe BEYER, F., GÖTZE, C., GLÄBER, C. & KOPAČKOVÁ, V.: Ableitung geochemischer Parameter aus dem Bedeckungsgrad der Pioniervegetation im Braunkohlerevier Sokolov unter Verwendung von Linear Spectral Unmixing. ...	294
GÖTZE, C.: Siehe BEYER, F., GÖTZE, C., GLÄBER, C. & KOPAČKOVÁ, V.: Ableitung geochemischer Parameter aus dem Bedeckungsgrad der Pioniervegetation im Braunkohlerevier Sokolov unter Verwendung von Linear Spectral Unmixing. ...	294
GRIESBACH, R.: Siehe SCHLUND, M., ZILLMANN, E., GRIESBACH, R. & WEICHEL, H.: Identifikation von Synergieeffekten durch die Verwendung von RapidEye und TerraSAR-X Daten für die Veränderungsdetektion von Landnutzungsgeometrien - Erfahrungen aus DeCOVER 2.	54
GROB, W. & MIDDELMANN, W.: Sparseness Inducing Initialization for Nonnegative Matrix Factorization in Hyperspectral Data.	306
HAALA, N.: Siehe CRAMER, M. & HAALA, N.: Genauigkeitspotential der photogrammetrischen Bildauswertung für Daten unbemannter Luftfahrzeuge. ...	428
HAGHSHEENAS, M., MOTAGH, M. & SHARIFI, M.-A.: Time-series analysis of interseismic deformation across the Ganos segment of the North Anatolian Fault (NAF) zone, Turkey, from ERS and Envisat PS-InSAR.	225
HEIMBERG, U. & ZANTOPP, R.: Luftbildarchäologie römischer Siedlung im Rheinland. ..	83
HETTI ARACHCHIGE, N. & MAAS, H.-G.: Automatic Building Facade Detection in Mobile Laser Scanner point Clouds.	347
HETZE, B.: Siehe BUCHROITHNER, M., EHLERT, G., HETZE, B., KOHLSCHMIDT, H. & PRECHTEL, N.: Ein Systemprototyp zur Unterstützung der Bergrettung auf Basis einer Interaktion zwischen GPS-Tracking und einem digitalen 3D-Felswandmodell.	256
HILBERT, C., KNUTH, R. & SCHMULLIUS, C.: Ableitung von Waldstrukturparametern mittels TerraSAR-X- und ICESat/GLAS-Daten im Thüringer Wald.	392
HOEGNER, L.: Siehe IWASZCZUK, D., HOEGNER, L., SCHMITT, M. & STILLA, U.: Linienbasiertes Matching von 3D-Gebäudemodellen mit IR Luftbildsequenzen zur automatischen Texturgewinnung.	195
HOEGNER, L.: Siehe SCHARES, J.-M., HOEGNER, L. & STILLA, U.: Geometrische Untersuchung zur Tiefengenaugigkeit des Kinect-Sensorsystems.	372
HÖFLE, B.: Siehe LILIENTHAL, H., RICHTER, N., SIEGMANN, B., JARMER, T., SELIGE, T. & HÖFLE, B.: Erzeugung von Bilddaten aus bodengestützten hyperspektralen Feldmessungen.	323
HÖFLE, B.: Siehe SIEGMANN, B., JARMER, T., LILIENTHAL, H., RICHTER, N., SELIGE, T. & HÖFLE, B.: Die Ableitung des Blattflächenindex von Weizenbeständen aus abbildenden Hyperspektraldaten.	339
HOVENBITZER, M.: Auf dem Weg zu der INSPIRE-Datenspezifikation für Höhendaten.	475
IWASZCZUK, D., HOEGNER, L., SCHMITT, M. & STILLA, U.: Linienbasiertes Matching von 3D-Gebäudemodellen mit IR Luftbildsequenzen zur automatischen	

Texturgewinnung.	195
JACOBSEN, K.: Potential neuer großformatiger digitaler Kameras.	441
JARMER, T., LILIENTHAL, H., EHLERS, M., KLONUS, S. & ROSSO, P.: Hyperspektraldaten zur Erfassung des organischen Kohlenstoffs landwirtschaftlicher Böden.	314
JARMER, T.: Siehe KLONUS, S., EHLERS, M., SCHOOF, M., WOHLFAHRT, R. & JARMER, T.: Vergleich der radiometrischen und geometrischen Auflösung von RapidEye und SPOT 5.	44
JARMER, T.: Siehe LILIENTHAL, H., RICHTER, N., SIEGMANN, B., JARMER, T., SELIGE, T. & HÖFLE, B.: Erzeugung von Bilddaten aus bodengestützten hyperspektralen Feldmessungen.	323
JARMER, T.: Siehe SIEGMANN, B., JARMER, T., LILIENTHAL, H., RICHTER, N., SELIGE, T. & HÖFLE, B.: Die Ableitung des Blattflächenindex von Weizenbeständen aus abbildenden Hyperspektraldaten.	339
KADEN, R., KRÜGER, A. & KOLBE, T.H.: Integratives Entscheidungswerkzeug für die ganzheitliche Planung in Städten auf der Basis von semantischen 3D-Stadtmodellen am Beispiel des Energieatlasses Berlin.	173
KARDOŠ, M. & ŽIHLAVNÍK, Š.: Modern Methods of Data Collection in Slovak Forest Management.	36
KARRASCH, P.: Siehe RICHTER, S., PECH, K., KARRASCH, P. & BERNARD, L.: Potenziale und Grenzen einer gemeinsamen Nutzung von In-Situ- und Fernerkundungsdaten für umweltbezogene Gesundheitsanwendungen.	284
KAUFMANN, H.: Siehe LUBITZ, C., MOTAGH, M., WETZEL, H.-U., ANDERSSOHN, J., SASS, I. & KAUFMANN, H.: TerraSAR-X time series analysis of surface uplift in Staufen, South-West Germany.	231
KAUFMANN, H.: Siehe MOTAGH, M., WETZEL, H.-U., ROESSNER, S. & KAUFMANN, H.: Potential contribution of TerraSAR-X radar remote sensing for landslide hazard assessment in Kyrgyzstan.	237
KERSTEN, T.P., LINDSTAEDT, M., MECHELKE, K. & ZOBEL, K.: Automatische 3D-Objektrekonstruktion aus unstrukturierten digitalen Bilddaten für Anwendungen in Architektur, Denkmalpflege und Archäologie.	137
KERSTEN, T.P.: Siehe STALLMANN, D. & KERSTEN, T.P.: Automatisches Texture Mapping von 3D-Modellen in Architektur und Archäologie.	381
KEUCK, V.: Siehe FRANKE, J., KEUCK, V. & SIEGERT, F.: Methoden der Fernerkundung zur Unterstützung des FFH-Monitorings – DeCOVER2 Thematische Dienste.	26
KLIMKE, J. & DÖLLNER, J.: Datenintegration in dienstbasierte 3D-Geovisualisierungssysteme für mobile Geräte.	266
KLONUS, S., EHLERS, M., SCHOOF, M., WOHLFAHRT, R. & JARMER, T.: Vergleich der radiometrischen und geometrischen Auflösung von RapidEye und SPOT 5. ...	44
KLONUS, S.: Siehe JARMER, T., LILIENTHAL, H., EHLERS, M., KLONUS, S. & ROSSO, P.: Hyperspektraldaten zur Erfassung des organischen Kohlenstoffs landwirtschaftlicher Böden.	314
KNIEPER, M.: Siehe FRANZKE, J.H., WETZEL, H.-U. & KNIEPER, M.: Einsatzmöglichkeiten der Fernerkundung für struktur- und ingenieurgeologische Fragestellungen in gering aufgeschlossenen Kristallgebieten (Süd-Schwarzwald).	217
KNUTH, R.: Siehe HILBERT, C., KNUTH, R. & SCHMULLIUS, C.: Ableitung von Waldstrukturparametern mittels TerraSAR-X- und ICESat/GLAS-Daten im Thüringer Wald.	392
KOHLSCHMIDT, H.: Siehe BUCHROITHNER, M., EHLERT, G., HETZE, B., KOHLSCHMIDT, H. & PRECHTEL, N.: Ein Systemprototyp zur Unterstützung der Bergrettung auf Basis einer Interaktion zwischen GPS-Tracking und einem digitalen 3D-Felswandmodell.	256
KOLBE, T.H.: Siehe KADEN, R., KRÜGER, A. & KOLBE, T.H.: Integratives Entscheidungswerkzeug für die ganzheitliche Planung in Städten auf der Basis von semantischen 3D-Stadtmodellen am Beispiel des Energieatlasses	

