

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



Band 14

2005



Vorträge
25. Wissenschaftlich-Technische
Jahrestagung der DGPF



21. – 23. September 2005
in Rostock

GEO-GOVERNMENT
Wirtschaftliche Innovation durch Geodaten

ISSN 0942-2870

Eckhardt Seyfert, Hrsg.

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



Band 14

2005

Vorträge

25. Wissenschaftlich-Technische
Jahrestagung der DGPF

21. – 23. September 2005
in Rostock

GEO-GOVERNMENT ***Wirtschaftliche Innovation durch Geodaten***

ISSN 0942-2870

Eckhardt Seyfert, Hrsg.

ISSN 0942-2870

Publikationen der
Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung
und Geoinformation (DGPF) e.V.
Band 14, 491 S., Potsdam 2005
Hrsg.: Eckhardt Seyfert

© Deutsche Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung
und Geoinformation (DGPF) e.V.
Oldenburg 2005

Zu beziehen durch:

Geschäftsstelle der DGPF
c/o EFTAS GmbH
Ostermarkstraße 92
D-48145 Münster
Tel.: (0251) 133 070, Fax: (0251) 133 0733, E-Mail: klaus.komp@eftas.com

Druck :

Offsetdruckerei Gerhard Weinert
Saalburgstraße 3, 12099 Berlin
Tel.: (030) 600-8620, Fax: (030) 600 86222

Vorwort

Beide Gesellschaften haben sich entschlossen, nach dem gemeinsamen Auftreten 2000 im Rahmen der INTERGEO, erstmals eine gemeinsame Jahresveranstaltung zu organisieren und durchzuführen. Für die Photogrammeter ist es die 25. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF und für die Kartographen der 53. Deutsche Kartographentag. Beide Gesellschaften möchten damit die immer engere Zusammenarbeit, ja teilweise schon vorhandene Verflechtung beider Fachgebiete im Bereich des Geoinformationswesens hervorheben.

Den auf Bundes- und Länderebene allseits anzutreffenden Bestrebungen, Geodaten für Jedermann, unabhängig ob in Wirtschaft, Verwaltung, Forschung oder dem privaten Bereich, nutzbar zu machen und dabei auch neue Medien als Vertriebswege zu nutzen, ist das Motto dieser Veranstaltung gewidmet:

GEO-GOVERNMENT *Wirtschaftliche Innovation durch Geodaten*

Die gemeinsame Jahresveranstaltung wird in Zusammenarbeit mit der Universität Rostock vom 21. bis 23. September 2005 durchgeführt. Der Vorstand dankt der Universität als Mitveranstalterin für die gastfreundliche Aufnahme und die Unterstützung bei der Vorbereitung der Veranstaltung.

Das Zusammentreffen von Photogrammetern mit Kartographen in einer gemeinsamen Tagung hat wieder viele Autoren ermutigt, Beiträge zu Jahrestagung anzumelden. Das belegen die 76 angemeldeten Beiträge aus den Arbeitskreisen. Davon können 56 Beiträge in diesem Band und auf der beigefügten CD veröffentlicht werden. Neben der guten organisatorischen Vorbereitung durch die Arbeitskreisleiter, ist dies hauptsächlich der Verdienst der 148 Autoren, von denen 9 an mehreren Beiträgen mitgewirkt haben.

Ich möchte mich im Namen des Vorstandes der DGPF bei allen Autoren der zum Druck eingereichten Beiträge ausdrücklich bedanken. Ohne ihre Mühe wäre das Erscheine diese 491 Seiten umfassenden Tagungsbandes nicht möglich gewesen.

Mit der örtlichen Vorbereitung haben sich die Kollegen von der Universität Rostock große Mühe gegeben. Der Vorstand der DGPF hofft, dass diese Mühe durch zahlreiche Beteiligung an der Tagung belohnt wird.

Eckhardt Seyfert
Herausgeber

INHALTSVERZEICHNIS

Ausbildung

(Leitung: PD Dr.-Ing. habil. Jochen Schiewe)

SCHIEWE, J.: Kritische Bestandsaufnahme zur Einführung gestufter Studiengänge im Bereich GIS und Geodäsie	11
WIGGENHAGEN, M. & HÖDL, T.: Werkzeuge zur Erstellung interaktiver Lerninhalte .	19
WÄLDER, O.: Wie viel Mathematik braucht ein Ingenieur?	27
GRENDUS, B.: Fernstudienmaterialien Geoinformatik (FerGI) – Erfahrungen, Erkenntnisse und Ausblick	33

Bildanalyse

(Leitung: Prof. Dr.-Ing. Frank Boochs)

TRUMMER, M., SÜßE, H., DENZLER, J. & DITRICH, F.: Metrische 3-D-Vermessung einer Straßenszene mit Spezialwissen unter minimaler Interaktion – Erweiterte monokulare Rekonstruktion	39
DENCHEVA, V. & KRAUS, K.: Genauigkeitsparameter der digitalen Photogrammetrie	47
HELLER, J. & PAKZAD, K.: Automatische auflösungsabhängige Anpassung Variabler Straßenmodelle	57

Geoinformationssysteme

(Leitung: Dr. rer. nat. Thomas H. Kolbe)

MATEJKA, H., BUSCH, W., GORCZYK, J., MAUERSBERGER, F., NICKEL, S., RIEKEBERG, T. & VOSEN, P.: Metadatenkonzepte zur Unterstützung der GIS-Bearbeitung im Monitoring bergbaulicher Umweltauswirkungen	65
NEUMANN, K., HEROLD, M. & SCHMULLIUS, C.: GOFC-GOLD und Initiativen zur Harmonisierung und Validierung von Landbedeckungsdatensätzen	75
MEINEL, G. & HERING, A.: Inwertsetzung von Geobasisdaten für Fachanwendungen am Beispiel der Bodenversiegelungserhebung auf Grundlage des ATKIS Basis-DLM	83
SCHMITTWILKEN, J. & PLÜMER, L.: Dokumentation und Publikation geobotanischer Fachinformationen durch Kopplung von GIS und Content Management Systemen	93

FISLER, A. & WEISENSEE, M.: Geoanalyse von Schwermetalluntersuchungen in einem Versuchsfeld zur Beurteilung von in-situ Sanierungsmethoden ..	101
BACKES, M. & PLÜMER, L.: Präzise Erfassung und Kartierung von Unkräutern mit GIS	109
GOERNER, A., JOLIE, E., & GLOAGUEN, R.: Tectonic induced growth of Lake Beseka (Main Ethiopian Rift)	117
BÖHME, B., STEINBRUCH, F., GLOAGUEN, R., MERKEL, B. & HEILMEIER, H.: Geo- ecology of the Lake Urema / Central Mazambique	125

Internationale Standardisierung (Leitung: Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Kresse)

HOHM, M.: Erzeugung simulierter Bilddaten für die photogrammetrische Blockausgleichung am Beispiel von JBlock-Builder (JBB)	139
DÖRSTEL, C. & SCHWEBEL, R.: Qualitätsstandards für photogrammetrische Produkte und deren Umsetzung	149
KRESSE, W.: Neues von ISO/TC 211 und vom Open Geospatial Consortium ...	155

Interpretation von Fernerkundungsdaten (Leitung: Dr. Horst Weichert)

KRELLENBERG, K.: Vergleich pixel- und objektorientierter Methoden zur Analyse städtischer Grünanlagen	161
WEIDNER, U., LEMP, D., VOSKAMP, M., ABBT-BRAUN, G., BÄHR, H.-P. & FRIMMEL, F.H.: Anwendung von Fernerkundungsmethoden zur Schadstoffbilanzierung in urbanen Gebieten	169
BRUNN, A., SCHÄFER, M. & FISCHER, C.: Untersuchungen zur Aktualisierung topographischer Datenbestände durch multitemporale Auswertungen von IKONOS-Daten	179
KLEINSCHMIT, B. & COENRADIE, B.: Kartierung von Trockenheitsfolgeschäden mit hochauflösenden Satellitenbilddaten	189
HESE, S. & SCHMULLIUS, C.: Object Oriented Deforestation Mapping in Siberia – Results from the SIBERIA-II Project	199
EHLERS, M., MICHEL, U., BOHMANN, G. & TOMOWSKI, D.: Entscheidungsbasierte Datenfusion von multisensoralen Fernerkundungsdaten zur Erkennung von Siedlungsgebieten	209
BELLMANN, A. & HELLWICH, O.: Sensor and Data Fusion Contest: Comparision of Visual Analysis between SAR- and Optical Sensors	217

BUSCHMANN, A. & KLEINN, C.: Fernerkundungsgestützte Habitateignungsmodellierung für den Rotmilan mit Hilfe eines empirischen Ansatzes	225
FUCHS, H.-J., FRICKE, U., MAGDON, P., PADBERG, D., SIEWERT, M. & BÖTTCHER, K.: Untersuchungen zur Eignung der digitalen Luftbildkamera Vexcel UltraCamD für forstliche und landschaftsökologische Anwendungen	233
KLEINN, C., KUNTH, S., EXNER, T. & SCHEIBLER, U.: Erfassung von Veränderungen der Gehölzstrukturen (1979-1999) im Offenlandbereich der Stadt Göttingen mittels Luftbildern und Felderhebungen	243
MÖLLER, M. & BLASCHKE, T.: Urbanes Grün – Erfassung, Analyse und Bewertung aus Fernerkundungsdaten	249

Nahbereichsphotogrammetrie

(Leitung: Prof. Dr.-Ing. Heinz-Jürgen Przybilla)

GODDING, R.: Integration aktueller Kamerasensorik in optischen Messsystemen	255
RIEKE-ZAPP, D., OLDANI, A. & PEIPE, J.: Eine neue, hochauflösende Mittelformatkamera für die digitale Nahbereichsphotogrammetrie	263
LÄBE, T. & FÖRSTNER, W.: Erfahrungen mit einem neuen vollautomatischen Verfahren zur Orientierung digitaler Bilder	271
WOLF, B.-M. & ROLAND, M.: Aktive Konturen für die automatische Messung von natürlichen Punkten bei industriellen Anwendungen	279
MULSOW, C.: Realisierung eines aktiven bildbasierten Messsystems zur Messung auf bewegten spiegelnden Oberflächen	285
TECKLENBURG, W., JANTOS, R. & LUHMANN, T.: Untersuchungen zur Nutzung von Bildclustern für die 2D/3D-Auswertung von fast ebenen Aufnahmesituationen aus erhöhten Aufnahmestandpunkten	293
MAAS, H.-G., DIETRICH, R., SCHWALBE, E., BÄBLER, M. & WESTFELD, P.: Photogrammetrische Bestimmung räumlich-zeitlich aufgelöster Bewegungsfelder am Jakobshavn Isbræ	301
KERSTEN, T.P., STERNBERG, H. & STIEMER, E.: Terrestrisches 3D-Laserscanning im Hamburger Rathaus – Mensi GS100 und IMAGER 5003 im Vergleich .	309
HASTEDT, H., LUHMANN, T. & TECKLENBURG, W.: Simulationsbasiertes Systemdesign für die optische Messtechnik nach VDI/VDE 2634	319
PRZYBILLA, H.-J. & PEIPE, J.: Vergleich digitaler Aufnahmesysteme am Beispiel der Formkontrolle industrieller Bauteile	327
MARTIENßEN, T.: Ein Beitrag zur Georeferenzierung der mit Laserscannern erzeugten Punktwolken	335

Fernerkundung in der Geologie

(Leitung: Dr. Hans-Ullrich Wetzel)

WETZEL, H.-U., REIGBER, A., RICHTER, A. & MICHAJLJOW, W.: Gletschermonitoring und Gletscherseebrüche am Inyltschik (Zentraler Tianshan) – Interpretation mit optischen und Radarsatelliten	341
MÜNZER, U., SCHARRER, K. & GUDMUNDSSON, Á.: Near Real Time Überwachung des subglazialen Grímsvötn-Vulkanausbruchs Nov. 2004 auf Island mit ENVISAT-ASAR Daten	351
THEILEN-WILLIGE, B.: Remote Sensing and GIS Contribution to Tsunami Risk Detection	363
TWARZ, C., GLOAGUEN, R. & RATSCHBACHER, L.: Active tectonics of the Pamirs: Inferences from remote sensing analysis of stream profiles and geomorphology	377
KURZ, T., GLOAGUEN, R., EBINGER, C., CASEY, M. & ABEBE, B.: Deformation distribution and type in the Main Ethiopian Rift (MER); a remote sensing study	387
MÜLLER, F., GLOAGUEN, R., HILDNER, E., SCHMINCKE, H.-U. & SUMITA, M.: Volcano-tectonic evolution of the Miocene Montaña Horgazales complex, SW-Gran Canaria: GIS & remote sensing analysis	399
ROTH, J. & PRINZ, T.: Laguna Beach – Einsatzmöglichkeiten digitaler Höhenmodelle aus Fernerkundungsdaten für die geologische Interpretation zeitabhängiger tektonomorphologischer Oberflächenformen	407
MUNIER, K., BURGER, H. & LEVENHAGEN, J.: Fernerkundungs- und GIS-Applikationen zur Datenpräsentation und -analyse im SFB 267 , Deformationsprozesse in den Anden'	417
BALLATO, P., MARCANO, G., WETZEL, H.-U., MUTTI, M., HAGEN, M. & BETZLER, C.: Remote surface mapping of synrift deposits in North Sardinia, Italy	425

Sensoren und Plattformen

(Leitung: Dr. Rainer Sandau)

HOFMANN, O.: Kalibrierung und Georeferenzierung photogrammetrischer Aufnahmen	433
ECKARDT, A., WALTER, I. & SCHUSTER, R.: Neue Generation einer 360° Panoramakamera	439
GWINNER, K., SCHOLTEN, F., SPIEGEL, M., SCHMIDT, R., GIESE, B., OBERST, J., JAUMANN, R. & NEUKUM, G.: Hochauflösende Digitale Geländemodelle der Marsoberfläche auf der Grundlage von Mars Express HRSC Daten ..	447

OERTEL, D., HALLE, W., LORENZ, E., SKRBEK, W., VENUS, H., WALTER, I., ZHUKOV, B. & WOOSTER, M.: BIRD – Wegbereiter für das zukünftige IR Element der ESA	453
BAUMANN, F., BRIEß, K. & KAYAL, H.: Drei-Achsen-stabilisierte Picosatelliten- plattform für Fernerkundungsaufgaben	461
JACOBSEN, K.: Vergleich der Orientierungsverfahren für Weltraumaufnahmen ..	467
KRUCK, E.: Simultankalibrierung digitaler Luftbildkameras	475
Autorenverzeichnis	483

Kritische Bestandsaufnahme zur Einführung gestufter Studiengänge im Bereich GIS und Geodäsie

JOCHEN SCHIEWE¹

Zusammenfassung: Aufbauend auf der Darstellung der Grundlagen des Bologna-Prozesses sowie der Vorgaben für die Konzeption von Bachelor- und Masterstudiengängen verfolgt dieser Beitrag zwei Ziele: Zum einen soll der aktuelle Stand bei der Einführung der gestuften Abschlüsse im Bereich GIS im Jahr 2005 dargestellt werden, zum anderen soll daraus eine kritische Bewertung abgeleitet werden. Diese orientiert sich an den generellen Zielen der Bologna-Erklärung – speziell an den Aspekten Vergleichbarkeit der Angebote, Mobilität, Berufsqualifizierung und Studiendauer.