Berlin.	173
KOPAČKOVÁ, V.: Siehe BEYER, F., GÖTZE, C., GLÄßER, C. & KOPAČKOVÁ, V.: Ableitung geochemischer Parameter aus dem Bedeckungsgrad der Pioniervegetation im Braunkohlerevier Sokolov unter Verwendung von Linear Spectral Unmixing. .	294
KOTTMANN, L.: Siehe RICHTER, N., LILIENTHAL, H., KOTTMANN, L., SCHITTENHELM, S., SCHMIEDCHEN, B. & WILDE, P.: Einsatz von hyperspektraler Messtechnik in der Pflanzenzüchtung.	331
KRÜGER, A. Siehe KADEN, R., KRÜGER, A. & KOLBE, T.H.: Integratives Entscheidungswerkzeug für die ganzheitliche Planung in Städten auf der Basis von semantischen 3D-Stadtmodellen am Beispiel des Energieatlases Berlin.	173
LAUENROTH, G.: Siehe MOTZ, M. & LAUENROTH, G.: Das komplette Sensor-Portfolio aus einer Hand – Hexagon GeoSpatial Solutions.	449
LESSING, R.: Siehe CHRIST, I. & LESSING, R.: Semantische und geometrische Aspekte der Interoperabilität.	18
LILIENTHAL, H., RICHTER, N., SIEGMANN, B., JARMER, T., SELIGE, T. & HÖFLE, B.: Erzeugung von Bilddaten aus bodengestützten hyperspektralen Feldmessungen.	323
LILIENTHAL, H.: Siehe JARMER, T., LILIENTHAL, H., EHLERS, M., KLONUS, S. & ROSSO, P.: Hyperspektraldaten zur Erfassung des organischen Kohlenstoffs landwirtschaftlicher Böden.	314
LILIENTHAL, H.: Siehe RICHTER, N., LILIENTHAL, H., KOTTMANN, L., SCHITTENHELM, S., SCHMIEDCHEN, B. & WILDE, P.: Einsatz von hyperspektraler Messtechnik in der Pflanzenzüchtung.	331
LILIENTHAL, H.: Siehe SIEGMANN, B., JARMER, T., LILIENTHAL, H., RICHTER, N., SELIGE, T. & HÖFLE, B.: Die Ableitung des Blattflächenindex von Weizenbeständen aus abbildenden Hyperspektraldaten.	339
LINDSTAEDT, M.: SIEHE KERSTEN, T.P., LINDSTAEDT, M., MECHELKE, K. & ZOBEL, K.: Automatische 3D-Objektrekonstruktion aus unstrukturierten digitalen Bilddaten für Anwendungen in Architektur, Denkmalpflege und Archäologie. .	137
LOESCH, B., CHRISTEN, M. & NEBIKER, S.: OpenWebGlobe – Ein quelloffenes Software Development Kit zur Entwicklung virtueller Globen auf Basis von HTML5 und WebGL.	275
LOZANO-VEGA, G., BENEZETH, Y., UHLER, M., BOOCHS, F. & MARZANI, F.: Sketch of an automatic image based pollen detection system.	202
LUBITZ, C., MOTAGH, M., WETZEL, H.-U., ANDERSSOHN, J., SASS, I. & KAUFMANN, H.: TerraSAR-X time series analysis of surface uplift in Staufen, South-West Germany.	231
MAAS, H.-G.: Siehe HETTI ARACHCHIGE, N. & MAAS, H.-G.: Automatic Building Facade Detection in Mobile Laser Scanner point Clouds.	347
MAAS, H.-G.: Siehe PERERA, S.N. & MAAS, H.-G.: A Topology Based Approach for the Generation and Regularization of Roof Outlines in Airborne Laser Scanner Data.	400
MAAS, H.-G.: Siehe RICHTER, K., SEIDL, K., SCHNEIDER, D., MADER, D. & MAAS, H.-G.: Entwicklung eines geometrischen Modells für ein voll-reflektives Kamerasystem für Nahbereichsanwendungen.	363
MADER, D.: Siehe RICHTER, K., SEIDL, K., SCHNEIDER, D., MADER, D. & MAAS, H.-G.: Entwicklung eines geometrischen Modells für ein voll-reflektives Kamerasystem für Nahbereichsanwendungen.	363
MARZANI, F.: Siehe LOZANO-VEGA, G., BENEZETH, Y., UHLER, M., BOOCHS, F. & MARZANI, F.: Sketch of an automatic image based pollen detection system. ..	202
MECHELKE, K.: Siehe KERSTEN, T.P., LINDSTAEDT, M., MECHELKE, K. & ZOBEL, K.: Automatische 3D-Objektrekonstruktion aus unstrukturierten digitalen Bilddaten für Anwendungen in Architektur, Denkmalpflege und Archäologie.	137
MIDDELMANN, W.: Siehe GROß, W. & MIDDELMANN, W.: Sparseness Inducing Initialization for Nonnegative Matrix Factorization in Hyperspectral Data.	306

MORÉ, J. & WIEDEMANN, A.: Monoskopische 3D-Geometrieerfassung unter Annahme von Bedingungen aus orientierten Schrägbildern.	355
MOTAGH, M., WETZEL, H.-U., ROESSNER, S. & KAUFMANN, H.: Potential contribution of TerraSAR-X radar remote sensing for landslide hazard assessment in Kyrgyzstan.	237
MOTAGH, M.: Siehe AKBARIMEHR, M., MOTAGH, M., AKBARI, B., PASHAZADEH, F. & WETZEL, H.-U.: InSAR and GPS analysis of landslides: Application to assess slope stability of Sarcheshmeh and Gougerd landslides, Iran.	210
MOTAGH, M.: Siehe HAGHSHENAS, M., MOTAGH, M. & SHARIFI, M.-A.: Time-series analysis of interseismic deformation across the Ganos segment of the North Anatolian Fault (NAF) zone, Turkey, from ERS and Envisat PS-InSAR.	225
MOTAGH, M.: Siehe LUBITZ, C., MOTAGH, M., WETZEL, H.-U., ANDERSSOHN, J., SASS, I. & KAUFMANN, H.: TerraSAR-X time series analysis of surface uplift in Staufen, South-West Germany.	231
MOTAGH, M.: Siehe NEELMEIJER, J., MOTAGH, M., WETZEL, H.-U. & BUCHROITHNER, M.: Observation of the Surface Velocity Field of Inylchek Glacier (Kyrgyzstan) by means of TerraSAR-X Imagery.	242
MOTAGH, M.: Siehe TESHEBAEVA, K., SUDHAUS, H., ECHTLER, H.: MOTAGH, M., ROESSNER, S., SCHURR, B., WETZEL, H.-U. & ZUBOVICH, A.: InSAR analysis of the coseismic deformation related to the 2008 Nura earthquake, Pamir-Alai mountains.	249
MOTZ, M. & LAUENROTH, G.: Das komplette Sensor-Portfolio aus einer Hand – Hexagon GeoSpatial Solutions.	449
MÜLLER-SIEGERT, R. & PRZYBILLA, H.-J.: 3D-Informationssysteme für die Bauphysik: Ein alternativer Ansatz der Gebäudemodellierung.	187
NEBIKER, S.: Siehe LOESCH, B., CHRISTEN, M. & NEBIKER, S.: OpenWebGlobe – Ein quelloffenes Software Development Kit zur Entwicklung virtueller Globen auf Basis von HTML5 und WebGL.	275
NEELMEIJER, J., MOTAGH, M., WETZEL, H.-U. & BUCHROITHNER, M.: Observation of the Surface Velocity Field of Inylchek Glacier (Kyrgyzstan) by means of TerraSAR-X Imagery.	242
PASHAZADEH, F.: Siehe AKBARIMEHR, M., MOTAGH, M., AKBARI, B., PASHAZADEH, F. & WETZEL, H.-U.: InSAR and GPS analysis of landslides: Application to assess slope stability of Sarcheshmeh and Gougerd landslides, Iran.	210
PECH, K.: SIEHE RICHTER, S., PECH, K., KARRASCH, P. & BERNARD, L.: Potenziale und Grenzen einer gemeinsamen Nutzung von In-Situ- und Fernerkundungsdaten für umweltbezogene Gesundheitsanwendungen.	284
PERERA, S.N. & MAAS, H.-G.: A Topology Based Approach for the Generation and Regularization of Roof Outlines in Airborne Laser Scanner Data.	400
PRECHTEL, N.: Siehe BUCHROITHNER, M., EHLERT, G., HETZE, B., KOHLSCHMIDT, H. & PRECHTEL, N.: Ein Systemprototyp zur Unterstützung der Bergrettung auf Basis einer Interaktion zwischen GPS-Tracking und einem digitalen 3D-Felswandmodell.	256
PRZYBILLA, H.-J.: Siehe MÜLLER-SIEGERT, R. & PRZYBILLA, H.-J.: 3D-Informationssysteme für die Bauphysik: Ein alternativer Ansatz der Gebäudemodellierung.	187
RICHTER, K., SEIDL, K., SCHNEIDER, D., MADER, D. & MAAS, H.-G.: Entwicklung eines geometrischen Modells für ein voll-reflektives Kamerasystem für Nahbereichsanwendungen.	363
RICHTER, N., LILIENTHAL, H., KOTTMANN, L., SCHITTENHELM, S., SCHMIEDCHEN, B. & WILDE, P.: Einsatz von hyperspektraler Messtechnik in der Pflanzenzüchtung.	331
RICHTER, N.: Siehe LILIENTHAL, H., RICHTER, N., SIEGMANN, B., JARMER, T., SELIGE, T. & HÖFLE, B.: Erzeugung von Bilddaten aus bodengestützten hyperspektralen Feldmessungen.	323
RICHTER, N.: Siehe SIEGMANN, B., JARMER, T., LILIENTHAL, H., RICHTER, N.,	