1 Einleitung

Im Rahmen der 1999 ratifizierten „Bologna-Erklärung“ wird u.a. eine Angleichung der Bildungsabschlüsse im europäischen Raum verfolgt. Mit der Einführung zweistufiger Studienabschlüsse (Bachelor und Master) nach dem anglo-amerikanischen Vorbild vollzieht sich derzeit auch in der deutschen Hochschulausbildung ein tiefgreifender Strukturwandel.

Da der Start der Reform zunächst nur von der Politik geprägt wurde und in vielen Disziplinen – so auch der Geodäsie – die Bereitschaft zur Abkehr von den (inter-)national hoch angesehenen Diplom-Studiengängen gering ausgeprägt war, stieß der Prozess von Anfang an auf Skepsis und Widerstände. Letztlich hat der übergeordnete politische Wille aber einen unumkehrbaren Prozess in Gang gesetzt, sodass bereits eine bedeutende Anzahl von Bachelor- und Master-Studiengängen im Bereich GIS existieren bzw. viele weitere derzeit in der Planung sind.

Aufbauend auf der Darstellung der Grundlagen des Bologna-Prozesses sowie der Vorgaben für die Konzeption von Bachelor- und Masterstudiengängen (Abschnitt 2) verfolgt dieser Beitrag zwei Ziele: Zum einen soll der aktuelle Stand bei der Einführung der gestuften Abschlüsse im Bereich GIS im Jahr 2005 dargestellt werden (Abschnitt 3), zum anderen soll daraus eine kritische Bewertung erfolgen (Abschnitt 4).

2 Hintergrund

2.1 Bologna-Prozess

Die 1999 von 29 europäischen Bildungsministern beschlossene „Bologna-Erklärung“, die durch Folgekonferenzen in Prag (2001), Berlin (2003) und Bergen (2005) konkretisiert wurde, sieht im Kern die Schaffung eines europäischen Hochschulraumes bis zum Jahr 2010 vor. In Deutschland wurden diese Ziele durch Novellierungen des Hochschulrahmengesetzes (1998, 2002) formal anerkannt. Zur Schaffung dieses europäischen Hochschulraumes wurden im Wesentlichen die folgenden Maßnahmen beschlossen:

¹ PD Dr.-Ing. Jochen Schiewe, Universität Bonn, Institut für Kartographie und Geoinformation (bis 30.09.2005) bzw. Universität Osnabrück, Institut für Geoinformatik und Fernerkundung (ab 01.10.2005). E-Mail: jschiewe@fzg.uni-osnabrueck.de

1. Herstellung eines Systems mit vergleichbaren Studienabschlüssen – hier erfolgt in Anlehnung an das anglo-amerikanische Vorbild die Einführung eines zweistufigen Modells (Bachelor und Master). Dies soll einhergehen mit der Förderung der europäischen Zusammenarbeit bei der Curriculum-Entwicklung, Qualitätssicherung, des Austausches zwischen Studierenden und Dozenten, usw.
2. Förderung der Mobilität, insbesondere durch Einführung eines einheitlichen Leistungspunktesystems (European Credit Transfer Point System, ECTS).
3. Stärkere Ausrichtung der Studiengänge auf die „Beschäftigungsfähigkeit“ („employability“) der Absolventen.

2.2 Vorgaben für gestufte Studiengänge

Forciert durch die politischen Vorgaben steht die Einführung der gestuften Studiengänge im Fokus der aktuellen Entwicklungen. Hierzu hat die Kultusministerkonferenz im Jahr 2003 generelle Vorgaben definiert. Demnach soll der Bachelor eine allgemeine Berufsqualifizierung, der Master einer (inter-)disziplinäre Spezialisierung verfolgen. Je nach Gebiet werden primär die Abschlüsse Bachelor bzw. Master of „Science“ (Natur- und Ingenieurwissenschaften, evtl. Wirtschaftswissenschaften) oder „Arts“ (z.B. Sozialwissenschaften) verliehen. Einen Sonderfall stellen noch die weiterbildenden Master-Studiengänge dar, die neben einem qualifizierten Hochschulabschluss auch eine berufspraktische Tätigkeit von i.d.R. nicht unter einem Jahr voraussetzen, an die im Studium angeknüpft werden soll.

Der **Umfang** des Bachelor-Studiums soll nach den Vorgaben zwischen 6 und 8 Semester (Regelfall: 6), der des Masters zwischen 2 und 4 Semester (Regelfall: 4) betragen. Konsekutive, d.h. inhaltlich eng aufeinander aufbauende Studiengänge, dürfen nicht länger als 10 Semester dauern.

Zur Vergleichbarkeit werden anstelle der „Semesterwochenstunden (SWS)“ **Leistungspunkte** (LP; engl.: credit points, CP) gemäß des European Credit Transfer Point System (ECTS) verwendet, die den gesamten, tatsächlichen Arbeitsaufwand der Studierenden für Veranstaltungen beschreiben sollen (Präsenzzeiten, Vor- und Nachbereitung, Prüfungsvorbereitung, Prüfung etc.). Dabei entspricht ein Leistungspunkt ca. 30 Arbeitsstunden (sehr grobe Faustformel: 2 SWS entsprechen 3 LP). Grundsätzlich sollen in den Studiengängen pro Semester 30 Leistungspunkte erbracht werden. Geht man von 52 Jahreswochen sowie 4 Wochen Urlaub aus, ergibt sich damit für das reine Studium eine Arbeitszeit von 37.5 Stunden pro Woche.

Eine weitere Maßnahme zur besseren Vergleichbarkeit der Abschlüsse ist die Vergabe sogenannter **„Diploma Supplements“** als Anhang zu den Zeugnissen, in denen der jeweilige Abschluss und die damit verbundenen Qualifikationen näher beschrieben werden sollen.

Aus Gründen der Mobilität und Austauschbarkeit erfolgt eine starke **Modularisierung** der Studieninhalte. Ein Modul als ein thematisch und zeitlich zusammenhängender Baustein besteht aus ein oder mehreren Einzelveranstaltungen, die sich maximal über zwei Semester erstrecken und deren Umfang zwischen 5 und 15 Leistungspunkte beträgt. Zentrale Maßnahme zur Einhaltung der vorgesehenen Studienzeiten sind studienbegleitende Prüfungen (jeweils eine pro Modul direkt im Anschluss an die Veranstaltungen).

Die Sicherung der Qualität der Studienangebote erfolgt durch eine **Akkreditierung** sowie eine Evaluation nach einem kompletten Durchlauf des Studienganges (z.B. nach Regelstudienzeit plus zwei Semester). Die Akkreditierung kann keinen Qualitätsnachweis darstellen, sondern nur eine Reihe formaler bzw. überfachlicher Aspekte überprüfen, insbesondere:

- Bedarf an Absolventen auf dem Arbeitsmarkt,
- Ausbildungsziele,
- Eingangsvoraussetzungen,
- curriculare Anforderungen und Studiumumfang,
- institutionelles und organisatorisches Umfeld sowie
- Maßnahmen zur Qualitätssicherung.

Die Akkreditierung erfolgt durch interdisziplinäre Bewertungsteams verschiedener Agenturen (z.B. AQRAS, ASIIN, ZeVA) und kostet pro (konsekutivem) Studiengang ca. 12.000 €

Weitere Informationen zu den Vorgaben für die gestuften Studiengänge mit GIS-Anteil können z.B. bei KLEUSBERG (2005), WEHMANN & HAHN (2003) oder SCHMIEDECKEN (2004) nachgelesen werden.

3 Status der Einführung

3.1 Genereller Stand

Nach Aussage der Kultusministerkonferenz (KMK) wurden im Sommersemester 2005 rund 2900 Bachelor- oder Masterstudiengänge angeboten. Die meisten Studienanfänger entfielen auf die Fächer Informatik, Betriebswirtschaftslehre sowie Interdisziplinäre Studien (Schwerpunkt Sprach- und Kulturwissenschaften). Laut KMK sind die Zahlen der Studierendenanfänger mit einem gestuften Abschluss relativ gesehen zwar stark steigend, im absoluten Vergleich zu herkömmlichen Studiengängen wie Diplom, Magister und Staatsexamen aber noch niedrig.

3.2 Bestandsaufnahme für Studiengänge mit GIS-Anteil

Nach BILL (2005) konnten im April 2005 im deutschsprachigen Bereich 346 GIS-Studienangebote in 25 verschiedenen Studiengängen identifiziert werden (siehe auch <http://www.geoinformatik.uni-rostock.de>). Hinsichtlich der Zuordnung zu Fachrichtungen lässt sich zum einen die Dominanz der Geographie konstatieren, zum anderen hat sich eine starke Diversifizierung mit unterschiedlichen Umfängen sowie Ausrichtungen (Grundlagen- vs. Anwendungs-Orientierung) ergeben. GIS hat sich inzwischen als ein fester Bestandteil vieler Studiengänge wie Landschaftsplanung, Umweltwissenschaften, Agrar- und Forstwissenschaften etabliert.

Von den 346 **Angeboten** werden 246 an Universitäten und 100 an Fachhochschulen angeboten. 49 Angebote lassen sich in die Kategorie der Aufbaustudiengänge einordnen, 11 sind als Fernstudiengänge konzipiert worden. Der häufigste Abschluss von Studienangeboten mit anteiliger Lehre zu GIS ist noch das Diplom (153 an Universitäten, 53 an Fachhochschulen), während Bachelor (41) und Master (48) zwar stark angestiegen sind, absolut gesehen aber noch deutlich in der Minderheit sind. Folgende Bachelor- und Master-Angebote mit einem (traditionellen) Schwerpunkt in der GIS-Ausbildung existieren bereits (jeweils nach Ortsnamen alphabetisch sortiert; Stand April 2005):

- Bachelor
 - Vermessungswesen (HS Anhalt)
 - Vermessung und Geoinformation (FB beider Basel)
 - Bauingenieurwesen und Geodäsie (TU Darmstadt)

- Geoinformation und Kommunaltechnik (FH Frankfurt)
- Geomatics Engineering (TU Graz)
- Kartographie und Geomatik (FH Karlsruhe)
- Vermessung und Geoinformatik (FHT Stuttgart)
- Informationstechnik: Geoinformatik (FH Wiener Neustadt)
- Master
 - GIS (Universität Bonn)
 - Geodäsie und Geoinformation (TU Darmstadt)
 - Geomatik (FH Karlsruhe)
 - Geomatik – berufsbegleitend (FH Mainz)
 - Geographical Information Science & Systems (UNIGIS Salzburg)
 - Vermessung und Geoinformatik (FHT Stuttgart)
 - Photogrammetry and Geoinformatics (FHT Stuttgart)

Daneben existieren bereits Bachelor- oder Master-Studiengänge mit einem signifikanten GIS-Anteil in der Geographie (z.B. an der HU Berlin – siehe DRANSCH & HOSTERT, 2005), Raumplanung (z.B. an der Universität Dortmund – siehe GRIMM ET AL., 2005), Landschaftsentwicklung, Regionalplanung & Landschaftsarchitektur, Bodennutzung-Bodenschutz, Landwirtschaft, Management im Landschaftsbau (z.B. an der FH Osnabrück – siehe KLÄRLE, 2005) oder Bauingenieurwesen (z.B. an der Universität Siegen – siehe JAROSCH, 2005). Explizite interdisziplinäre Ansätze wie der Master-Studiengang GIS an der Universität Bonn (PLÜMER & VOB, 2005), der aus den Disziplinen Geodäsie, Geographie und Informatik gespeist wird, existieren dagegen kaum. Ebenso stellen englischsprachige Angebote eine große Ausnahme dar (Beispiel: Master für Photogrammetry and Geoinformatics an der FHT Stuttgart – siehe SCHRÖDER & HAHN, 2005).

Die Variabilität der Angebote wird auch durch die unterschiedlichen **Namensgebungen** deutlich. Allein innerhalb der Geodäsie gibt es folgende Bezeichnungen für Diplom-, Bachelor- oder Master-Studiengänge:

- Universitäten
 - Bauingenieurwesen und Geodäsie
 - Vermessungswesen
 - Geodäsie und Geoinformatik
 - Geodäsie und Geoinformation
- FH
 - Vermessung und Geoinformation
 - Vermessungswesen
 - Vermessung / Geomatik
 - Vermessung und Geoinformatik
 - Photogrammetry and Geoinformatics

Eine wichtige Besonderheit im Kontext der Geodäsie-Ausbildung ist die Regelung zur **Zulassung zum Höheren Öffentlichen Verwaltungsdienst**. Grundsätzlich soll diese individuell bei der Akkreditierung für Master-Studiengänge geregelt werden. Notwendige einheitliche Vorgaben werden noch von der Arbeitsgemeinschaft der deutschen Vermessungsverwaltungen (AdV) erarbeitet. Derzeit deutet sich die Tendenz an, dass ein universitärer Master mit einem geodätischen Schwerpunkt (und dem Begriff Geodäsie oder Vermessungswesen im Namen) für den Zugang notwendig ist. Master-Absolventen von Fachhochschulen sind demnach weiterhin vom Höheren Dienst ausgenommen.

Ebenfalls gibt es noch keine einheitlichen Richtlinien zur **Zulassung** zu den Bachelor- und Masterstudiengängen, die prinzipiell von den jeweiligen Hochschulen geregelt werden können. Breites Einvernehmen herrscht darüber, dass zur Zulassung eines Promotionsstudiums ein universitärer Master notwendig ist.

Zusammenfassend lassen sich zum Zeitpunkt des Sommersemesters 2005 folgende Tendenzen festhalten:

- Die Anzahl von Bachelor- und Masterstudiengängen mit GIS-Anteilen steigt stark an. Viele weitere Angebote sind in der Planung, sodass mit Beginn der Wintersemester 2005/06 und 2006/07 weitere, sprunghafte Anstiege zu erwarten sind.
- Eine standortübergreifende Koordination bei den Planungen der Studiengänge ist kaum erkennbar. Anstelle einer Vereinheitlichung kann selbst bei den traditionell ähnlich konzipierten Geodäsie-Studiengängen eine stärkere Diversifizierung hinsichtlich Namensgebungen und inhaltlichen Schwerpunkten beobachtet werden. Die klassische Trennung zwischen Universitäts- und Fachhochschul-Studiengängen verschwimmt immer mehr.
- Inzwischen ist die GIS-Ausbildung Bestandteil einer großen Anzahl von Studiengängen geworden. Diese breite, interdisziplinäre Ausrichtung lässt sich aber sicherlich noch ausbauen (z.B. in die Wirtschaftswissenschaften oder die Medizin hinein).

4 Bewertung des Status Quo

Eine Bewertung des Erfolges bei der Einführung von gestuften GIS-Studiengängen sollte sich an den generellen Zielen der Bologna-Erklärung orientieren (siehe Abschnitt 2.1). Daher werden in den folgenden Teilabschnitten auch die Aspekte der Vergleichbarkeit, Mobilität, Berufsqualifizierung und Studiendauer näher betrachtet. Vorweg sollte aber auch schon festgehalten werden, dass diese Bewertung nur eine bedingte Aussagekraft haben kann, da erst relativ wenige Bachelor- und Master-Studienangebote existieren oder gar schon Absolventen hervorgebracht haben. Erste fächerübergreifende, empirische Ergebnisse sind z.B. bei SCHWARZ-HAHN & REHBURG (2004) dargestellt.

4.1 Vergleichbarkeit der Angebote und Abschlüsse

Aus der Beschreibung der aktuellen Studienangebote mit GIS-Anteil wurde schon deutlich, dass die gestuften Angebote zwar eine formale internationale Angleichung bewirken, aus inhaltlicher Sicht sich aber eine deutliche Steigerung der Variabilität abzeichnet. Dies wird nicht zuletzt durch die Varianz der neuen Studiengangsbezeichnungen (siehe Abschnitt 3.2) deutlich. Die standortspezifischen Ausprägungen („Bildung von Alleinstellungsmerkmalen“) und der damit verbundene Wettbewerb unter den Hochschulen wird politisch explizit gefordert, steht aber den Bestrebungen nach Vergleichbarkeit diametral gegenüber. Diese Tendenz wird durch die Aufweichung der Unterschiede zwischen Universitäten und Fachhochschulen noch weiter forciert.

Andererseits ist eine Vergleichbarkeit der Studienangebote sowohl für die Studienwahl, einen Hochschulwechsel (bzw. die Mobilität, siehe Abschnitt 4.2) und insbesondere für die Abnehmer aus Wirtschaft und Verwaltung zu einem hohen Grad notwendig. So wird wohl künftig wie in Nordamerika oder Großbritannien der Zusatz der Hochschule zum Abschlussgrad (z.B. „B.Sc. University of Fredericton“) eine Selbstverständlichkeit bzw. ein Qualitätsmerkmal darstellen müssen. Mit dem Wettbewerb unter den Universitäten wird auch eine aktivere Außenbearbeitung der Hochschulen notwendig sein.

4.2 Förderung der Mobilität

Eng verbunden mit der Vergleichbarkeit der Studienangebote auf internationalem Niveau ist der Aspekt der geforderten Mobilität. Grundlage hierfür muss die **Anerkennung** von gleichnamigen Abschlüssen aus dem Ausland sein. In diesem Zusammenhang sorgen in regelmäßiger Folge Meldungen aus den USA oder Großbritannien für große Unruhe, nach denen die Anerkennung deutscher oder europäischer Abschlüsse kategorisch abgelehnt wird. GRIGAT (2005) führt für den Fall Großbritannien als Ursachen hierfür das grundsätzlich geringe Interesse am Bologna-Prozess bzw. dem Wettbewerbsgedanken sowie die unterschiedlichen Strukturen der Studienangebote an.

Während sich die starke **Modularisierung** der Studieninhalte grundsätzlich positiv auf die Mobilität auswirken müsste, stellt in diesem Kontext die starke Verschulung sowie hohe stoffliche Dichte insbesondere in den Bachelor-Angeboten ein Problem dar. Ein „Aussetzen“ für ein Semester zugunsten eines **Auslandsaufenthaltes** bewirkt demnach automatisch eine Verlängerung des Studiums um mindestens ein halbes Jahr, wenn nicht gar um ein ganzes Jahr. Die Verantwortlichen entsprechender Austauschprogramme (z.B. Sokrates) gehen daher auch von einem künftig deutlichen Rückgang der Nachfrage seitens der Studierenden aus.

4.3 Berufsqualifizierung

Auch hinsichtlich der Berufsqualifizierung („employability“) gibt es noch große Unsicherheiten – sowohl auf Seiten der Auszubildenden, als auch auf Seiten der abnehmenden Institutionen.

Breites Einvernehmen herrscht darüber, dass das auf fünf Jahre angelegte **Master-Studium** an Universitäten ungefähr dem universitären Diplom-Abschluss gleichzusetzen ist. Dies drückt sich auch in der gegenwärtigen Tendenz zur Zulassung zum Höheren Öffentlichen Verwaltungsdienst aus (siehe Abschnitt 3.2). Dagegen ist die Qualifizierung und Einordnung von Absolventen eines Masterstudiums an Fachhochschulen nicht nur in den öffentlichen Dienst, sondern auch in privatwirtschaftliche Unternehmen als unscharf anzusehen.

Noch unsicherer ist, wie sich öffentliche Verwaltung und Privatwirtschaft auf Absolventen eines auf ein 3 Jahre begrenzten **Bachelor-Studiums** einstellen werden. STEEDMAN & WAGNER (2005) weisen darauf hin, dass das geringere Qualifikationsniveau im Vergleich zum traditionellen Diplom „erhebliche Umwälzungen im deutschen Ausbildungs- und Wirtschaftssystem zur Folge haben“ kann. Basierend auf einer Studie des Stifterverbandes für die Deutsche Wissenschaft berichtet GRIGAT (2005), dass nach bisherigen Erfahrungen in der Automobil- oder Bauindustrie Bachelor-Absolventen sehr breite Einsatzbereiche gefunden haben und ihr Gehaltsgefüge dem von Absolventen bisheriger Fachhochschulen oder Berufsakademien entspricht. Dies deckt sich nach STEEDMAN & WAGNER (2005) mit Erfahrungen aus Großbritannien, wo Unternehmen sehr flexibel (z.B. auch Absolventen anderer Fachrichtungen) einstellen, allerdings im Vergleich zu Deutschland auch ca. 30 Prozent geringere Einstiegsgehälter zahlen.

Speziell für den Bereich der Absolventen in einem Fach mit (hohem) GIS-Bezug erscheint der Berufsmarkt für Bachelor-Absolventen noch sehr unscharf bzw. unterentwickelt. Dies ist sicherlich auch die Folge davon, dass die meisten Studiengangsplanungen ad hoc und nur mit sehr geringer Einbeziehung von abnehmenden Institutionen erfolgten. Ob die Akkreditierungsagenturen die Definition und Überwachung der Berufsbefähigung in ausreichendem Maße übernehmen können, muss sich noch zeigen.

Da einige Bundesländer eine Quotierung beim Zugang zu Master-Studiengängen vorsehen wollen, werden viele Studierende von einer Fortführung zum Master abgehalten werden, so-

dass schon in Kürze ein hoher Ausstoß von Bachelor-Absolventen auf den Arbeitsmarkt zu erwarten ist. Als Folge der unsicheren Situation befürchtet der Zusammenschluss der Technischen Universitäten „TU 9“, dass das Ingenieurstudium unattraktiver werden wird und sich der Mangel an Ingenieuren in Deutschland noch verschärfen werde.

Im Kontext der Berufsqualifizierung ist auch zu beobachten, dass bei vielen Studiengangsplannungen die Integration von **Praktika** einen geringeren Stellenwert als früher einnimmt. Diese aus Sicht der abnehmenden Institutionen bedauerliche Tendenz ist – genauso wie der befürchtete Rückgang der Mobilität (siehe Abschnitt 4.2) – auf die straffere Organisation und Verschulung der Studiengänge zurückzuführen.

4.4 Studiendauer

Deutsche gelten im internationalen Vergleich bislang als Langzeitstudierende. Die durchschnittliche Studiendauer der Absolventen des Jahrgangs 2002 über alle Fächergruppen hinweg betrug an Universitäten 6,8 Jahre sowie an Fachhochschulen 5,4 Jahre. Ein Ziel bei der Einführung der gestuften Studiengänge ist es daher auch, den Abschluss nach den Regelstudienzeiten zu forcieren.

Grundsätzlich werden die Hochschulen durch eine Reihe von Vorgaben zu einer strafferen **Strukturierung** („Verschulung“) des Studiums gezwungen, z.B. durch die Einführung studienbegleitender Prüfungen. Nach einer internationalen Vergleichsstudie der Hochschul-Informationen-System GmbH (HIS) sind allerdings noch weitere flankierende Maßnahmen wie Studienberatung oder Hochschul- und Studienfinanzierung nötig, um die Verkürzung der Studiendauer tatsächlich zu gewährleisten. Insbesondere sei noch ein breiteres Angebot an Teilzeitstudiengängen nötig, um Alleinerziehenden und Erwerbstätigen die Chance auf einen Abschluss zu ermöglichen.

Die Einführung von **Studiengebühren** wird generell als weiteres Druckmittel für das studentische Bemühen um ein kürzeres Studium angesehen. Allerdings ist das Stipendienwesen in Deutschland im internationalen Vergleich noch unterentwickelt, sodass für viele Studierende auch der Zwang zu studienzeitverlängernden Nebentätigkeiten entsteht.

5 Zusammenfassende Bewertung und Ausblick

Die grundlegenden Ideen bei der Einführung der gestuften Studiengänge – eine internationale Angleichung von Studienabschlüssen, eine Erhöhung von Berufsqualifizierung und Mobilität sowie eine Reduktion von Studienzeiten – sind ausdrücklich zu begrüßen. Auch ist es aufgrund des großen Beharrungsvermögens deutscher Hochschulen wahrscheinlich der richtige politische Weg gewesen, eine kurzfristige und radikale Umsetzung vorzuschreiben und somit ein zeitlich langes Durcheinander von vielen Abschlüssen (und Meinungen) zu vermeiden.

Auch wenn man von einer Unumkehrbarkeit des Prozesses ausgehen kann, so entbindet dies nicht von einer kritischen Beobachtung und der (politischen) Bereitschaft zu künftigen und je nach Fachgebiet auch flexiblen Korrekturen. Nach dem heutigen Stand gibt es hinsichtlich der Zielerreichung aller o.g. Aspekte in allen Fachgebieten – und zu einem hohen Maße auch in Fächern mit GIS-Bezug – große Unsicherheiten oder Zweifel. Einschränkend sollte hierbei aber auch beachtet werden, dass zum jetzigen Zeitpunkt eine Bewertung nur eine bedingte Aussagekraft haben kann, da erst relativ wenige Bachelor- und Master-Studienangebote existieren oder gar schon Absolventen hervorgebracht haben.

Die große Chance der überschaubaren GIS-Community besteht darin, dass alle Akteure aus Hochschulen, Verwaltung und Privatwirtschaft relativ leicht zu einem gemeinsamen Forum zusammengefasst werden könnten, um die strukturellen und qualitativen Entwicklungen in den kommenden Jahren zu beobachten, zu bewerten und Empfehlungen an die Hochschulpolitik abzuleiten. Es gilt nun, die Einführung eines solchen Forums, z.B. unter Koordination des Deutschen Dachverbandes für Geoinformation (DDGI), offensiv voranzutreiben.

6 Literatur

- BILL, R., 2005: 20 Jahre GIS-Ausbildung an deutschsprachigen Hochschulen – eine Erfolgsgeschichte? GIS – Geo-Informationssysteme (erscheint im Juli 2005).
- DRANSCH, D. & HOSTERT, P., 2005: Geomatik als tragende Säule der Geographieverbildung am Geographischen Institut der Humboldt-Universität zu Berlin. Proceedings der 1. GIS-Ausbildungstagung, Potsdam (auf CD-ROM).
- GRIGAT, F., 2005: „Keine einheitliche Logik des Systems“. *Forschung & Lehre*, 6: 290-293.
- GRIMM, J., SCHWARZE, B. & WEIB, D., 2005: GIS-Ausbildung an der Fakultät Raumplanung der Universität Dortmund. Proceedings der 1. GIS-Ausbildungstagung, Potsdam (auf CD-ROM).
- JAROSCH, M., 2005: Geoinformation: Vom notwendigen Übel zum unverzichtbaren Muss. Proceedings der 1. GIS-Ausbildungstagung, Potsdam (auf CD-ROM).
- KLÄRLE, M., 2005: Zukunftsfähigkeit und Marktwert von anwendungs- und entwicklungsorientierten GIS-Studiengängen. Proceedings der 1. GIS-Ausbildungstagung, Potsdam (auf CD-ROM).
- KLEUSBERG, A., 2005: Zur Einführung von Bachelor- und Master-Studiengängen in Deutschland. *Zeitschrift für Vermessungswesen*; 1: n-14-n-15 und 2: n-30-n-32
- PLÜMER, L. & VOß, H., 2005: M.Sc GIS – Überblick in der Datenflut. Proceedings der 1. GIS-Ausbildungstagung, Potsdam (auf CD-ROM).
- SCHRÖDER, D. & HAHN, M., 2005: Photogrammetry and Geoinformatics - ein internationaler Masterstudiengang der Hochschule für Technik. Proceedings der 1. GIS-Ausbildungstagung, Potsdam (auf CD-ROM).
- SCHMIEDECKEN, W., 2004: Bericht aus der VGDH-Arbeitsgruppe Bachelor/Master. *Rundbrief Geographie* 188 (Juni 2004): 4-10.
- SCHWARZ-HAHN, S. & REHBURG, M., 2004: Bachelor und Master in Deutschland – Empirische Befunde zur Studienstrukturreform (BMBF-Studie), http://www.bmbf.de/pub/bachelor_und_master_in_deutschland.pdf
- STEEDMAN, H. & WAGNER, K., 2005: Konsequenzen für Unternehmen aus der Einführung des Bachelors. *Forschung & Lehre*, 6: 311-312.
- WEHMANN, W. & HAHN, M., 2003: Bachelor- und Masterstudiengänge in der Vermessungsausbildung – Steht der Hochschulausbildung ein Strukturwandel bevor? *Zeitschrift für das Vermessungswesen*. 128 (6): 374-382.

Werkzeuge zur Erstellung interaktiver Lerninhalte

MANFRED WIGGENHAGEN¹ & THORSTEN HÖDL²

Zusammenfassung: In den vergangenen Jahren wurden am Institut für Photogrammetrie und GeoInformation (IPI) verschiedene Lerninhalte für die Präsentation im Internet aufbereitet. Insbesondere in den Projekten ELAN und FERGI wurden vollständige Lernmodule inhaltlich und strukturell neu gestaltet und in der Ausbildung eingesetzt.