SELIGE, T. & HÖFLE, B.: Die Ableitung des Blattflächenindex von Weizenbeständen aus abbildenden Hyperspektraldaten.	339
RICHTER, S., PECH, K., KARRASCH, P. & BERNARD, L.: Potenziale und Grenzen einer gemeinsamen Nutzung von In-Situ- und Fernerkundungsdaten für umweltbezogene Gesundheitsanwendungen.	284
ROESSNER, S.: Siehe MOTAGH, M., WETZEL, H.-U., ROESSNER, S. & KAUFMANN, H.: Potential contribution of TerraSAR-X radar remote sensing for landslide hazard assessment in Kyrgyzstan.	237
ROESSNER, S.: Siehe TESHEBAEVA, K., SUDHAUS, H., ECHTLER, H.: MOTAGH, M., ROESSNER, S., SCHURR, B., WETZEL, H.-U. & ZUBOVICH, A.: InSAR analysis of the coseismic deformation related to the 2008 Nura earthquake, Pamir-Alai mountains.	249
ROSSO, P.: Siehe JARMER, T., LILIENTHAL, H., EHLERS, M., KLONUS, S. & ROSSO, P.: Hyperspektraldaten zur Erfassung des organischen Kohlenstoffs landwirtschaftlicher Böden.	314
SASS, I.: Siehe LUBITZ, C., MOTAGH, M., WETZEL, H.-U., ANDERSSOHN, J., SASS, I. & KAUFMANN, H.: TerraSAR-X time series analysis of surface uplift in Staufen, South-West Germany.	231
SCHACK, L. & SÖRGE, U.: Nutzung von Nachbarschaftsinformationen zur Validierung der SAR-Tomographie.	410
SCHÄFER, M.: Der Einfluss der Atmosphäre bei der Erfassung von Höhenänderungen mit differentieller Radarinterferometrie.	418
SCHARES, J.-M., HOEGNER, L. & STILLA, U.: Geometrische Untersuchung zur Tiefengenauigkeit des Kinect-Sensorsystems.	372
SCHITTENHELM, S.: Siehe RICHTER, N., LILIENTHAL, H., KOTTMANN, L., SCHITTENHELM, S., SCHMIEDCHEN, B. & WILDE, P.: Einsatz von hyperspektraler Messtechnik in der Pflanzenzüchtung.	331
SCHLUND, M., ZILLMANN, E., GRIESBACH, R. & WEICHEL, H.: Identifikation von Synergieeffekten durch die Verwendung von RapidEye und TerraSAR-X Daten für die Veränderungsdetektion von Landnutzungsgeometrien – Erfahrungen aus DeCOVER 2.	54
SCHMIEDCHEN, B.: Siehe RICHTER, N., LILIENTHAL, H., KOTTMANN, L., SCHITTENHELM, S., SCHMIEDCHEN, B. & WILDE, P.: Einsatz von hyperspektraler Messtechnik in der Pflanzenzüchtung.	331
SCHMITT, M.: Siehe IWASZCZUK, D., HOEGNER, L., SCHMITT, M. & STILLA, U.: Linienbasiertes Matching von 3D-Gebäudemodellen mit IR Luftbildsequenzen zur automatischen Texturgewinnung.	195
SCHMULLIUS, C.: Siehe HILBERT, C., KNUTH, R. & SCHMULLIUS, C.: Ableitung von Waldstrukturparametern mittels TerraSAR-X- und ICESat/GLAS-Daten im Thüringer Wald.	392
SCHNEIDER, D.: Siehe RICHTER, K., SEIDL, K., SCHNEIDER, D., MADER, D. & MAAS, H.-G.: Entwicklung eines geometrischen Modells für ein voll-reflektives Kamerasystem für Nahbereichsanwendungen.	363
SCHOOF, M.: Siehe KLONUS, S., EHLERS, M., SCHOOF, M., WOHLFAHRT, R. & JARMER, T.: Vergleich der radiometrischen und geometrischen Auflösung von RapidEye und SPOT 5.	44
SCHURR, B.: Siehe TESHEBAEVA, K., SUDHAUS, H., ECHTLER, H.: MOTAGH, M., ROESSNER, S., SCHURR, B., WETZEL, H.-U. & ZUBOVICH, A.: InSAR analysis of the coseismic deformation related to the 2008 Nura earthquake, Pamir-Alai mountains.	249
SEIDL, K.: Siehe RICHTER, K., SEIDL, K., SCHNEIDER, D., MADER, D. & MAAS, H.-G.: Entwicklung eines geometrischen Modells für ein voll-reflektives Kamerasystem für Nahbereichsanwendungen.	363
SEILER, R.: Analyse linearer Trends in der Phänologie multimodaler Vegetation, Auswertung von NDVI Zeitreihen für das Niger Binnendelta (Rep. Mali / Westafrika).	65

SEITZ, R.: Siehe STRAUB, C. & SEITZ, R.: Schätzung von forstlichen Kenngrößen auf der Grundlage von Punktwolken aus digitaler Photogrammetrie und flugzeuggetragener Laserscannermessung.	75
SELIGE, T.: Siehe LILIENTHAL, H., RICHTER, N., SIEGMANN, B., JARMER, T., SELIGE, T. & HÖFLE, B.: Erzeugung von Bilddaten aus bodengestützten hyperspektralen Feldmessungen.	323
SELIGE, T.: Siehe SIEGMANN, B., JARMER, T., LILIENTHAL, H., RICHTER, N., SELIGE, T. & HÖFLE, B.: Die Ableitung des Blattflächenindex von Weizenbeständen aus abbildenden Hyperspektraldaten.	339
SHARIFI, M.-A.: Siehe HAGHSHENAS, M., MOTAGH, M. & SHARIFI, M.-A.: Time-series analysis of interseismic deformation across the Ganos segment of the North Anatolian Fault (NAF) zone, Turkey, from ERS and Envisat PS-InSAR.	225
SIEGERT, F.: Siehe FRANKE, J., KEUCK, V. & SIEGERT, F.: Methoden der Fernerkundung zur Unterstützung des FFH-Monitorings – DeCOVER2 Thematische Dienste.	26
SIEGMANN, B., JARMER, T., LILIENTHAL, H., RICHTER, N., SELIGE, T. & HÖFLE, B.: Die Ableitung des Blattflächenindex von Weizenbeständen aus abbildenden Hyperspektraldaten.	339
SIEGMANN, B.: Siehe LILIENTHAL, H., RICHTER, N., SIEGMANN, B., JARMER, T., SELIGE, T. & HÖFLE, B.: Erzeugung von Bilddaten aus bodengestützten hyperspektralen Feldmessungen.	323
SÖRGEL, U.: Siehe SCHACK, L. & SÖRGEL, U.: Nutzung von Nachbarschaftsinformationen zur Validierung der SAR-Tomographie.	410
STALLMANN, D. & KERSTEN, T.P.: Automatisches Texture Mapping von 3D-Modellen in Architektur und Archäologie.	381
STILLA, U.: Siehe IWASZCZUK, D., HOEGNER, L., SCHMITT, M. & STILLA, U.: Linienbasiertes Matching von 3D-Gebäudemodellen mit IR Luftbildsequenzen zur automatischen Texturgewinnung.	195
STILLA, U.: Siehe SCHARES, J.-M., HOEGNER, L. & STILLA, U.: Geometrische Untersuchung zur Tiefengenaugigkeit des Kinect-Sensorsystems.	372
STRAUB, C. & SEITZ, R.: Schätzung von forstlichen Kenngrößen auf der Grundlage von Punktwolken aus digitaler Photogrammetrie und flugzeuggetragener Laserscannermessung.	75
SUDHAUS H.: Siehe TESHEBAEVA, K., SUDHAUS, H., ECHTLER, H.: MOTAGH, M., ROESSNER, S., SCHURR, B., WETZEL, H.-U. & ZUBOVICH, A.: InSAR analysis of the coseismic deformation related to the 2008 Nura earthquake, Pamir-Alai mountains.	249
TANG, R., FRITSCH, D. & CRAMER, M.: New Mathematical Self-calibration Models in Aerial Photogrammetry.	457
TESHEBAEVA, K., SUDHAUS, H., ECHTLER, H.: MOTAGH, M., ROESSNER, S., SCHURR, B., WETZEL, H.-U. & ZUBOVICH, A.: InSAR analysis of the coseismic deformation related to the 2008 Nura earthquake, Pamir-Alai mountains.	249
UHLER, M.: Siehe LOZANO-VEGA, G., BENEZETH, Y., UHLER, M., BOOCHS, F. & MARZANI, F.: Sketch of an automatic image based pollen detection system.	202
WEICHELDT, H.: Siehe SCHLUND, M., ZILLMANN, E., GRIESBACH, R. & WEICHELDT, H.: Identifikation von Synergieeffekten durch die Verwendung von RapidEye und TerraSAR-X Daten für die Veränderungsdetektion von Landnutzungsgeometrien - Erfahrungen aus DeCOVER 2.	54
WETZEL, H.-U.: Siehe AKBARIMEHR, M., MOTAGH, M., AKBARI, B., PASHAZADEH, F. & WETZEL, H.-U.: InSAR and GPS analysis of landslides: Application to assess slope stability of Sarcheshmeh and Gougerd landslides, Iran.	210
WETZEL, H.-U.: Siehe FRANZKE, J.H., WETZEL, H.-U. & KNIEPER, M.: Einsatzmöglichkeiten der Fernerkundung für struktur- und ingenieurgeologische Fragestellungen in gering aufgeschlossenen Kristallingebieten (Süd-Schwarzwald).	217
WETZEL, H.-U.: Siehe LUBITZ, C., MOTAGH, M., WETZEL, H.-U., ANDERSSOHN, J.,	