Die Gestaltung dieser E-Learning Module beinhaltet zusätzliche interaktive Elemente, die über die reine Präsentation von Skripten und Vorlesungsfolien hinausgehen.

Die Motivation zur Nutzung dieser Lerneinheiten steigt, wenn komplexere Inhalte durch interaktive Komponenten leichter verständlich vermittelt werden.

Aufgrund der unterschiedlichen Disziplinen reichen die Anforderungen an diese Komponenten von einfachen Animationen von z.B. Arbeitsabläufen bis hin zur Berechnung und Visualisierung komplexer Vorgänge z.B. in der digitalen Bildverarbeitung.

In diesem Beitrag werden unterschiedliche Werkzeuge zur Erstellung interaktiver Lerninhalte gegenübergestellt und bewertet. Anhand von Beispielen werden die Vor- und Nachteile der Umsetzung mit Softwareprodukten wie Mediator, Macromedia Director und SWISHmax präsentiert.

1 Einleitung

In grundlegenden Betrachtungen zur Herstellung multimedialer Komponenten in der Ausbildung wird davon ausgegangen, dass bei der Entwicklung und Realisierung der Lernmodule mehrere Personen beteiligt sind. In (KHAZAELI, 2000) wird der Produktionsprozess in folgende Arbeitsphasen unterteilt:

- Organisation,
- Information,
- Interface,
- Produktion.

Am Produktionsprozess beteiligt sind u.a. Projektleiter, Fotografen, Designer, Layouter und Programmierer (siehe auch FROMMANN, 2005).

In der universitären Praxis ergibt sich heutzutage oft das Problem, dass weder die Ressourcen für diesen erhöhten Personaleinsatz zur Verfügung stehen, noch ein derartiges Prozessteam zusammengestellt werden kann, da die multimedialen Komponenten quasi neben der hauptamtlichen Tätigkeit hergestellt werden müssen.

Daraus folgt, dass in den meisten Fällen der jeweilige Fachwissenschaftler seine Materialien zur Verfügung stellt und eine assistierende Hilfskraft für die Umsetzung der Konzepte verantwortlich ist.

¹ Dr.-Ing. Manfred Wiggenhagen, Universität Hannover, Institut für Photogrammetrie und GeoInformation (IPI). Nienburger Str. 1, 30167 Hannover

Email: wigge@ipi.uni-hannover.de

² Dipl.-Ing. Thorsten Hödl, Universität Hannover, Institut für Photogrammetrie und GeoInformation (IPI). Nienburger Str. 1, 30167 Hannover

Email: hoedl@ipi.uni-hannover.de

Um unnötige Mehrarbeit bei der Konvertierung der Inhalte zu vermeiden und die Fachwissenschaftler zu motivieren, ihr Material möglichst ohne zusätzlichen Aufwand anzubieten, wurden am Institut für Photogrammetrie und GeoInformation die meisten Basisinhalte als HTML-Seiten erstellt und angeboten. Die Erweiterung um Animationen, Grafiken, Formeldarstellungen und Videos wurde auf Basis von Flash-Anwendungen, PHP- und JavaScript Bestandteilen sowie Apple Quick Time Filmen durchgeführt.

In den folgenden Kapiteln soll die Realisierung einiger Modulbestandteile mit den Werkzeugen Mediator, Macromedia Director und SWISHmax beschrieben werden und eine Bewertung des Potenzials dieser Werkzeuge vorgenommen werden.

2 Zielsetzungen

Zur späteren Anwendung innerhalb des Kurses „Photogrammetrie und Fernerkundung I“ sowie innerhalb des Fergi-Moduls „Photogrammetric Image Processing“ werden u.a. folgende multimediale Komponenten benötigt:

- Planungsrechner zur Bestimmung der erreichbaren Messgenauigkeit im Normalfall der Photogrammetrie
- Korrelationsdemonstrator zur Darstellung der Wirkungsweise der Kreuzkorrelation von Bildmatrizen
- Darstellung geometrischer Zusammenhänge der Zentralperspektive

Anhand dieser Beispielrealisierungen sollen nachfolgend die Möglichkeiten der unterschiedlichen Autorenwerkzeuge beschrieben werden.

Während reine HTML-Seiten keine zusätzliche Software neben dem eingesetzten Browser erfordern, müssen auf dem Rechner des Anwenders je nach eingesetzter Technik zusätzliche Hilfsprogramme, sogenannte „plug-ins“ installiert werden. Bei der Anwendung von PHP-Programmen ist zu beachten, dass eine Verbindung zum Serverrechner im Netzwerk bestehen muss, auf dem die PHP-Skripte ausgeführt werden. Bei offline-Betrieb muss als Ersatz z.B. ein Apache-Server auf dem offline Rechner installiert sein und die PHP-Skripte müssen auf diesem Server abgespeichert sein. Die Nutzung von PHP-Skripten in HTML-Seiten hat zwar den Vorteil, dass diese Inhalte nicht von Unbefugten über das Internet kopiert werden können, der Nachteil besteht aber in dem Server-Client Konzept, dass nicht für alle Präsentationsumgebungen geeignet erscheint. Daher wird die Nutzung von PHP in folgenden Kapiteln nicht weitergehend behandelt.

Bei der Anwendung von Flash-Inhalten wird der Macromedia® Flash Player benötigt, der kostenlos über das Internet geladen und installiert werden kann. Um die Menge der notwendigen Zusatzprogramme gering zu halten, werden daher die Realisierungen der o.g. Beispiele unabhängig vom jeweiligen Autorenwerkzeug im Flash-Format abgespeichert.

3 Realisierungen

3.1 Mediator

Die Software Mediator der Firma Matchware A/S wird heute zunehmend auch in Gymnasien zur Erstellung von Präsentationen und Referaten eingesetzt. Hierdurch besteht die Chance, dass bereits Studierende in den ersten Semestern für die Herstellung von Internetprojekten gewonnen werden können. Mediator verfügt über eine einfach zu erlernende graphische Oberfläche bei trotzdem ausreichender Funktionalität. Das Programm ist ideal für Anwender

geeignet, die nicht täglich an Darstellungen für das Internet programmieren und keinen großen Zeitaufwand für die Einarbeitung in komplexe Autorenwerkzeuge betreiben wollen. Zur Gestaltung der jeweiligen multimedialen Komponente stehen u.a. folgende Elemente zur Verfügung: Überschrifttext, Schaltflächen, Bilder, animierte GIF-Dateien, Videos, Eingabefelder und Listboxen.

Zur weiteren Ausgestaltung der multimedialen Komponente können über die Eigenschaften der Elemente sowohl die Darstellungsart, Farbe, Schriftart und Höhe als auch die damit verbundenen Ereignisse definiert werden. Hierzu dient ein ebenfalls graphisch orientierter Ereigniseditor, der sowohl einfache Reaktionen auf die Nutzung der Computermaus als auch die Auswertung von Bedingungen und die Anbindung an Datenbanken ermöglicht. Nachfolgende Abbildung zeigt eine Ansicht des Beispiels „Planungsrechner“.



Abb.1: Photogrammetrischer Planungsrechner

Ursprünglich war geplant, aus wirtschaftlichen Gründen möglichst viele Inhalte und multimediale Bestandteile aus existierenden PowerPoint Präsentationen zu übernehmen. In Mediator besteht zwar grundsätzlich die Möglichkeit diese PowerPoint Präsentationen zu importieren, allerdings werden die einzelnen Folien lediglich zu Bildern konvertiert. Sämtliche Animationen und Verknüpfungen gehen dabei verloren. Zusätzlich muss die Navigation zwischen den Mediator-Seiten neu aufgesetzt werden. Langfristig wurde daher das Vorlesungsmaterial auf der Basis von HTML-Seiten vorgehalten und die multimedialen Bestandteile als eingebundene Flash-Animationen ausgelegt.

3.2 Macromedia Director 8

Erste Realisierungen mit dem Programm Macromedia Director wurden bereits von WIGGENHAGEN (2001) auf der DGPF-Jahrestagung 2001 veröffentlicht. Im Rahmen dieses Beitrages wurde die Funktionalität des Werkzeuges zur Realisierung eines Simulators zur Verdeutlichung eines Streifenprojektionsmesssystems untersucht. Insbesondere die Nutzung graphischer Elemente, sogenannter „Darsteller“ innerhalb der Fensterumgebung, der „Bühne“

und die Planung des zeitlichen Ablaufes im „Drehbuch“ ermöglicht eine leistungsfähige Gestaltung auch komplexer multimedialer Komponenten.

Mit der modularen Programmiersprache Lingo können zur Realisierung nutzerspezifischer Aktionen sämtliche Komponenten, wie z.B. Eingabefelder, Grafiken oder Schaltflächen mit Funktionen belegt werden, die innerhalb einer übergeordneten Skriptverwaltung organisiert werden.

Die Speicherung der Projekte kann im Macromedia Film Format oder als Apple-Quick-Time Format erfolgen. Beide Formate benötigen wiederum ein zusätzliches Plugin, um in Browsern wie „Netscape“ oder "Internet Explorer“ dargestellt werden zu können (WENZ, 2000).

3.3 SWISHmax

Das Autorenwerkzeug SWISHmax wird von der Firma SWISHzone.com Pty Ltd aus Sydney, Australien vertrieben (SWISHMAX, 2005).

SWISHmax hat sich von einem kleinen wirkungsvollem Tool mit dem sich Texte für Flash animieren lassen zu einem kompletten Editor zur Erstellung von Flash Animationen entwickelt. Nach sehr kurzer Einarbeitungszeit stehen zahlreiche interessante Effekte zur Gestaltung von Animationen zur Verfügung, die per DropDown Menü aktiviert werden können. Es können eigene Bilder im GIF Format eingebunden und inzwischen auch zahlreiche andere Elemente wie z.B. Textfelder gezeichnet werden (siehe Abb.2).

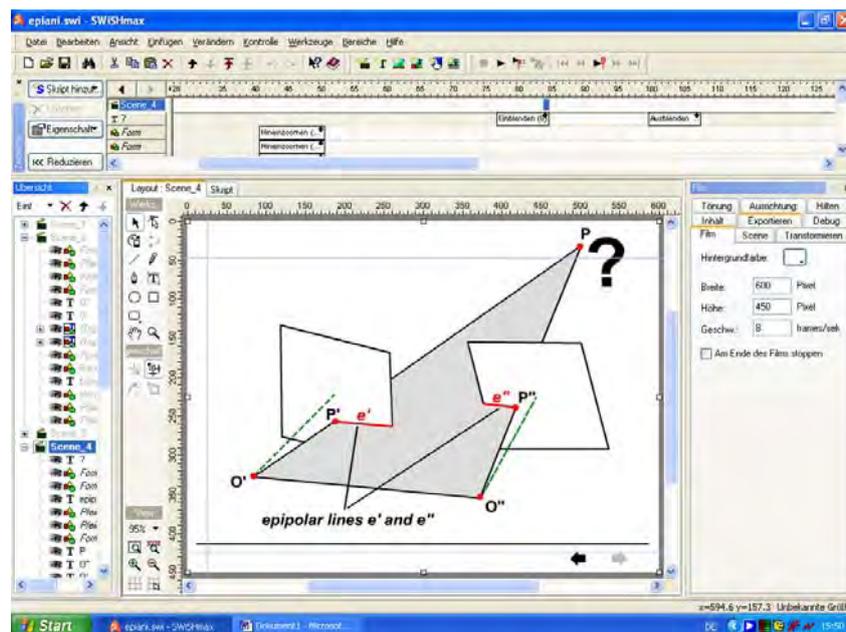


Abb.2: Benutzeroberfläche SWISHmax

Weiterhin lassen sich mit der integrierten Skript-Sprache zusätzliche Funktionen definieren und somit auch komplexe Projekte erstellen.

4 Interaktivität

Bei der Nutzung von e-learning Komponenten stellt sich häufig die Frage, wie viel Interaktivität sinnvoll ist bzw. welche Art und Menge an Interaktion sollte in die Anwendung eingearbeitet werden, um dem Nutzer einen Mehrwert zu verschaffen.

„Learning by doing“ impliziert, dass der Lernende mit dem angebotenen Material etwas „tun“ soll. Die Schritte: „lesen, verstehen, umsetzen, anwenden“ sollten mit den multimedialen

Lerninhalten ausführbar sein. Eine permanent blinkende Grafik, kann zwar die Aufmerksamkeit für kurze Zeit erwecken und ggf. das Verständnis für einen Formelzusammenhang fördern, die Punkte „umsetzen und anwenden“ werden aber z.B. mit einer animierten GIF-Datei nicht unterstützt. Der o.g. Planungsrechner dient dazu, bei vorgegebener Kamera-Objektiv-Kombination und zusätzlicher Definition von Abstand, Basis und Pixelabstand auf dem digitalen Sensor, die erreichbare Messgenauigkeit im Objektraum zu bestimmen. Neben vorgegebenen Werten kann der Anwender hier z.B. den Zusammenhang zwischen Objektabstand, Kamerakonstante und Bildmaßstabszahl selbst erarbeiten. Bereits diese einfache Anwendung zeigt, dass die Realisierung der Multimediakomponente je nach Zielsetzung völlig unterschiedlich ausfallen kann.

Je nach Fragestellung kann die Komponente zielorientiert angelegt sein, d.h. der Nutzer wird Schritt für Schritt aufgefordert bestimmte Interaktionen vorzunehmen, wie etwa:

„Kameratyp auswählen, Kamerakonstante festlegen, Abstand, Basislänge und Pixelabstand definieren“.

Oder es wird eine problemorientierte Interaktivität angeboten, wie z.B.

„Welche Kamerakonstante und Basis wählen sie, um bei einem gegebenen Abstand von 5 m eine Messgenauigkeit von 0.2 mm am Objekt zu erreichen?“

Durch die Koppelung von Grafiken, erklärendem Text und Formeln kann in interaktiv aufbereiteten Flash-Animationen ein „Learning-by-doing“ unabhängig von der Vorlesung und vom dem Lehrenden vorgenommen werden. Durch Bereiche auf der HTML-Seite, die sensitiv gestaltet sind, wenn z.B. die Computermaus über den Formel- oder Textbereich geführt wird, können dazugehörige Grafiken und Formeln erläutert werden. Der fragende Nutzer erhält bei Interaktion sofortigen Response und erarbeitet sich die Text- oder Formelteile, die ihm noch unklar waren. Ein Beispiel hierzu stammt z.B. aus der Vorlesung „Photogrammetrie und Fernerkundung I“ am IPI (siehe Abb.3).