SASS, I. & KAUFMANN, H.: TerraSAR-X time series analysis of surface uplift in Staufen, South-West Germany.	231
WETZEL, H.-U.: Siehe MOTAGH, M., WETZEL, H.-U., ROESSNER, S. & KAUFMANN, H.: Potential contribution of TerraSAR-X radar remote sensing for landslide hazard assessment in Kyrgyzstan.	237
WETZEL, H.-U.: Siehe NEELMEIJER, J., MOTAGH, M., WETZEL, H.-U. & BUCHROITHNER, M.: Observation of the Surface Velocity Field of Inylchek Glacier (Kyrgyzstan) by means of TerraSAR-X Imagery.	242
WETZEL, H.-U.: Siehe TESHEBAEVA, K., SUDHAUS, H., ECHTLER, H.: MOTAGH, M., ROESSNER, S., SCHURR, B., WETZEL, H.-U. & ZUBOVICH, A.: InSAR analysis of the coseismic deformation related to the 2008 Nura earthquake, Pamir-Alai mountains.	249
WIEDEMANN, A. & BECKMANN, A.: Dense Image Matching in der Praxis.	149
WIEDEMANN, A.: Siehe MORÉ, J. & WIEDEMANN, A.: Monoskopische 3D-Geometrieerfassung unter Annahme von Bedingungen aus orientierten Schrägbildern.	355
WILDE, P.: Siehe RICHTER, N., LILIENTHAL, H., KOTTMANN, L., SCHITTENHELM, S., SCHMIEDCHEN, B. & WILDE, P.: Einsatz von hyperspektraler Messtechnik in der Pflanzenzüchtung.	331
WOHLFAHRT, R.: Siehe KLONUS, S., EHLERS, M., SCHOOF, M., WOHLFAHRT, R. & JARMER, T.: Vergleich der radiometrischen und geometrischen Auflösung von RapidEye und SPOT 5.	44
ZANTOPP, R.: Siehe HEIMBERG, U. & ZANTOPP, R.: Luftbildarchäologie römischer Siedlung im Rheinland.	83
ŽIHLAVNÍK, Š.: Siehe KARDOŠ, M. & ŽIHLAVNÍK, Š.: Modern Methods of Data Collection in Slovak Forest Management.	36
ZILLMANN, E.: Siehe SCHLUND, M., ZILLMANN, E., GRIESBACH, R. & WEICHEL, H.: Identifikation von Synergieeffekten durch die Verwendung von RapidEye und TerraSAR-X Daten für die Veränderungsdetektion von Landnutzungsgeometrien - Erfahrungen aus DeCOVER 2.	54
ZOBEL, K.: Siehe KERSTEN, T.P., LINDSTAEDT, M., MECHELKE, K. & ZOBEL, K.: Automatische 3D-Objektrekonstruktion aus unstrukturierten digitalen Bilddaten für Anwendungen in Architektur, Denkmalpflege und Archäologie.	137
ZUBOVICH, A.: Siehe TESHEBAEVA, K., SUDHAUS, H., ECHTLER, H.: MOTAGH, M., ROESSNER, S., SCHURR, B., WETZEL, H.-U. & ZUBOVICH, A.: InSAR analysis of the coseismic deformation related to the 2008 Nura earthquake, Pamir-Alai mountains.	249

Automatische Detektion geodätischer Ziele

Motivation **Genaue und effiziente Anzielung von Zielobjekten mit dem Tachymeter**



<http://www.leica-geosystems.com/>

Mit einem neuen und zudem passiven Verfahren sollen Zielpunkte für den Tachymeter mittels **integrierter Kamera** automatisch detektiert, bewertet und als Auswahl an den Anwender zurück gegeben werden. Ziel ist eine Beschleunigung des Arbeitsablaufes. Der Fokus dieser Arbeit gilt der automatischen Detektion der Zielobjekte mit Hilfe der Kamerabilder.

Aufgabe **Test eines HOG-Detektors auf diverse geodätische Klassen**

Es wurde eine auf dem HOG (Histograms of Oriented Gradients) Verfahren basierende **Detektionssoftware**¹ zur Objekterkennung in Bildern auf vier verschiedene repräsentative Klassen getestet.

Ziel **Erkennen der Möglichkeiten und Grenzen des gewählten Verfahrens**

Gegenstand der Untersuchung bildeten in der Arbeit folgende Fragestellungen. Sie sollten objektiv sowie vielseitig beurteilt werden:

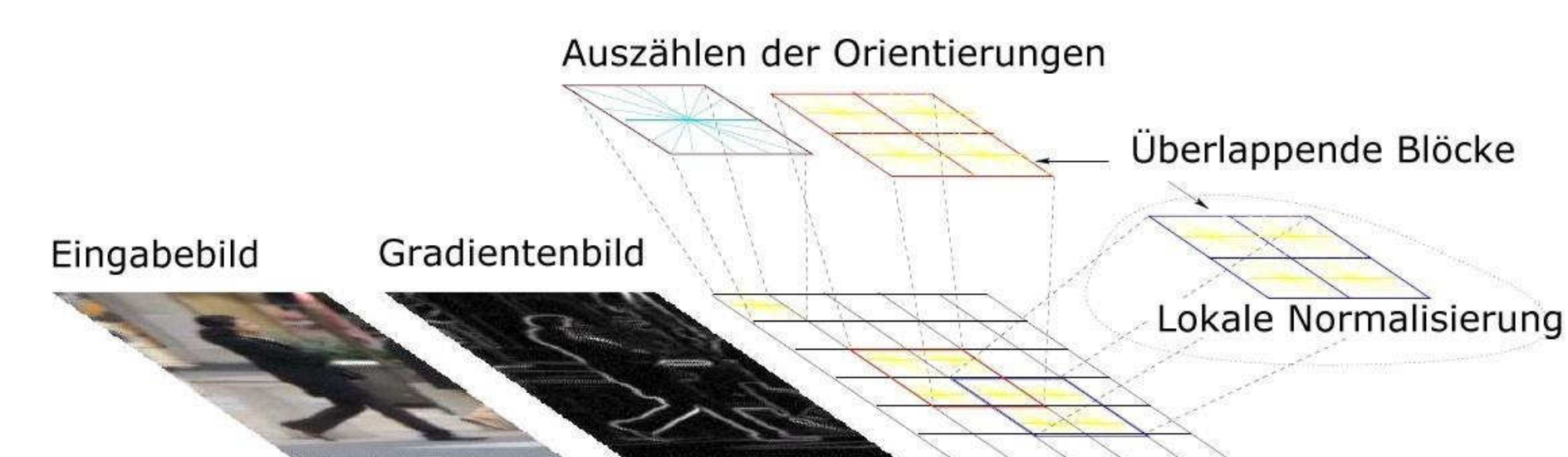
- Wie genau und zuverlässig lassen sich die Zielobjekte mit der vorhandenen Detektionssoftware erkennen?
- Was sind die Möglichkeiten in der Praxis und wo ergeben sich Schwierigkeiten? Mit welchen **Lösungsansätzen** lassen sich solche Probleme allenfalls beheben?

HOG **Gewinnung von Merkmalsvektoren aus Trainingsbildern**

Um das gewünschte Objekt vom Hintergrund oder von anderen Objekten unterscheiden zu können, werden sogenannte Merkmalsvektoren aus positiven und negativen Trainingsfenstern (Patches) gewonnen. Diese beschreiben die Bildstruktur und dienen als Input in eine **lineare Support Vector Machine (SVM)**. Letztere ermöglicht darauf die Trennung von Zielobjekten und Nicht-Zielobjekten.



Abb. 1 Negatives Trainingsbild mit zufälligen Fenstern (links), positives Bild mit annotiertem Fenster über dem Zielobjekt (rechts).



(Übersetzt ins Deutsche; aus Dalal, Navneet und B. Triggs (2005). Histograms of Oriented Gradients for Human Detection. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, San Diego)

Abb. 2 Bei der Berechnung von HOG-Vektoren wird ein Fenster netzförmig in Zellen unterteilt. Innerhalb dieser Zellen generiert der Algorithmus jeweils ein **Histogramm der Bildgradienten** aller vorhandenen Pixel.

Mehrere dieser Zellantworten werden anschliessend in grösseren räumlichen Regionen (überlappende Blöcke) zusammengefasst und normalisiert. Sie liefern dann die Komponenten des Merkmalsvektors.

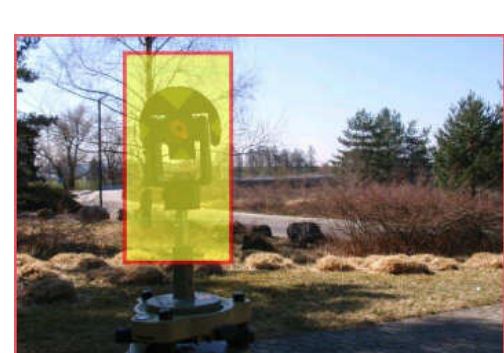


Abb. 3 Beim Testen von Bildern läuft ein sogenanntes **sliding window** auf verschiedenen Pyramidenstufen schrittweise durch das Bild. Dabei wird auf allen Positionen der HOG-Vektor ausgewertet und das Fenster somit als Zielobjekt oder als Nicht-Zielobjekt klassifiziert.

¹ **Referenz zur Detektionssoftware**

Walk, Stefan, K. Schindler und B. Schiele (2010). Disparity Statistics for Pedestrian Detection: Combining Appearance, Motion and Stereo. European Conference on Computer Vision, Herakleion, S. 182-195.

Ergebnisse **Hohe Erkennungsraten in wichtigen geodätischen Zielklassen**

In drei der Klassen konnte nach entsprechender Wahl von Parameter und Trainingsbilder mit der vorhandenen Software ein gutes Resultat erzielt werden. Die folgenden statistischen Auswertungen beruhen auf einem Vergleich der gerechneten Detektionen mit solchen manuell als Musterlösung annotierten Fenstern im jeweiligen Testbildsatz. Der Begriff **Genaugigkeit** meint hier den relativen Anteil der richtigen Detektionen an allen Detektionen (richtige und falsche) in einem Bild.