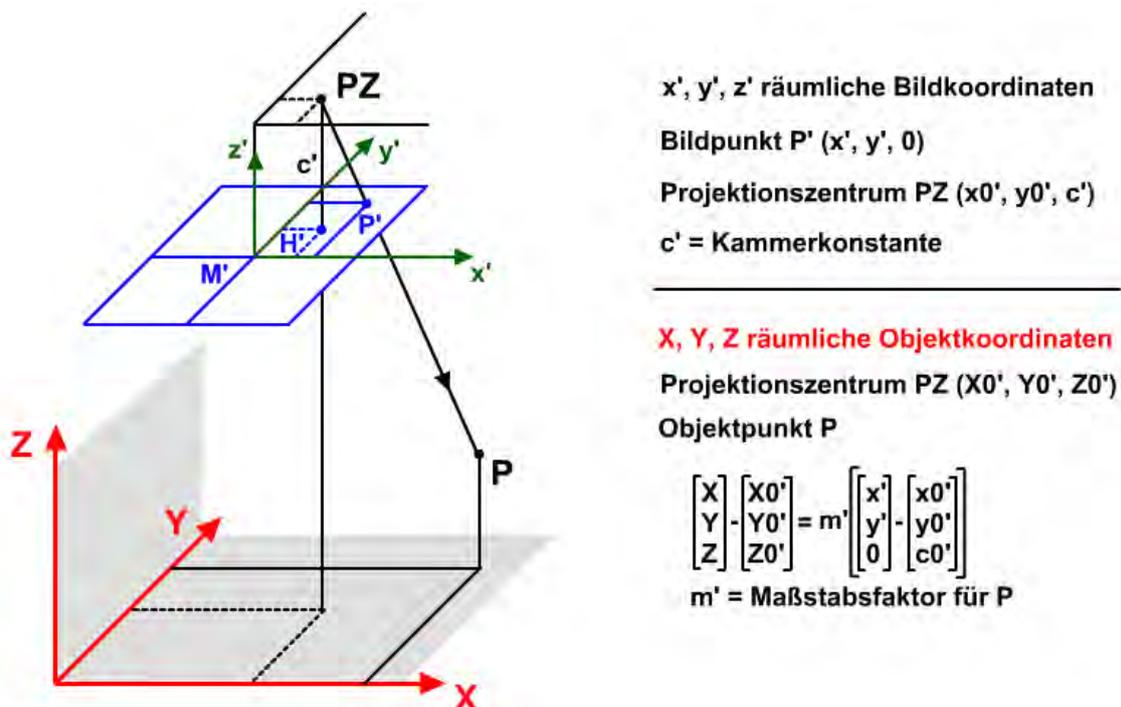


Abb.3: Flashanimation zur Erläuterung grundlegender geometrischer Definitionen

Insbesondere die Möglichkeit eine Grafik mit zusätzlichen Effekten zur Hervorhebung oder Verdeutlichung zu versehen, konnte mit Hilfe von SWISHmax sehr einfach realisiert werden. Die exportierte Flash-Datei wurde dann in die übergeordneten HTML-Seiten des Vorlesungsskriptes des Kurses „Photogrammetrie und Fernerkundung I“ eingebunden. Inzwischen sind nach Überarbeitung des HTML-Skriptes unzählige sehr anschauliche und hilfreiche Flash-Anwendungen realisiert worden.

Aktuelle Entwicklungen werden zusätzlich mit Sprache und mit Videosequenzen hinterlegt.

Innerhalb der weiteren Entwicklung von Vorlesungsinhalten zur digitalen Bildverarbeitung und Bildkorrelation wurde als weitere Komponente mit dem Programm Mediator eine Flash-Anwendung zur Verdeutlichung der Wirkungsweise der Kreuzkorrelation von Grauwertmatrizen erstellt. Hier wurde insbesondere Wert auf die Möglichkeit zur Eingabe eigener Werte und der interaktiven Unterstützung mit Zusatztexten gelegt. (Abb.4)

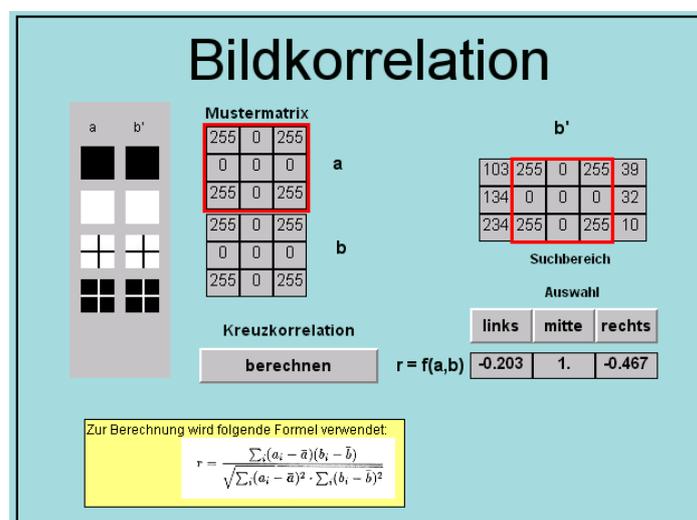


Abb.4: Korrelationsdemonstrator zur Darstellung der Wirkungsweise der Kreuzkorrelation von Bildmatrizen

Mit dieser Anwendung können sowohl vorgefertigte Mustermatrizen über einen Suchbereich verschoben und der aktuelle Korrelationskoeffizient berechnet werden, es können aber auch eigene Matrizen eingegeben und die Wirkungsweise der Formel untersucht werden.

5 Bewertung

Das Programm Mediator ist vorrangig dafür geeignet, um Komponenten zu entwickeln, die aus vielen graphischen Bestandteilen, Bildern und Videos bestehen und keine komplexen Berechnungen erfordern.

Die graphische Programmierung über Symbole ist sehr komfortabel soweit die grundlegenden Funktionen wie z.B. die Interaktion mit der Maus und das Anzeigen und Ausblenden von Bildteilen gewünscht sind. Die Realisierung größerer Formelzusammenhänge wie z.B. bei der Kreuzkorrelation ist in der Skriptsprache jedoch wenig empfehlenswert.

Die Software Macromedia Director ist sehr gut geeignet, logische Verfahrensabläufe, die in zeitlicher Reihenfolge dargestellt werden müssen, als Internetpräsentation aufzubereiten. Die Planung und Realisierung auch komplexer Abläufe lässt sich mit Hilfe von Drehbuch und Darstellern in kürzester Zeit durchführen. Die Implementierung von Berechnungen und umfangreicher Funktionen ist über die Skriptsprache Lingo möglich.

Die Autorensoftware SWISHmax überzeugt durch die klare Gliederung der Nutzerschnittstelle und die große Auswahl an Effekten zur Hervorhebung von Grafik-, Text- und Bildinhalten.

Fertige Animationen können als HTML-Datei abgespeichert werden. Die SWISHmax-Datei wird dabei automatisch im SWF-Format integriert. Fertige Animationen können auch als ausführbare Datei oder AVI-Film-Datei exportiert werden.

6 Ausblick

Die in diesem Beitrag beschriebenen Autorenwerkzeuge ermöglichen dem Fachwissenschaftler und Programmierer eine schnelle und vielseitige Gestaltung seiner geplanten Multimediakomponenten. Um die notwendige Anzahl an vorhandenen Zusatzprogrammen und Plug-ins so gering wie möglich zu halten, werden auch zukünftige Module auf HTML-Seiten mit Navigation über Frames sowie eingebettete Flash-Animationen aufgebaut. Bei komplexeren Lernmodulen, deren Layout und Zusammensetzung häufig geändert werden muss, wird langfristig auf XML (siehe POMASKA, 2005) oder eLML umgestellt (FISLER, 2005). Zum jetzigen Zeitpunkt besteht aber aufgrund der überschaubaren Modulgrößen noch kein Bedarf für diese weitergehende Aufbereitung der E-learning Bestandteile.

7 Literatur

- FISLER J., S. BLEISCH, M. NIEDERHUBER, 2005: Development of sustainable E-Learning content with the Open Source eLesson Markup Language eLML. Proceedings of the ISPRS working group VI/1 –VI/2 , Potsdam 1-3. Juni 2005
- FROMMANN, T. & T. PHAN TAN, 2005: On the didactical potential of E-learning courseware. Proceedings of the ISPRS working group VI/1 –VI/2 , Potsdam 1-3. Juni 2005
- KHAZAELI, C. D., 2000: Multimedia mit Director 8, Produktplanung und Interfacedesign, ISBN 3 499 60080 3, Rowohlt Taschenbuch Verlag, Hamburg.
- POMASKA G., 2005: Introduction into second generation web applications applying XML. Proceedings of the ISPRS working group VI/1 –VI/2 , Potsdam 1-3. Juni 2005
- SWISHMAX, 2005: <http://www.e-teaching.org/technik/produkte/SWISHmaxsteckbrief> (Zugriff am 16.5.2005)
- WENZ, C. & HAUSER, T.; 2000. Macromedia Director 8 ISBN 3-8287-1119-7, BHV-Verlag, Kaarst
- WIGGENHAGEN, M., 2001: Multimediale Komponenten in der Lehre-sinnvolle Hilfsmittel oder Spielerei?, Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung, Band 10, Eckhardt Seyfert (Hrsg.), S. 87-93

Wie viel Mathematik braucht ein Ingenieur?

OLGA WÄLDER¹

Zusammenfassung: Angesichts der eingeleiteten Fusion verschiedener geowissenschaftlicher Fachrichtungen zu einem wissenschaftlichen Komplex, der später mit Geoinformatik, Geomathik oder wie auch immer bezeichnet werden wird, soll hier die logische Frage nach gemeinsamen Anforderungen an die Studierenden und insbesondere die nach zukünftigen Lehrinhalten diskutiert werden.

Speziell in der Mathematikausbildung für Studenten geowissenschaftlicher Fachrichtungen sollte großer Wert auf die Praxisbezogenheit, aber auch auf die theoretischen Fundamente gelegt werden. Diese beiden Anforderungen werden nicht selten als widersprüchlich angesehen. Durch eine enge Verzahnung dieser Anforderungen, durch eine sequentielle Annäherung zum Optimum in ihrer Proportion kann eine weitere Verbesserung der Qualität in der Ausbildung von Studierenden erreicht werden.

Im Vortrag werden einige Ideen zur Gestaltung von Lehrveranstaltungen zur mathematischen Vertiefung am Beispiel des Fachs „Mathematische Kartographie“ an der TU Dresden vorgestellt. Der Schwerpunkt dieser Vertiefung liegt hierbei in der Vermittlung der Grundideen moderner, anwendungsorientierter mathematischer Modelle und in Denkanregungen zur Entwicklung eigener Modellen in der Praxis. Im Rahmen einer „Antithese“ wird ein kurzer Erfahrungsbericht über die gleichnamige Lehrveranstaltung für Kartographen an der Moskauer Staatlichen Universität für Geodäsie und Kartographie angeboten.

Zu einer ausführlichen Diskussion bzw. einem Erfahrungsaustausch wird hierbei ausdrücklich aufgefordert.

1 Einleitung

In den vergangenen Jahren zeigte sich eine stark rückläufige Studentenzahl in allen naturwissenschaftlich-technischen Fächern. Dabei blieben die Berufsaussichten für Absolventen des Diplomstudienganges Mathematik immer gut. Zur Zeit besteht ein sehr großer und nachhaltiger Bedarf an Spezialisten mit einer praxisorientierter „interdisziplinärer“ Ausbildung. Wie man der Homepage des Fachbereiches Mathematik der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg entnehmen kann, ist die Kurzformel „High Tech = High Math“ zur unumkehrbaren Gewissheit im heutigen digitalen Zeitalter geworden. Darauf wurde dort die Einführung des Diplom-Studienganges „Technomathik“ begründet.

Die obige Bezeichnung des Studienganges soll auf keinen Fall frustrierend, sondern motivierend auf einen Ingenieur wirken. Man kann heute kaum eine deutliche Grenze zwischen Methoden und Verfahren der spezifisch „technischen“ (Elektrotechnik, Maschinenbau, Fertigungstechnik, Autoindustrie usw.) und der spezifisch „natur-wissenschaftlichen“ (Geowissenschaften, Biologie, Chemie usw.) Fachrichtungen ziehen. Manchmal werden die gleichen Verfahren unter verschiedenen Bezeichnungen verwendet bzw. neu entdeckt. Außerdem kann festgestellt werden, dass die theoretischen Grundlagen der in diesen Fachrichtungen verwendeten Software-Tools beinahe identisch sind.

¹ Dr. Olga Wälder, Institut für Kartographie, Technische Universität Dresden, Mommsenstrasse 13, 01062 Dresden, e-mail: Olga.Waelder@mailbox.tu-dresden.de

Das gemeinsame Ziel einer wünschenswerten Ausbildung liegt darin, dass die Studenten berufsqualifizierend vorbereitet werden, um an der Lösung der vielfältigen Aufgaben in Naturwissenschaft und Technik mitarbeiten zu können. Ein Mathematiker lernt dabei mehr, wie ein CAD-System konstruiert ist, während sich zum Beispiel ein Ingenieur-Kartograph für seine Anwendung stärker interessiert.

Dennoch stellt sich die Frage, *wie viel* Mathematik denn ein Ingenieur kennen sollte, um dem von ihm in der Praxis erwarteten Qualifikationsstand gerecht zu werden? Die Antwort auf diese Frage ist kein Kochrezept: Es geht dabei nicht um eine optimale prozentuelle Mischung von Zutaten, sondern viel mehr um eine Reihe von grundlegenden Anforderungen an die Organisation der Lehre an ingenieur- und naturwissenschaftlichen Hochschulen. Im Text wird von der Globalität dieses Themas abgesehen: Weitere Auslegungen sowie Vorschläge im Text werden sich verstärkt auf die Ausbildung von Diplom-Kartographen im Fach „Mathematische Kartographie“ in Dresden beziehen.

2 Die Problematik einer Ausbildung: „Fundamentale Säulen“

Ein vereinfachtes Ausbildungsmodell, von welchem im Text ausgegangen wird, ist Abb. 1 zu entnehmen.