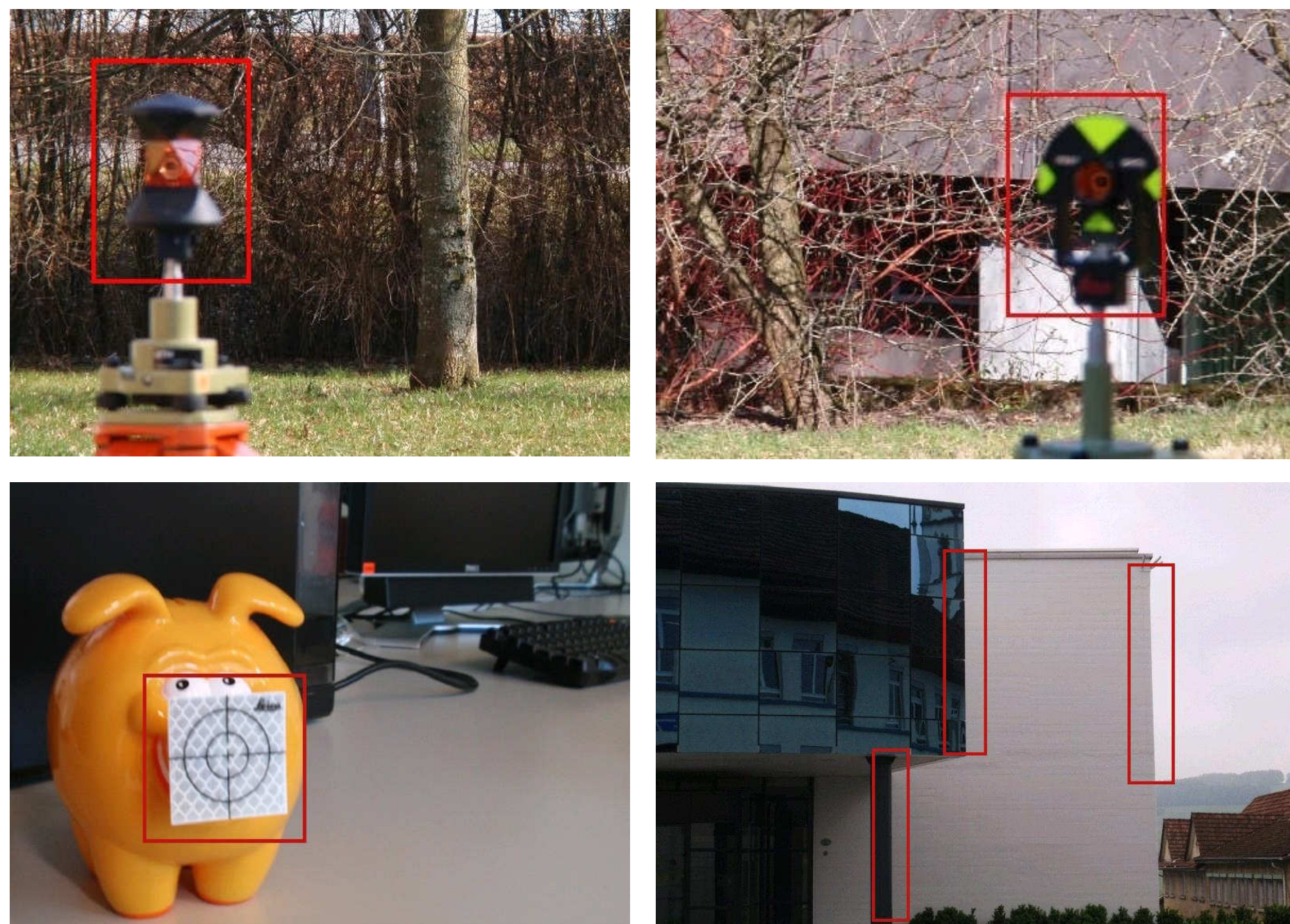


Abb. 4 Erfolgreiche Detektionen in den vier getesteten Klassen (von oben links im UZS): 360°-Reflektorprisma, Mini-Reflektorprisma, Hauskanten, Zielmarkenaufkleber

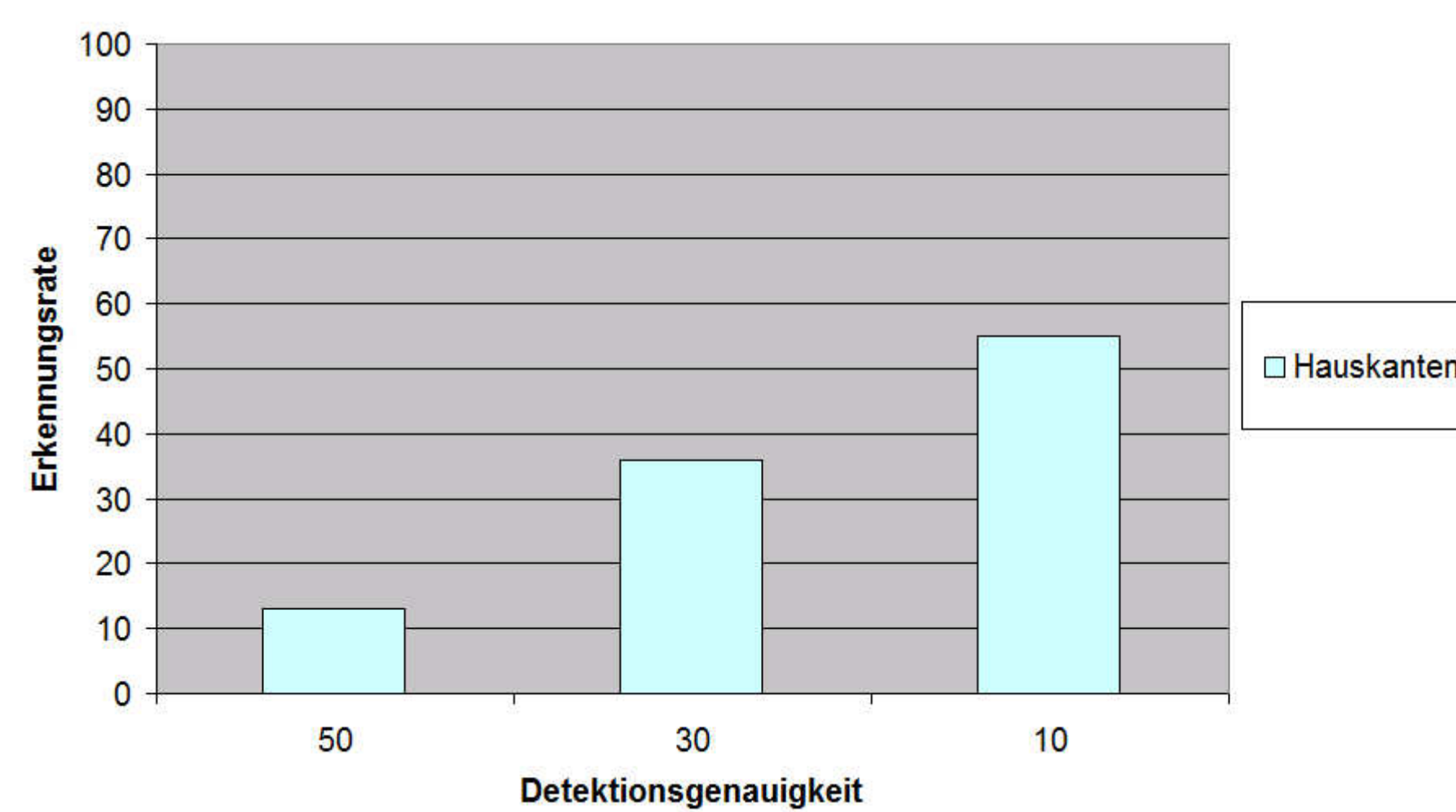
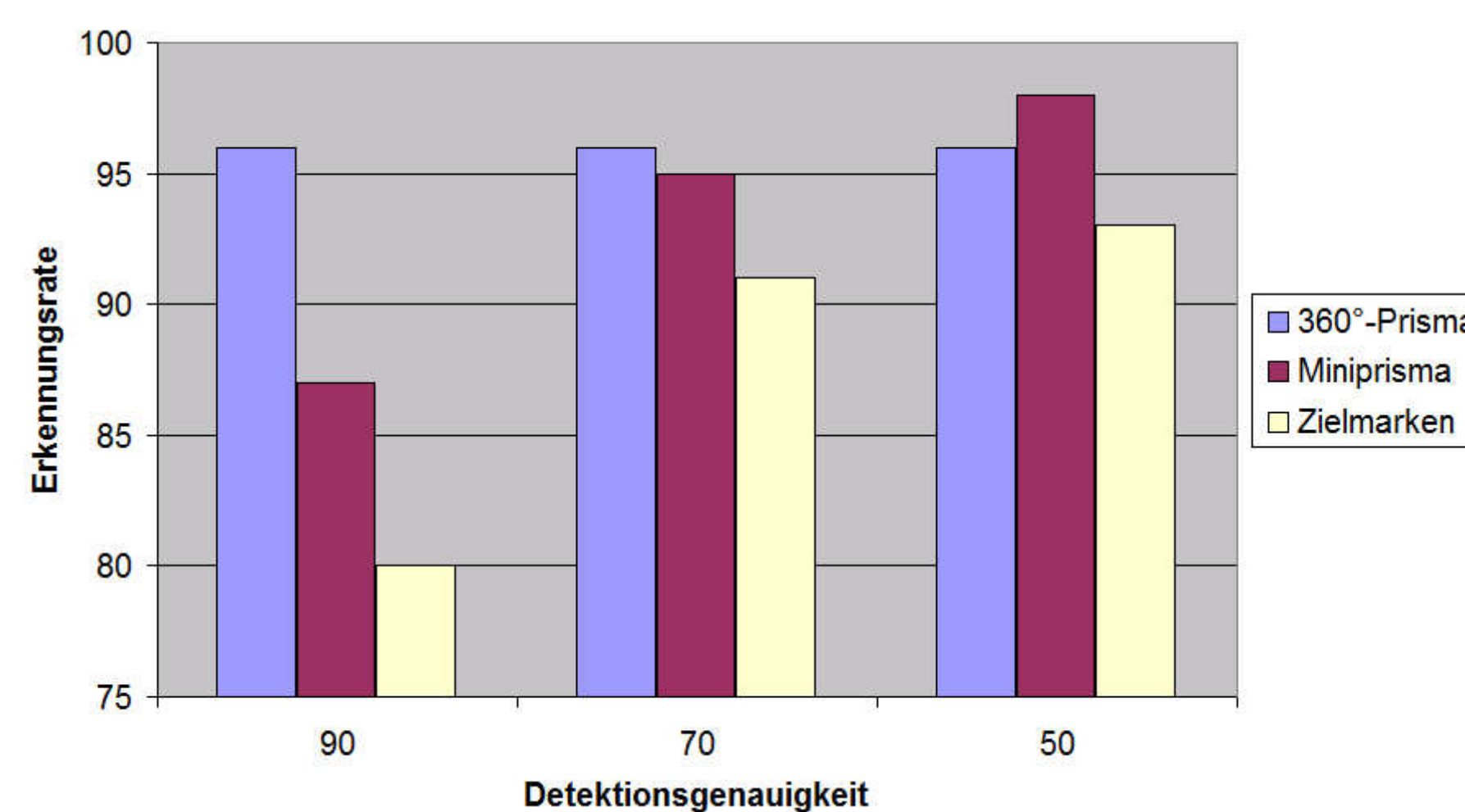