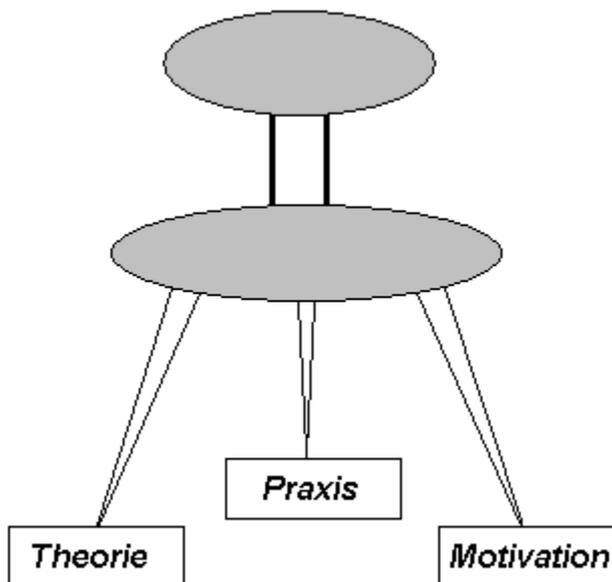


Abb. 1: „Fundamentale Säulen“ einer Ausbildung

Die hier eingeführten Säulen sind selbsterklärend und stehen in einer engen Verbindung sowie einer gegenseitigen Wechselwirkung miteinander. Das stabile „Gleichgewicht“ einer Ingenieur-Ausbildung kann nur dann gewährleistet werden, wenn in der Lehre keine dieser Säulen vernachlässigt wird.

Es wäre gewagt, zu versuchen, ein kompliziertes mathematisches Verfahren nur an Hand einer begrenzten Anzahl von Beispielen zu erklären. Dabei kann nicht gewährleistet werden, dass ein weiteres Beispiel mittels des auf diesem Wege vorgestellten Verfahrens von Studenten *selbständig* gelöst wird.

Eine aufeinander gestapelte Aufhäufung von mathematischen Formeln wird ebenso schlecht ankommen. Ein mittelmäßiger Kartographiestudent reagiert allergisch auf mathematische Bezeichnungen, weil ihm meist elementare Grundlagen der Schulmathematik fehlen.

Über die dritte Komponente der Ausbildung wird kaum oder nie gesprochen. Der Begriff „Motivation“ wird der Kompetenz der Psychologie zugeschrieben. Jedoch spielt der Motivationsaspekt der Lehre eine wichtige Rolle bei der Ausbildung. Dabei geht es nicht nur allein um die Lernmotivation von Studenten, sondern auch um die Stellung eines Lehrenden den Studenten und seiner Lehre gegenüber.

Es ist kein Geheimnis, dass die Lehrinhalte an Hochschulen selten auf einander abgestimmt werden. Auf Grund des unvermeidlichen Personalwechsels verlieren die früher getroffenen Vereinbarungen ihre Aktualität. Wegen der Zeitknappheit kommt es selten dazu, einen interdisziplinären „runden Tisch“ zwischen den Instituten, die am Lehrplan einer Fachrichtung beteiligt sind, zu organisieren. Die Lehrkörper beschwerten sich untereinander über die Notwendigkeit zur ständigen Wiederholung des gleichen Stoffes und über das Desinteresse der Zuhörer. Dieses „Reden im Kreis“ führt unmittelbar dazu, dass der Lehrende weniger Zeit für den eigentlichen Stoff seiner Vorlesung hat. In solchen Fällen wird dann eine ausführliche Behandlung von praxisbezogenen Aufgabenstellungen eingespart und man „galoppiert“ durch den theoretischen Stoff. Das Tempo wird zu rasant, und die Frustration unter den Studenten wächst. Viele Lehrkörper sind als befristete, sich ständig wechselnde Mitarbeiter oder als externe Honorarkräfte tätig, wodurch der bunte Teppich der von ihnen angebotenen Prüfungsthemen für Studenten völlig unübersichtlich werden kann, falls sie zur Prüfung nicht rechtzeitig zugelassen werden oder gar durchgefallen sind.

Diese und viele weitere Gründe führen dazu, dass die Lernmotivation der Studenten, die auf Grund der aktuellen Probleme am Arbeitsmarkt sowieso nicht besonders hoch ist, immer weiter sinkt. Eine fruchtbare Lehre ohne Motivation der Lernenden ist absolut unmöglich.

Man kann die Reihe der Probleme lange fortsetzen, die eine oder mehrere der drei oben genannten fundamentalen Säulen der Ausbildung betreffen. Dennoch möchten wir an dieser Stelle von den Beschwerden zu einigen - ausschließlich fachbezogenen - Vorschlägen übergehen. Auf die globalen politischen Aspekte einer undurchführbaren Hochschulreform wird hier verzichtet.

3 Einige methodisch-didaktische Problemlösungen

Zunächst soll die Blickrichtung betont werden, aus der den in Abschnitt 2 skizzierten Problemen nachgegangen wird. Wir möchten uns hier um *ein Optimum* aus Studentensicht bemühen. In MEYER (1993) wird darauf hingewiesen, dass diese Sichtweise nicht unumstritten ist: Man kann auch eine argumentierte Begründung der folgenden Auffassung geben, dass das Optimum für Studenten *im geschenkten Diplom ohne Hochschulbesuch* liege.

Als Mathematikerin ging ich in meiner Lehrveranstaltung „Mathematische Kartographie“ von einigen Axiomen aus. Natürlich haben diese keinen Anspruch auf Allgemeinheit oder auf Geschlossenheit im Sinne der Metamathematik: Jeder Lehrer hat eigene Tricks und Tipps, mit welchen er sich behilft. Meine eigenen Voreinstellungen waren:

Axiom 1. Studenten sind für das Studium *ursprünglich motiviert* (gewesen).

Axiom 2. Kartographiestudenten sind *nicht unbedingt* die besten in Mathematik.

Axiom 3. Kartographen brauchen *gewisse* Verfahren aus der Mathematik für ihre fachspezifischen Probleme.

Mit Axiom 1 waren einige Kollegen nicht einverstanden. Nach meiner Meinung ist es zwecklos, den Seminarraum zu betreten, wenn man vom Gegenteil ausgeht. Falls Studenten auch als desinteressiert erscheinen, ist hier jedoch kein Widerspruch zu Axiom 1 zu sehen. Wenn eine Lehrveranstaltung – wie meine – ab dem vierten Semester beginnt, war die ursprüngliche Motivation a priori da, ist aber durch einige Misserfolge in der höheren Mathematik binnen dreier Semester bereits verflogen. Axiom 2 entspricht der Erfahrung der meisten Mathematikdozenten. Auf Axiom 3 stützend sollte man versuchen, herauszufinden, *welche* Verfahren denn konkret ein Kartograph bzw. ein Ingenieur braucht. Man sollte ins Gespräch mit denjenigen Lehrkörpern, die im Diplomstudium entsprechender Fachrichtung eingebunden sind, über die von Ihnen erfahrungsgemäß festgestellten Mängel bei *ihren* Studenten in mathematischen Grundkenntnissen kommen. Hier wird extra das Pronomen „ihren“ betont: Auf keinen Fall darf die Ausbildung von Ingenieuren in der Mathematik als fachunabhängig angesehen werden.

Einige Studenten interessierten sich während meiner Lehrveranstaltung für Bonusaufgaben kreativer Art, die ich ihnen in letzten fünf Minuten bei Übungen angeboten habe. Hierzu gehören zum Beispiel das Vier-Farben-Problem und das Königsberger-Brücken-Problem von Euler. Aus kognitiv-psychologischer Sicht sind dies spezielle Reize, die die Motivation von Lernenden steigern sollen. Man muss zugeben, dass diese Reize überwiegend in stärkeren Gruppen wirken, die es sich leisten können, über fachübergreifende Fragen nachzudenken, während die schwächeren Studenten schon mit dem Verstehen des Vorlesungsstoffes überfordert sind. Einige Gruppen blockten meine populär-wissenschaftlichen Abweichungen sofort ab und blieben lieber beim konkreten Stoff: Sie zogen ausdrücklich das langsamere Tempo und Wiederholungen vor. Für einzelne „gute“ Studenten in solchen Gruppen werden dann Aufgaben höherer Schwierigkeitsstufen angeboten. Die Flexibilität im Unterricht darf auf keinen Fall fehlen.

Sehr gut kamen bei *allen* Studenten solche Aufgaben an, die einen *konkreten praktischen* Bezug hatten. Um an die entsprechenden Aufgabestellungen zu kommen, besuchte ich Diplomverteidigungen unseres Institutes, interessierte mich für die Themen angebotener Studienarbeiten usw. (Axiom 3 in seiner Anwendung). Solche Aufgabenstellungen und auch Überleitungen zu neuen Verfahren, die mit der Einführung „in einer Studien- bzw. Diplomarbeit in unserem Institut wurde folgendes Problem untersucht...“ wirkten aus kognitiv-psychologischer Sicht als motivierende Reize. Ein solcher, mit seiner praktischen Anwendung verbundener Stoff bleibt länger im Gedächtnis eines Ingenieurs erhalten.

Nach durchgeführter Prüfung stellte ich fest, dass einige ärgerliche Fehler in der Klausur auf eine unsaubere Mitschriftführung der Studenten zurückzuführen waren. Im zweiten Jahr bereitete ich ein Vorlesungsscript vor, das als Formelsammlung für die Prüfung benutzt werden konnte.

Jede Vorstellung neuer theoretischer Verfahren sollte am besten mit einem Zahlenbeispiel beginnen. Der mathematischen Sprache der Formel können wenige „fließend“ folgen. Nach

einem Zahlenbeispiel erfolgt dann die Erklärung der allgemeinen Form eines Verfahrens und seiner Vor- und Nachteile. Was besonders wichtig ist: Die „menschlich verständliche“ Kernidee, die zu einem oder anderem Verfahren geführt hat, sollte mehrmals betont werden. Dabei sollte den Studenten das Gefühl vermittelt werden, dass sie bei der Herleitung dieses Verfahrens *gerade mitgewirkt* haben. Wenn jemand ein Verfahren vergessen, aber seine grundlegende Idee verstanden hat, wird er die Motivation haben, eine Literaturrecherche zu starten. Nur derjenige, der die Kernidee eines Verfahrens kennt, kann dieses Verfahren auch *richtig* und *aufgabengerecht* anwenden. Ansonsten kommt es bei den meisten Anwendern zu einem leitfadenslosen „Konzert“ auf der Computertastatur.

Im Rahmen einer Kurzzeitdozentur besuchte ich im WS 2004 die Moskauer Staatliche Universität für Geodäsie und Kartographie. Die gleichnamigen Vorlesungen in „Mathematischer Kartographie“ entsprechen dort unseren Vorlesungen in „Kartographischen Netzentwürfen“ und können daher nicht auf direktem Wege zu einer Gegenüberstellung verwendet werden. An dieser Stelle soll nur betont werden, dass diese Vorlesung von einem *sechsendachtzigjährigen* Professor gehalten wird. Von seinen Kollegen wurde ich vorsichtshalber gewarnt, dass er „computerallergisch“ ist, und ich ihn am besten zum Thema „GIS in der Kartographie“ in einer Diskussion gar nicht ansprechen sollte. In denn dortigen Vorlesungen wird der theoretische Aspekt somit stark überbetont: Dies gehört nun mal zur Spezifikation russischer Hochschulen, die ich kenne. Die praktische Säule ihrer Ausbildung verschaffen sich russische Studenten selbst: Um zu überleben, arbeiten viele in Ingenieurbüros. Die Motivation bei russischen Studenten ist noch sehr hoch, nicht zuletzt weil es keine akute Arbeitslosigkeit bei Kartographen bzw. Ingenieuren in ihrem riesigen Land gibt.

4 Ausblick und Diskussion

Abschließend, soll eine *didaktische Strukturierung* zum Thema dieser Arbeit vorgenommen werden. Dieser Begriff stammt aus MEYER (1993) und bedeutet die Erarbeitung eines begründeten Zusammenhanges von Ziel-, Inhalts- und Methodenentscheidung. Sie dient der Beantwortung der folgenden Frage:

Warum sollen diese Studenten mit diesen vermuteten Interessen, Erfahrungen und Handlungszielen ausgerechnet an diesem Unterrichtsinhalt und mit diesen Methoden zu den angestrebten Lernergebnissen kommen?

Schwierig ist die Beantwortung vor allem deshalb, weil dabei viele Parameter fachlicher, organisatorischer und anderer Art nun irgendwie auf einen Nenner gebracht werden müssen, vgl. MEYER (1993).

Wie viel Mathematik braucht ein Ingenieur? Genau *so viel*, dass er nach Erlangen seines Diploms dazu in der Lage ist, die relevanten mathematischen Verfahren für konkrete Aufgabstellungen selbständig auszuwählen, fachlich zu begründen, gegebenenfalls zu verallgemeinern und in der Praxis umzusetzen. Hierzu benötigt ein Ingenieur einige *notwendige* Bedingungen seiner Mathematikausbildung. Einige von diesen sind nach unserer Meinung:

- Fundamentales Wissen in der Höheren Mathematik, ihre Sprache, Symbolik, ein Eindruck über die Vorgehensweise sollten vermittelt werden. Die theoretischen Auslegungen sollten dabei nicht unnötig verkompliziert, verschlüsselt, realitätsfern darge-

stellt werden! Fachrelevante Beispiele sollten angeboten und Denkanregungen gefördert werden;

- In mathematischen Vertiefungsfächern sollte insbesondere der praktische Bezug betont werden, die Grundideen verschiedener Verfahren sollten zuerst an Hand einfacher Beispiele näher erklärt und von Studenten „miterlebt, wieder entdeckt“ werden. Aufgabenstellungen sind am besten auf Studien- und Diplomarbeiten der Fachrichtung orientiert zu wählen. Selbständigkeit bei der Lösungssuche, offene Diskussion im Unterricht sollten unterstützt und verstärkt gefördert werden. Der Unterricht sollte eine dialektische Struktur erhalten. Es sollte im Idealfall das Gefühl vermittelt werden, dass man Mathematik mit Freude erlernen kann;
- Eine gegenseitige Abstimmung von Lehrplänen trägt der Vermeidung von Wiederholungen bei. Zielorientierung und Struktur einer Vorlesung sollten Studenten von Anfang an klar gemacht werden (Script, Inhaltsverzeichnis, e-learning usw.). Auf Querverbindungen zwischen sowie auf den Zusammenhang von verschiedenen Verfahren sollte hingewiesen werden;
- Motivationssteigerung bei den Hochschullehrern unter anderem durch längere Arbeitsverträge soll erreicht werden. Die Motivationssteigerung bei Studenten kann durch Einbeziehung von Mathematikdozenten in die Betreuung von Studien- und Diplomarbeiten erhöht werden. Eine fachübergreifende Kooperation zwischen Institutsmitgliedern - nicht nur auf Institutsdirektorebene - sollte gefördert werden.

Diese sind die jedem Hochschullehrer klaren Idealvorstellungen, sozusagen die Grenzwerte, zu welchen man sich auf verschiedene Art und Weise nähern kann. Der Entwurf einer mathematischen Vorlesung war, ist und bleibt eine Sache der didaktisch-methodischen Phantasie.

Die das vollständige Bild ergänzenden *hinreichenden* Bedingungen einer erfolgreichen mathematischen Ausbildung hängen allerdings von der persönlichen Selbsteinstellung der Studenten und auch der Dozenten ab.

5 Literaturverzeichnis

MEIER, H., 1993: Leitfaden zur Unterrichtsvorbereitung. - 12. Aufl., 402 S., Cornelsen Verlag Scriptor GmbH & Co., Berlin.

Fernstudienmaterialien Geoinformatik (FerGI) - Erfahrungen, Erkenntnisse und Ausblick

BEATA GRENDUS¹

Das Projekt „Fernstudienmaterialien Geoinformatik (FerGI)“ befasst sich während seiner dreijährigen Förderlaufzeit mit der Entwicklung, der Implementierung, dem Einsatz und der Evaluierung von E-Learning-Modulen zu anwendungsbezogenen Spezialthemen der Geoinformatik und Fernerkundung. Neben einem kurzen Erfahrungsbericht zur Entwicklung und zum Einsatz der bereits fertig gestellten Materialien, sollen nach einer Auswertung der ersten Evaluationsergebnisse abgeleitete Erkenntnisse und Schlussfolgerungen dargestellt werden.

Da sich das Vorhaben auch die nachhaltige Pflege und Weiterentwicklung der erstellten Materialien über die geförderte Projektdauer als Aufgabe gestellt hat, werden zum einen die Schwierigkeiten zur Gewährleistung der Nachhaltigkeit erläutert und zum anderen die Ergebnisse einer Studie vorgestellt, die sich mit der Nachfrage von Aus- und Weiterbildungsangeboten im Bereich Geoinformatik und Fernerkundung auf Seiten potentieller Nutzer, Anbieter und Entwickler beschäftigt.

1 Das E-Learning-Projekt FerGI

Das größte niedersächsische E-Learning-Verbundprojekt „Fernstudienmaterialien Geoinformatik (FerGI)“ wird seit Oktober 2003 für eine Dauer von drei Jahren im Rahmen des Förderschwerpunkts „Fernstudium“ der Bund-Länder-Kommission (BLK) für Bildungsplanung und Forschungsförderung zu gleichen Teilen vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) und vom Ministerium für Wissenschaft und Kultur (MWK) des Landes Niedersachsen gefördert. Die fünf Institute² aus dem Kompetenzzentrum für Geoinformatik (GiN) stellen gegenseitig ergänzend die fachliche Expertise, während ein Institut³ aus dem Kompetenzzentrum für Online Distance Learning (Via Online) bei didaktischen und technischen Fragestellungen behilflich ist (Abbildung 1).

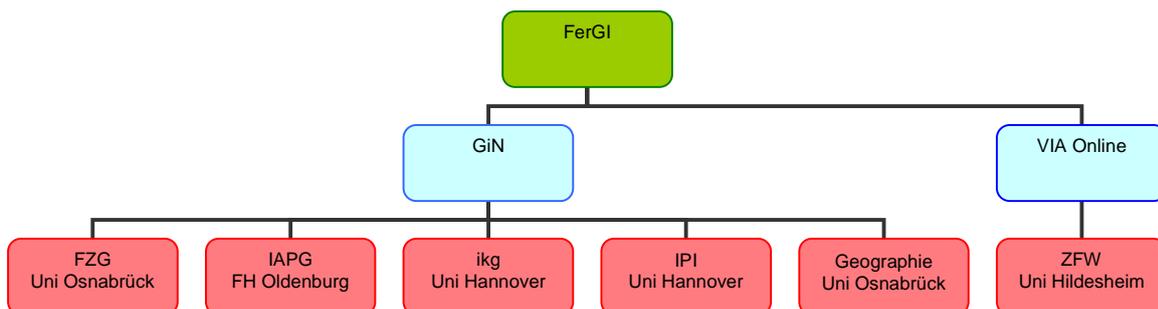


Abb. 1: Aufbau des E-Learning-Projekts FerGI

¹ Dipl.-Umweltwiss. Beata Grendus, Forschungszentrum für Geoinformatik und Fernerkundung (FZG), Universität Osnabrück, Eichendorffweg 30, 49377 Vechta, Telefon: 04441/15-495, Fax: 04441/15-483, e-mail: beata.grendus@fzg.uni-osnabrueck.de

² Fachgebiet Geographie und Forschungszentrum für Geoinformatik und Fernerkundung (FZG) der Universität Osnabrück; Institut für Angewandte Photogrammetrie und Geoinformatik (IAPG) der FH Oldenburg/Ostfriesland/Wilhelmshaven in Oldenburg; Institut für Angewandte Photogrammetrie und GeoInformation (IPI) und Institut für Kartographie und Geoinformatik (ikg)

³ Zentrum für Fernstudium und Weiterbildung (ZFW) der Universität Hildesheim

Ziel von FerGI ist es, durch die hochschulübergreifende Zusammenarbeit, qualitativ hochwertige, kleine (mit einer Größenordnung von 0,5 bis 3 ECTS-Punkten) und damit flexible E-Learning-Module zu entwickeln (Kap. 1.1), einzusetzen (Kap. 1.2) und projektbegleitend auf drei Ebenen durch Entwickler, Dozenten und Studenten zu evaluieren (Kap. 1.3). Inhaltlicher Schwerpunkt sind aktuelle Spezialthemen der Geoinformatik und Fernerkundung, die bisher noch nicht oder kaum behandelt worden sind. Dadurch werden Mehrfachentwicklungen und Überschneidungen mit bereits vorhandenen E-Learning-Angeboten wie gimolus⁴, geoinformation.net⁵ oder GITTA⁶ vermieden (SCHIEWE 2004).

Zielgruppe der E-Learning-Module sind zunächst die Studenten in den geowissenschaftlichen Studienfächern der partizipierenden Hochschulen. Das mediendidaktische Konzept richtet sich daher an Ihnen aus. Seit Juli 2005 haben aber auch Interessenten aus anderen assoziierenden Hochschulen und der Wirtschaft die Möglichkeit, die Module zeitlich begrenzt aber kostenlos zu nutzen. Ein geeignetes Geschäftsmodell, um diese entgeltlich zu offerieren, wird derzeit im Rahmen von „geo-kiosk“ (Kap. 2) sowie einer „Weiterbildungsoffensive für den Mittelstand“ erarbeitet.

1.1 Entwicklung

Insgesamt werden 20 Module (Abbildung 2) entwickelt, welche die gesamte Bandbreite der Geoinformatik von der Erfassung (orange), Verwaltung (blau), Analyse (grün) und Präsentation (lila) räumlicher Daten bis zu den darauf aufbauenden Anwendungen (rot) abdecken. Je nach Zielgruppe und Thematik sind diese entweder in **Deutsch** und/oder **Englisch** verfasst (GRENDEL 2005 a).



Abb. 2: Modulübersicht

⁴ Gimolus (= GIS- und Modellgestützte Lernmodule für umweltorientierte Studiengänge): Projekt zur Entwicklung eines internetbasierten E-Learning-Systems, welches interaktive GIS-Übungen ermöglicht; Laufzeit 2001 - 2003

⁵ geoinformation.net: eine Lernplattform für die multimedia-gestützte Präsenzlehre mit Themen zur Geoinformatik; Laufzeit 2001 - 2003

⁶ GITTA (= Geographic Information Technology Training Alliance): Projekt zur Förderung einer schweizweiten GIS-Ausbildung mit einheitlichen E-Learning-Materialien; Laufzeit 2000 - 2003

Zu Beginn des Projekts entwickelte FerGI die ersten E-Learning-Module in der Lernplattform LearningSpace der Groupware Lotus Notes⁷ (IBM), die sich bereits zuvor in der Aus- und Weiterbildung von Fernstudenten beim Projektpartner an der Uni Hildesheim im Einsatz mehrfach bewährt hat. Den größten Vorteil, den LearningSpace gegenüber anderen Lernplattformen bietet, ist die Offline-Nutzung der Lernmodule durch Installation eines Client auf dem PC des Kursteilnehmers, das heißt mögliche laufende Kosten einer Online-Nutzung entfallen. Im Fall von FerGI lässt sich dieser Nutzen allerdings vernachlässigen, da die E-Learning-Module durch ihren geringen Umfang, wie bereits oben beschrieben, relativ schnell bearbeitet werden können und zum anderen die primäre Zielgruppe der Studenten an ihren jeweiligen Hochschulen mühelos Zugang zum Netz besitzen.

Zudem stellte sich das Problem heraus, dass auf Seiten des Softwareanbieters die Weiterentwicklung von Lotus LearningSpace 2003 eingestellt wurde, so dass die FerGI-Module nun lernplattformunabhängig („offene Lernangebote“) mit HTML und Flash entwickelt werden (Abbildung 3). Die E-Learning-Module können anschließend nach ihrer Fertigstellung wahlweise in unterschiedliche Lernsysteme portiert bzw. eigenständig benutzt werden. Die Integration in andere Lernplattformen wie z.B. Ilias (inklusive Verknüpfung aus Stud.IP⁸ heraus) wird momentan zusammen mit dem „Zentrum zur Unterstützung virtueller Lehre der Universität Osnabrück (virtUOS)“ und Blackboard an der Universität Bonn getestet.

1 Einführung

1.2 Gliederung des Moduls

In diesem Tutorial beschränken wir uns im Folgenden:

- auf → **Flugzeug**, → **Helikopter**- (und tw. Satelliten-)gestützte Sensorplattformen im Gegensatz zu den bodengestützten Systemen (i. d. R. auf Stativen)
- auf Messungen von topographischen Objektpunkten im Gegensatz zu → **bathymetrischen** Anwendungen, für die andere Laserarten eingesetzt werden (siehe hierzu z.B. [Fowler, 2001](#))

Konkret werden getrennt nach Bereichen folgende Fragen beantwortet:

Kapitel 2: Aufnahme	Kapitel 3: Auswertung	Kapitel 4: Anwendungen
Wie erhält man Höhendaten aus Laserdaten?	Wie und warum werden gerasterte Höhenmodelle erstellt?	Welche Vor- und Nachteile bietet das Laserscanning gegenüber anderen Verfahren?
Welche Punktdichten und Streifenbreiten werden erzielt?	Wie wird die Geländeoberfläche aus dem Höhenmodell abgeleitet?	Welche Anwendungen ergeben sich für das Laserscanning?
Welche Höhen- und Lagegenauigkeiten werden erzielt?		

Ausblick

 © Hansa Luftbild

 © TopoSys

© PD Dr.-Ing. Jochen Schiewe, 2004, Universität Osnabrück

Abb. 3: Beispielausschnitt des prototypischen E-Learning-Moduls Airborne Laserscanning

⁷ LotusNotes ist ein dokumentenorientiertes, verteiltes Datenbanksystem mit sehr enger E-Mail-Anbindung, das es vor allem Unternehmen ermöglicht, seine Mitarbeiter vollständig in bestehende Geschäftsprozesse zu integrieren

⁸ Stud.IP ist ein Kursmanagementsystem, das seit WS 2003/2004 flächendeckend an der Universität Osnabrück eingesetzt wird und mit dem Lehrende ein Begleitangebot zu Ihrer Veranstaltung im Netz aufbauen, Anmeldungen zu ihren Veranstaltungen organisieren, Teilnehmerlisten erstellen und ihren Studierenden Ankündigungen, Dateien und sonstige Informationen auf einfache und komfortable Weise zur Verfügung stellen können

1.2 Einsatz

Zum jetzigen Zeitpunkt sind 10 Module fertig gestellt, die unmittelbar nach der Entwicklung an den Hochschulen der Projektpartner sowohl im reinen Selbststudium als auch in Kombination mit der Präsenzlehre („blended learning“) eingesetzt werden. Seit Mitte dieses Jahres können aber auch, wie bereits erwähnt, Interessenten außerhalb der am Projekt beteiligten Hochschulen einen auf ein Semester beschränkten Zugang zu den Modulen unter <http://www.fergi-online.de> erhalten. Dieses einmalige Angebot soll sowohl den Bekanntheitsgrad steigern als auch durch einen entsprechenden Rücklauf von Bewertungsbögen dazu beitragen, die Module nach Überarbeitung an die Wünsche der Nutzer anzupassen. Im Hinblick auf den Aufbau eines zukünftigen Geschäftsmodells stellen vor allem die privaten Nutzer die wichtigste Zielgruppe dar.

Nach der Ankündigung in Fachzeitschriften und auf verschiedenen Fachtagungen, wie z.B. der „DGPF/DDGI-Tagung Innovationen in Aus- und Weiterbildung mit GIS“ in Potsdam oder auf der AGIT in Salzburg, haben sich bereits neben schätzungsweise 300 registrierten Studenten ca. 50 Privatinteressenten zur Nutzung der Modul angemeldet. Trotz fehlender Vergleichsmöglichkeiten zur Nutzungshäufigkeit von anderen E-Learning-Projekten in der Geoinformatik, zeigen diese Zahlen eindeutig, dass ein großes Interesse an Weiterbildung in der Geoinformatik mit Hilfe von E-Learning besteht.

1.3 Evaluation

FerGI zielt neben dem frühzeitigen Einsatz der Module auf eine projektbegleitende Evaluation ab. Durch eine ständige Gegenlesung nach dem peer-review-Prinzip wird nicht nur die Möglichkeit zu Korrekturen gelassen und die Qualitätssicherung, sondern auch eine höhere Akzeptanz und somit häufigere Verwendung gewährleistet. Wenige Monate nach Projektbeginn wurden erste gute Erfahrungen mit dem in Lotus LearningSpace integrierten prototypischen Modul „Airborne Laserscanning“ in Lehrveranstaltungen zur Fernerkundung an der Hochschule Vechta und an der Fachhochschule in Oldenburg gemacht. Sowohl Lehrende als auch Studierende bewerteten den Einsatz als sehr positiv.

Im Allgemeinen kann festgehalten werden, dass die FerGI-Module aus Sicht der Studierenden als leicht verständlich und intuitiv bedienbar empfunden wurden, obwohl ein Großteil der Studierenden zuvor geringe bis gar keine Erfahrung mit E-Learning besessen hat. Vielfach wurden die präsentierten Inhalte im Vergleich zur/zum herkömmlichen Vorlesung/Seminar anregender und vor allem motivierender eingeschätzt. Dennoch konnten die Studenten sich nur in den seltensten Fällen vorstellen, dass zukünftig die traditionelle Präsenzveranstaltung durch reines E-Learning abgelöst werden könnte. Allerdings wurde wie auch häufig bei anderen E-Learning-Projekten von Seiten der Dozenten bzw. Modulbetreuer bemängelt, dass die Kommunikation mit und unter den Studierenden zu selten bis gar nicht stattfand.