Abb. 5 Erkennungsrate bei gegebener Genauigkeit

In drei der vier Klassen konnte im jeweiligen Bestversuch eine Erkennungsrate von über 90% erzielt werden (erste Grafik). Am Besten schnitt das 360°-Prisma ab, wo bereits bei hoher Genauigkeit eine Erkennungsrate von 96% erreicht wurde.

Im Falle der Hauskanten (zweite Grafik) überschritt jedoch die Erkennungsrate erst bei sehr tiefer Genauigkeit von 10% die 50%-Marke. Die Probleme diesbezüglich werden in der Spalte rechts erläutert.

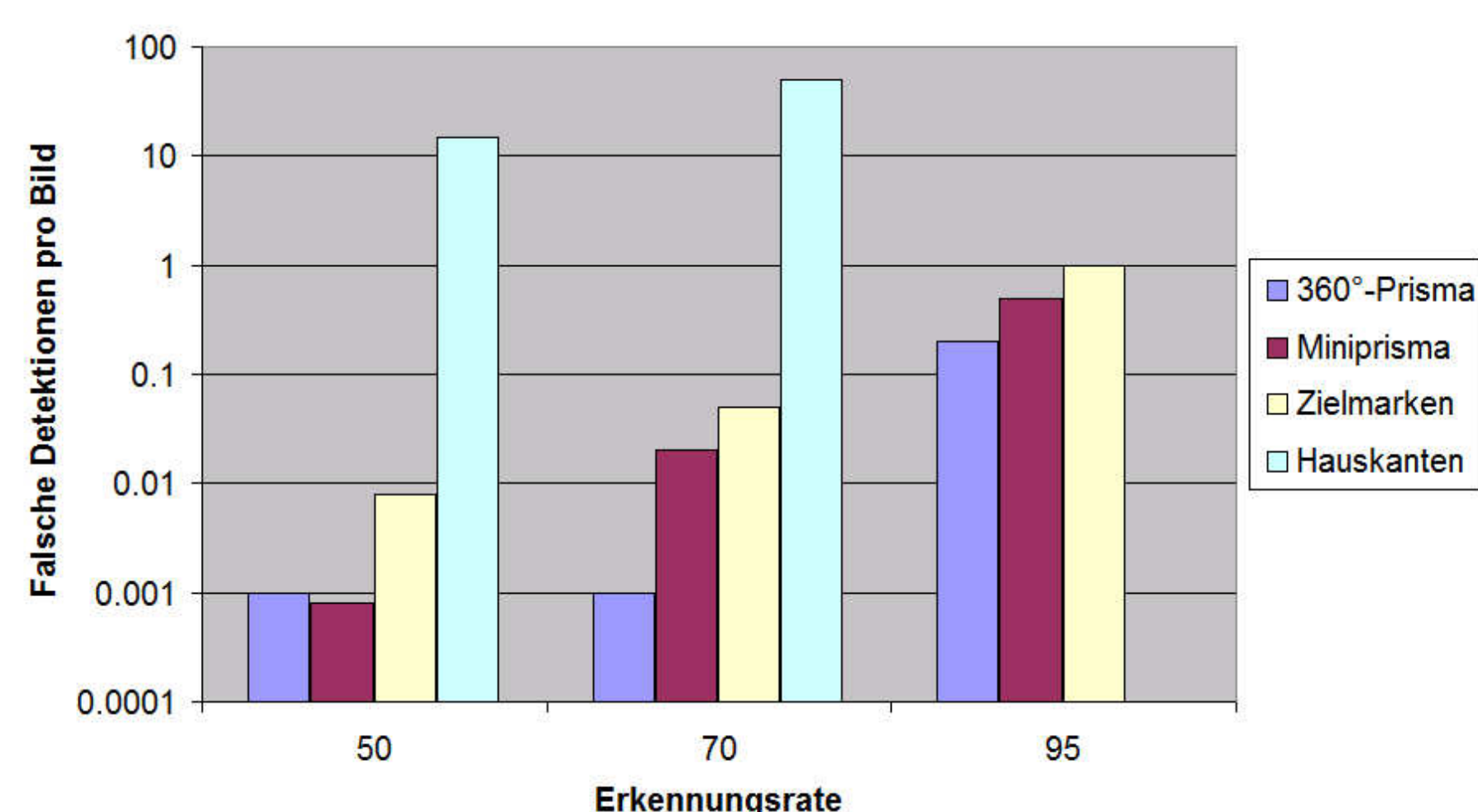


Abb. 6 Anzahl falscher Detektionen pro Bild bei gegebener Erkennungsrate

Eine Veranschaulichung des Fehlers 1. Art zeigt, dass in drei der Klassen die Anzahl falscher Detektionen pro Bild selbst bei grosser Erkennungsrate unterhalb von 1 liegt und mit steigender Verfehlungsrate (Fehler 2. Art) schnell absinkt. Bei den Hauskanten hingegen lag die Anzahl falscher Detektionen sehr hoch. Am sichersten wurde wiederum das 360°-Prisma detektiert.

Probleme und Lösungsansätze **Falsch, gar nicht oder mehrfach detektierte Objekte**

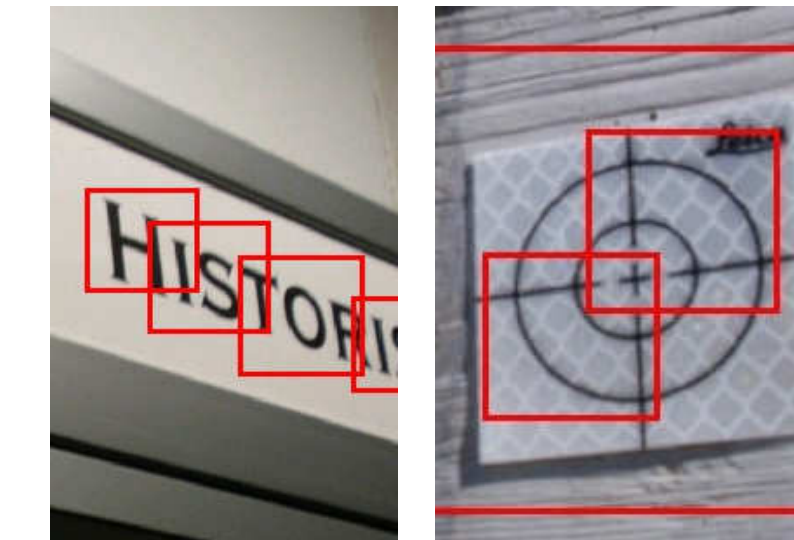
Falsche Detektionen konnten weitgehend dadurch eliminiert werden, als dass ihre Wahrscheinlichkeit für die Richtigkeit der Detektion im SVM-Klassifikator meist viel tiefer lag. Als Rangliste betrachtet, hatte in allen Klassen (mit Ausnahme der Hauskanten) die richtige Detektion jeweils in mindestens 75% der Bilder die höchste Wahrscheinlichkeit.

Unten stehende Abbildungen zeigen eine Auswahl von Problemen mit teilweise hartnäckigen Verwechslungen sowie andere Schwierigkeiten im Laufe der Arbeit.

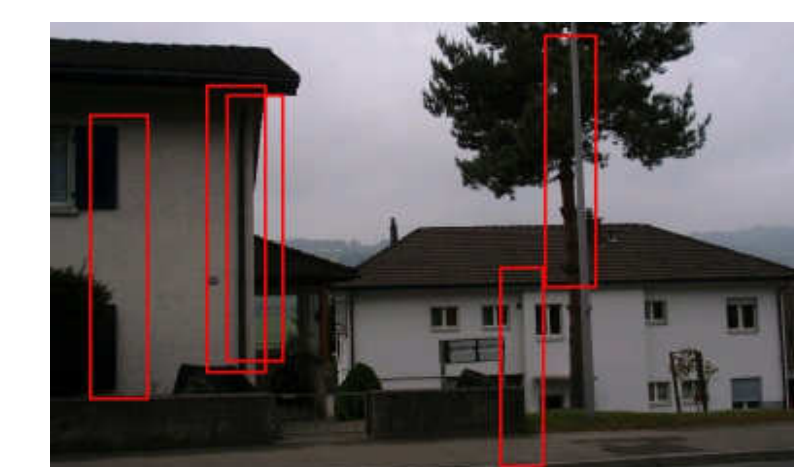


1) Bei schlechten Kontrasten, inhomogenen Hintergründen, grossen Unschärfen oder bei perspektivisch stark verzerrten Objekten hat der Detektor häufig versagt.

2) Verwechslungen mit Verkehrstafeln waren beim Miniprisma das Hauptproblem. Eine Ergänzung des negativen Trainingssets mit solchen Verkehrstafeln führte zu einer Verbesserung, die Sicherheit des Klassifikators wurde aber etwas vermindert.



3) Als anfällig für falsche Detektionen bei der Zielmarke stellten sich vor allem Formen mit klaren Konturen heraus, die an die Zeichnung der Marke erinnerten.



4) Hauskanten wurden häufig mit anderen vertikalen Elementen in Gebäudenähe verwechselt, wie zum Beispiel Strassenlampen, Bäume oder Fensterrahmen.



Abb. 7 Im Falle der Hauskanten trat häufig auch das Problem von **Mehrfachdetektionen** auf (links). Dieses liess sich zwar mit einer in Java programmierten Software-Ergänzung lösen (rechts), brachte jedoch für das Gesamtergebnis nur moderate Verbesserungen mit sich.

Diskussion

Bildbasierte Detektoren eignen sich zur Zielerkennung ...

Die Chancen für eine erfolgreiche Umsetzung im Tachymeter stehen im Falle der ersten drei Klassen gut. Hoffnung macht hierbei auch die mögliche Berücksichtigung von zusätzlichen **Bewertungskriterien** für die Detektionen im Tachymeter, wie die Nähe zum Bildzentrum (aus der Grobanzielung) oder die Objektauflösung im Bild (aus den Abbildungsparametern). Dadurch liesse sich die Anzahl falscher Detektionen und Verwechslungen weiter vermindern. Des Weiteren liefert die im Tachymeter eingebaute On-Axis Kamera für den Detektor teils wesentlich einfachere Bilder, als sie in den Testdurchgängen verwendet wurden. Es wäre also eher mit noch genaueren Detektionen und höheren Erkennungsraten zu rechnen.

... jedoch mit Grenzen bei bestimmten Objekten

Bei den Hauskanten könnte voraussichtlich mit deutlicheren Kontrastunterschieden das Trainingsmaterial allenfalls verbessert werden. Ausserdem liessen sich Kanten, welche mehr als die Hälfte der Bildhöhe einnehmen würden, wesentlich besser von anderen Objekten unterscheiden. Unabhängig von den zu erwartenden Verbesserungen müssten aber hier (und eventuell bei noch nicht getesteten, ähnlichen Klassen) **andere Detektionsverfahren** ausprobiert werden, welche die vertikale Kontinuität der Kante und eventuell auch den räumlichen Kontext besser berücksichtigen.



seit 1558

Cloud removal from multispectral satellite imagery using multifrequency SAR data

Robert Eckardt¹

PROBLEMSTELLUNG

Die Entfernung von Wolken bzw. die Rekonstruktion jeglicher Art von fehlenden Informationen kann als fundamentale Forschungsfrage der Erdbeobachtungswissenschaften angesehen werden. Im Zuge einer stetig wachsenden Verfügbarkeit von multispektralen, hyperspektralen sowie Radar-Satellitensensoren entstehen zahlreiche neue Möglichkeiten der Nutzung dieser komplementären Datenquellen. Unter dieser Prämisse sollte im Rahmen der hier vorgelegten Arbeiten versucht werden, einen Beitrag zur Lösung dieses fundamentalen Problems mithilfe von mikrowellenbasierten Synthetic Aperture Radar (SAR) Daten zu leisten.

Bestehende Methoden zur Wolkenfüllung besitzen meist signifikante Nachteile. Einfache Ersetzungsalgorithmen bzw. Kompositen legen die Annahme zugrunde, dass zwischen dem zu rekonstruierenden Satellitenbild und dem zur Rekonstruktion verwendeten Referenzbild keine Änderung der Landbedeckung stattgefunden hat¹. Interpolation über Zeitserien benötigt eine hohe temporale Auflösung der Daten und eine hinreichende Länge der Zeitserie. Weiterhin sind diese Methoden meist auf einen Sensor und/oder auf bestimmte Landbedeckungstypen beschränkt².

Die Kompensation der erwähnten Nachteile durch einen geeigneten Algorithmus sowie die Rekonstruktion fehlender Informationen durch geeignete Referenzdaten wurden im Rahmen dieser Arbeit untersucht.

DATENGRUNDLAGE

Die 'Goldene Aue' bei Nordhausen befindet sich im Grenz-Bereich zwischen Thüringen und Sachsen-Anhalt. Sie wird durch die Mittelgebirge Harz im Norden, Windleite im Süden und den Kyffhäuser im Südosten begrenzt. Diese Höhenzüge sind von Waldarealen geprägt. Das dazwischenliegende Becken ist durch intensive landwirtschaftliche Nutzung gekennzeichnet. Diese starke Heterogenität und Komplexität machen die Goldene Aue zu einem geeigneten Untersuchungsgebiet für die experimentelle Bildrekonstruktion.



Ausschnitt des Untersuchungsgebietes © Google Earth

Als multispektraler Datensatz wurde eine *Landsat TM 5 Szene* (2010-07-08) verwendet.

SAR DATEN

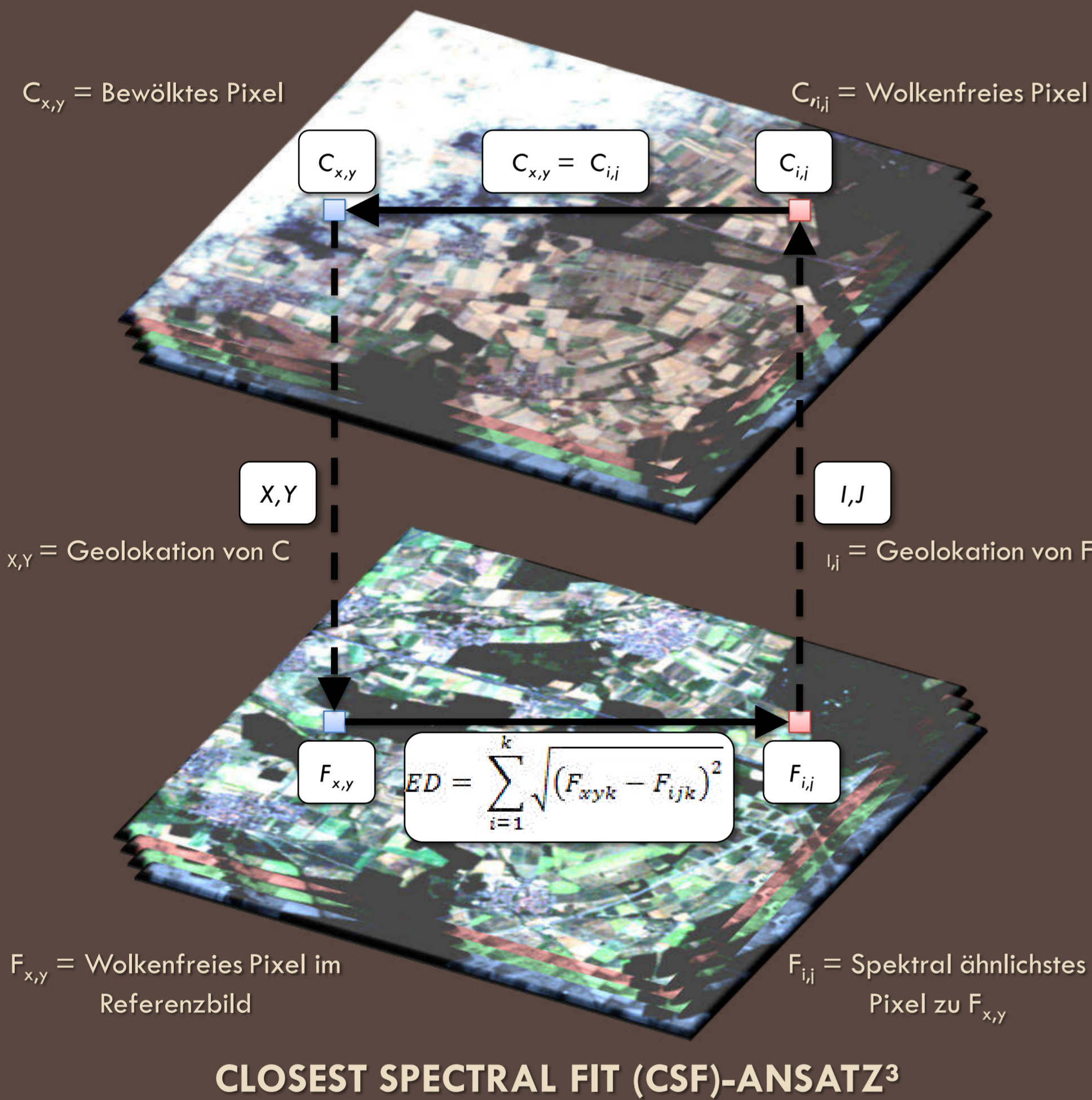
Eigenschaft	TSX	ERS	ALOS
Aufnahmedatum	2010-07-10	2010-06-09	2010-07-09
Modus	SM*	IM**	FBD***
Polarisation	HH/HV	VV	HH/HV
Einfallswinkel	22.13°	23.18°	38.74°
Band Name	X-Band	C-Band	L-Band
Frequenz	9,6 GHz	5,3 GHz	1,27 GHz
Wellenlänge	3 cm	5,6 cm	23,6 cm

ZIELSTELLUNG

Die Rekonstruktion von fehlenden Informationen aufgrund von Wolkenbedeckung wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeiten in einem experimentellen, in sich geschlossenen Rahmenkonstrukt, bestehend aus *Wolkensimulation*, *Wolkenfüllung* mithilfe eines geeigneten Algorithmus sowie einer *statistischen Evaluation* der Rekonstruktionsergebnisse durchgeführt. Hierbei wurden folgende Zielstellungen berücksichtigt:

- Implementierung eines generischen, pixelbasierten Algorithmus zur Wolkenfüllung zur Kompensation der Nachteile anderer Ersetzungs- bzw. Interpolationsalgorithmen.
- Anforderungen an den Algorithmus:
 - Unabhängigkeit vom Aufnahmesensor,
 - Basierend auf physikalischen Beziehungen,
 - Unabhängigkeit von der Landbedeckung,
 - White-Box Ansatz,
 - Erzeugung reproduzierbarer Ergebnisse.
- Etablierung einer Methodik zur statistischen Evaluation der Ergebnisse der Bildrekonstruktion.
- Evaluation des Potentials von mono-temporalen, multi-frequenten SAR-Daten zur Rekonstruktion von fehlenden Informationen innerhalb eines multispektralen Satellitenbildes.

ALGORITHMUS



METHODIK

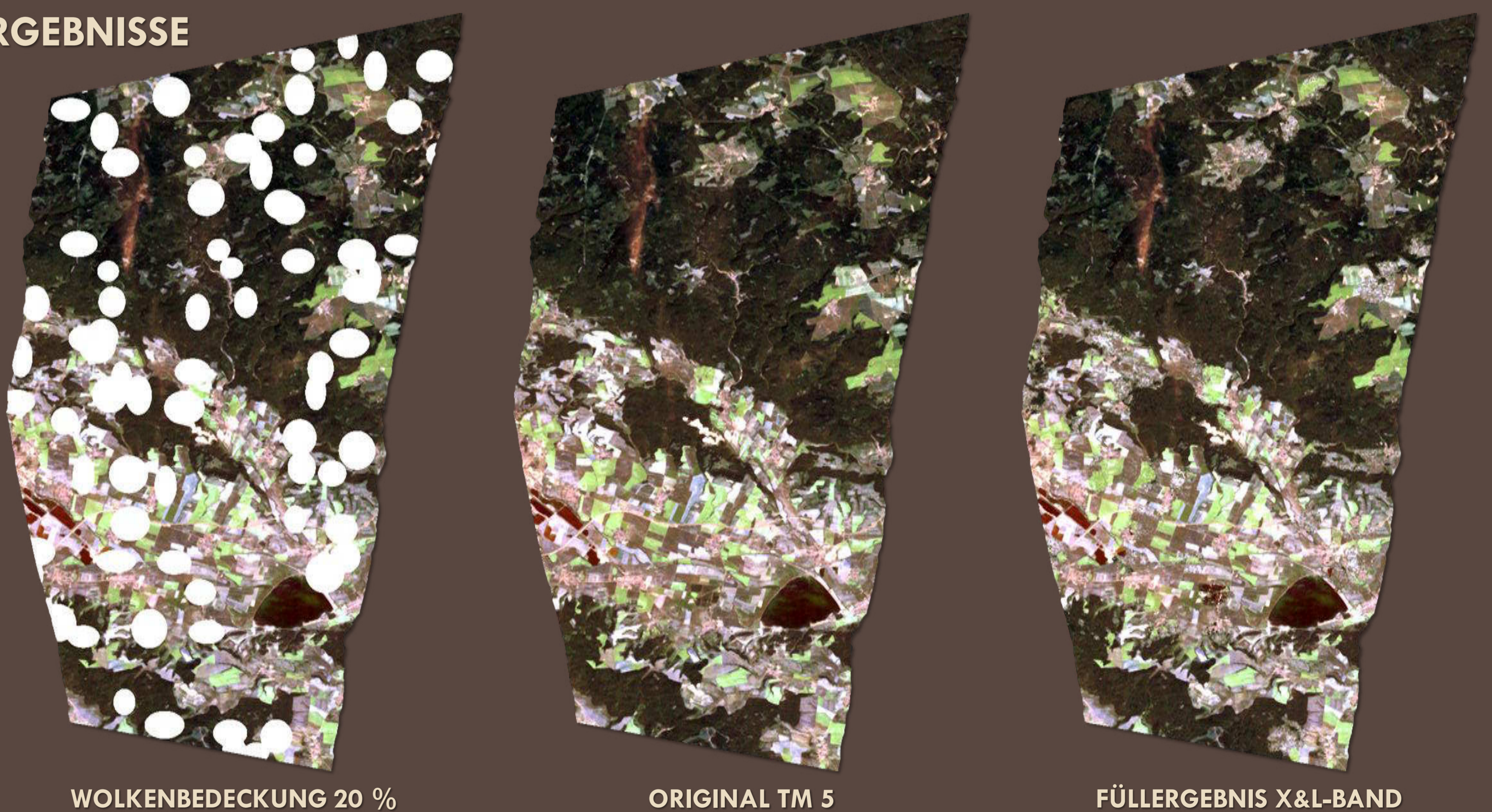


STATISTISCHE EVALUATION

Zur statistischen Evaluation wurden die Maße Mittlere Verzerrung (MB), Differenz der Varianzen (DV), Standardabweichung des Differenzbildes (STD-DI), Korrelationskoeffizient (CC) und der Spektrale Winkel (SAM) verwendet⁴. Die folgende Tabelle zeigt die Resultate der statistischen Evaluation beispielhaft für die TM-Bänder Rot, Grün, Blau und NIR. Das beste Ergebnis wird bei der Füllung mit einer Kombination aus mehreren Frequenzbändern, z.B. X- und L-Band erzielt (vgl. Ergebnisse).

Stat.Maß	Band	X-Band	C-Band	L-Band	XL-Band	XCL-Band
MB_Blau	4	5	3	2	1	1
MB_Grün	4	5	3	2	1	1
MB_Rot	4	5	3	2	1	1
MB_NIR	4	5	3	2	1	1
DV_Blau	4	5	3	2	1	1
DV_Grün	4	5	3	2	1	1
DV_Rot	4	5	2	3	1	1
DV_NIR	4	5	1	2	3	1
STD-DI_Blau	4	5	3	2	1	1
STD-DI_Grün	4	5	3	2	1	1
STD-DI_Rot	4	5	3	2	1	1
STD-DI_NIR	3	5	4	2	1	1
CC_Blau	4	5	3	2	1	1
CC_Grün	4	5	3	2	1	1
CC_Red	4	5	3	2	1	1
CC_NIR	3	5	4	2	1	1
SAM	3	5	4	2	1	1
Rang	4	5	3	2	1	1

ERGEBNISSE



ZUSAMMENFASSUNG

Das experimentelle Rahmenkonstrukt, bestehend aus Wolkensimulation, Wolkenfüllung und statistischer Evaluation der Ergebnisse, ermöglicht eine objektive Bewertung des Potentials der verwendeten SAR-Daten zur Bildrekonstruktion. Demnach bietet vor allem die Verwendung mehrerer Frequenzbänder die Möglichkeit, fehlende multispektrale Informationen zu ersetzen. Die Resultate zeigen in Abhängigkeit vom Landbedeckungstyp sehr gute (Wald) bis befriedigende (urbane Gebiete) Ergebnisse. Die Integration von weiteren SAR-basierten Informationen (z.B. Textur, Kohärenz) indiziert eine weitere Verbesserung der Rekonstruktionsergebnisse.

Der verwendete Algorithmus nivelliert zahlreiche der erarbeiteten Nachteile anderweitiger Techniken. Durch die Unabhängigkeit von radiometrischen Unterschieden, Atmosphärenkorrekturen, Zeitreihen, sensor-spezifischen Eigenschaften, etc. bietet der CSF-Algorithmus eine ernst zu nehmende Alternative auf dem Forschungsgebiet der Wiederherstellung fehlender Informationen in Erdbeobachtungsdaten. Die Rekonstruktion von fehlenden (spektralen) Informationen in Erdbeobachtungsdaten lässt sich über die Füllung von Wolken hinaus auf zahlreiche weitere Bereiche erweitern (z.B. Korrektur von Landsat SLC-Off Fehlern). Die entwickelte Methodik bietet großes Potential für die Untersuchung solcher Problemstellungen.

Kontakt

¹ Friedrich-Schiller-Universität Jena
Institut für Geographie
Lehrstuhl für Fernerkundung
Löbdergraben 32
D-07743 Jena
robert.eckardt@uni-jena.de
Master of Science Geoinformatik

Referenzen

- 1 SOLBERG, A. H. S., JAIN, A. K. & TAXT, T. (1994): Multisource classification of remotely sensed data: fusion of Landsat TM and SAR images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 32(4), 768-778.
- 2 MELGANI, F. (2006): Contextual reconstruction of cloud-contaminated multitemporal multispectral images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44(2), 442-455.
- 3 MENG, Q., BORDERS, B. E., CIESZEWSKI, C. J. & MADDEN, M. (2009): Closest Spectral Fit for Removing Clouds and Cloud Shadows. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 75(5), 569-576.
- 4 BERGER, C., HESE, S. & SCHMULLIUS, C. (2010): Fusion of High Resolution SAR Data and Multispectral Imagery at Pixel Level - A Statistical Comparison. 2nd Joint EARSeL Special Interest Groups Workshop, Ghent, 1-16.



KARL KRAUS-NACHWISCHFÖRDERPREIS 2012
FÜR PHOTOGRAMMETRIE, FERNERKUNDUNG
UND GEOINFORMATIK