1.4 Schlussfolgerung

Es kann festgehalten werden, dass die FerGI-Module was sowohl Inhalt als auch Gestaltung betrifft durchaus als probates Mittel zur Vermittlung von Lehrinhalten im Bereich Geoinformatik mit E-Learning an Hochschulen angesehen werden können. Allerdings bleibt abzuwarten, wie sich die Module im Bereich der Weiterbildung z.B. im Rahmen von geo-kiosk bewähren.

2 Ansätze zur Nachhaltigkeit des E-Learning-Projekts

Bisher gibt es nur wenige E-Learning-Projekte an deutschen Hochschulen, die nach Ablauf ihrer Förderperiode dem Anspruch der Nachhaltigkeit nachkommen konnten. Dies ist sicherlich darin begründet, dass durch die staatliche Finanzierung der meisten Projekte das Ziel zum Ende der Projekte hin sich finanziell tragen zu müssen, zunächst nicht mehr im Vordergrund steht, sondern in erster Linie die Entwicklung von inhaltlichen und technischen Lösungen zur Umsetzung der zu vermittelnden Inhalte. So sind zu allererst die Studenten in den jeweiligen Hochschulen die Zielgruppe der E-Learning-Angebote, wie die umfassende Marktstudie unter Entwicklern, Anbietern und Nutzern von E-Learning-Angeboten im GIS-Bereich gezeigt hat (GRENDUS et al. 2004). Ein wichtiges Ergebnis dieser Marktstudie ist, dass es eine große Vielfalt an unterschiedlich bekannten E-Learning-Materialien gibt (einen Überblick gibt es unter folgender Seite: <http://www.gin-online.de/elearning>). Diese liegen aber sehr zerstreut vor, sodass eine Unübersichtlichkeit für potentielle Nutzer existiert, die sich negativ auf den Bekanntheitsgrad und die Nachfrage auswirkt. Die Nachfrage nach E-Learning-Angeboten ist somit aufgrund fehlender Markt- und Marketingstrategien verschwindend gering.

Aus dem Projekt FerGI heraus ist daher eine projektübergreifende E-Learning-Initiative Geoinformatik (PELIG) geschaffen worden, welche die Vernetzung mit anderen Projekten aus den Disziplinen der Geoinformatik und Geographie in Zusammenarbeit mit kommerziellen E-Learning-Anbietern fördern soll. Konkrete Zielsetzung hierbei ist die Entwicklung eines gemeinsamen Organisations- und Geschäftsmodells, das eine Bündelung der E-Learning-Materialien und zugehöriger Dienstleistungen zum Angebot für Hochschulen und Weiterbildungsinstitutionen im In- und Ausland vorsieht. Inzwischen sind die Bestrebungen der Initiative in das Verbundvorhaben „geo-kiosk“ (Abbildung 4) gemündet, welches im Rahmen der Fördermaßnahme „E-Learning-Dienste für die Wissenschaft“ (Förderlinie b: E-Learning-Wissenstransfer) in absehbarer Zeit unterstützt werden soll.

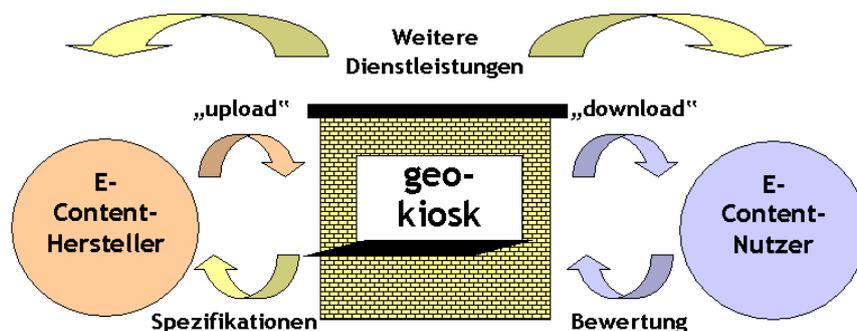


Abb. 4: Grobkonzept des geo-kiosk-Portals

3 Literaturverzeichnis

- GRENDUS, B., (2005 a): Projekt Fernstudienmaterialien Geoinformatik (FerGI) - Geoinformatik-Module: klein und qualitativ hochwertig. In: nordmedia - Die Mediengesellschaft Niedersachsen/Bremen mbH - Kompetenzzentrum eLearning Niedersachsen (Hrsg.) (2005): eLearning Niedersachsen. Hannover
- GRENDUS, B., HARZER, B. & SCHIEWE, J., (2005 b): Ergebnisse einer Umfrage unter Entwicklern, Anbietern und Nutzern von E-Learning-Angeboten im GIS-Bereich. 1. GIS-Ausbildungstagung, Potsdam, CD-ROM.
- SCHIEWE, J., 2004: Fernstudienmaterialien Geoinformatik (FerGI): Konzeption und erste Erfahrungen. In: Schiewe, J. (Hrsg.) (2004): E-Learning in Geoinformatik und Fernerkundung. Wichmann-Verlag. Heidelberg

Metrische 3-D-Vermessung einer Straßenszene mit Spezialwissen unter minimaler Interaktion

Erweiterte monokulare Rekonstruktion

MICHAEL TRUMMER¹, HERBERT SÜßÉ², JOACHIM DENZLER³, FRANK DITRICH⁴

Zusammenfassung: Das bisher von der Polizei in Baden-Württemberg eingesetzte Verfahren zur Vermessung von Unfallszenen basiert auf der Berechnung der projektiven Transformation der Straßen in die Bildebene anhand von Punktreferenzen. Hierzu werden per Hand Markierung auf die Fahrbahn aufgetragen und vermessen, um mittels CAD- und Bildkoordinaten aus mehreren Aufnahmen über Ausgleichsrechnung die projektive Transformation zu bestimmen. Naturgemäß ist dieses 2-D-Verfahren auf die Straßenebene beschränkt und die Ergebnisse weisen Fehler auf, sobald die Straßenoberfläche nicht ideal planar ist. Um nun Abstände zwischen beliebigen Raumpunkten der Unfallszene bestimmen zu können, wird als neuer Ansatz die partielle 3-D-Rekonstruktion der Szene, nämlich der Referenz sowie der zu vermessenden Raumpunkte gewählt. Dabei kommt eine Erweiterung der monokularen Rekonstruktion eines Vierecks zum Einsatz, welche als a-priori-Wissen die CAD-Koordinaten dieses Vierecks und die internen Parameter der Kamera benötigt und die Interaktion am Einsatzort auf ein Minimum beschränkt.

1 Einleitung

Bei der Analyse von Verkehrsunfällen kommen Mittel der digitalen Bildverarbeitung zum Einsatz, insbesondere weil Sachverständige nicht immer vor Ort sein können. Zum Aufklären des Unfallhergangs und der Schuldfrage kann es z.B. nötig sein, aus Bildern der Unfallszene Abstände von Trümmerteilen oder die Länge einer Bremsspur zu messen. Zu diesem Zweck hat vor zwei Jahren bei der Firma DAKO in enger Zusammenarbeit mit der Polizeidirektion Freiburg die Entwicklung eines entsprechenden Programms begonnen, das Ergebnis ist das 2-D-Vermessungssystem DAKO-MESS. Dieses Programm ermöglicht Vermessungen in der Straßenebene mit dem folgenden Verfahren. Bei der Abbildung in die Bildebene gemäß Lochkammermodell wird die Straßenebene einer zweidimensionalen projektiven Transformation unterworfen. Diese hat acht Parameter. Folglich sind vier Punktkorrespondenzen zwischen Straßen- und Bildebene vonnöten, um die Transformation zu berechnen (2 Gleichungen je Punktkorrespondenz macht $4 \cdot 2 = 8$ Gleichungen für 8 Unbekannte), s. Abb. 1. Mit mehr als vier Korrespondenzen ist Ausgleichsrechnung zur Fehlerkompensation nötig. Das Verfahren sieht also vor, dass mindestens vier Punkte per Hand auf der Straße markiert und vermessen werden. Dies liefert die metrischen CAD-Koordinaten der Referenzpunkte. Anhand dieser Koordinaten und der entsprechenden Bildkoordinaten wird die projektive Transformation von der Bild- in die Straßenebene berechnet. Schließlich wird, zur Vermessung zweier Punkte der Straßenebene, die ermittelte Transformation auf die Koordinaten der entsprechenden Bildpunkte angewendet und der Euklidische Abstand der transformierten Koordinaten bestimmt.

¹ trummer@minet.uni-jena.de

² Dr. rer. nat. habil. Herbert Süße, nbs@uni-jena.de

³ Prof. Dr.-Ing. Joachim Denzler, Friedrich-Schiller-Universität Jena, Fakultät für Mathematik und Informatik, Lehrstuhl für Digitale Bildverarbeitung, Ernst-Abbe-Platz 2, 07743 Jena, denzler@informatik.uni-jena.de, www.inf-cv.uni-jena.de

⁴ ditrich@minet.uni-jena.de

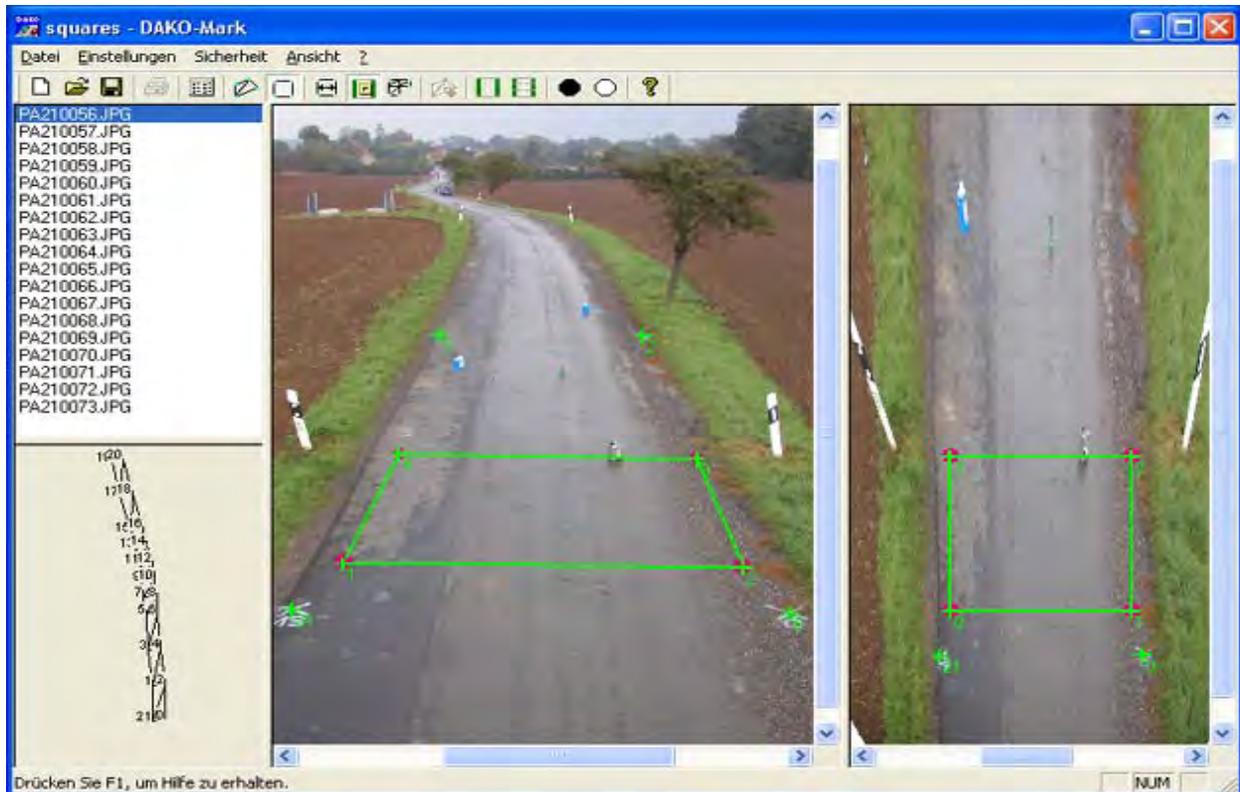


Abb. 1: DAKO-MESS

Grundlage von DAKO-MESS ist also die projektive Transformation einer Ebene (der Straßenebene) in die Bildebene. Wenn nun aber die Straßenoberfläche nicht eben ist oder Punkte zu vermessen sind, die nicht in der Straßenebene liegen (z.B. Trümmerteile im Straßengraben), dann ist dieses Verfahren aufgrund seiner Konzeption nicht anwendbar.

Deswegen ist eine Methode gesucht, welche die Vermessung von 3-D-Punkten ermöglicht, dazu Spezialwissen verwendet und die notwendige Interaktion möglichst gering hält, um dem Nutzer die Anwendung nicht zu erschweren.

2 Erweiterte monokulare Rekonstruktion

2.1 Ansatz

Zur Vermessung einer Strecke im Raum werden aus mindestens zwei Bildern die Endpunkte im Dreidimensionalen rekonstruiert und deren Abstand berechnet. Das Ziel, mit minimaler Interaktion am Einsatzort möglichst genaue Ergebnisse stabil und robust zu erhalten, wird durch Separierung des Problems erreicht.

2.2 Spezialwissen

Als a-priori-Wissen werden die internen Kameraparameter, einschließlich Verzeichnungsparameter, verwendet sowie die CAD-Koordinaten eines in die Szene eingebrachten planaren Vierecks. Diese Daten für Kamera und Referenzviereck müssen nur einmal ermittelt werden, was im Vorfeld des Einsatzes im Labor erfolgt.

2.3 Interaktion

Nachdem das Referenzviereck in die Szene gelegt ist (je nach Entfernung zur Kamera z.B. ein A4-Blatt oder ein entsprechend größeres Viereck), beschränkt sich die Nutzerinteraktion auf das Markieren der zu vermessenden Punkte je Bild. Für die Selektion der abgebildeten Eckpunkte des Referenzvierecks ist eine Automatik vorgesehen (z.B. mit Hilfe von unterschiedlichen farbigen Markierungen). Allgemeiner formuliert, muss vom Nutzer je Aufnahme das Abbild des Raumpunktes markiert werden, der Euklidisch rekonstruiert werden soll. Der Aufwand vor Ort ist minimal, da lediglich das Referenzviereck plaziert werden muss. Unter dem Gesichtspunkt geringen Aufwands ist natürlich auch die Zahl der Referenzpunkte möglichst niedrig zu wählen. Doch bei Dreiecken führt das Verfahren zu nichtlinearen Gleichungssystemen (vgl. VOSS et al., 1995), die hier umgangen werden. Wenn zudem als spezielles Viereck ein Quadrat gewählt wird, so ist es gleichgültig, bei welchem Eckpunkt mit der Auswahl im Bild begonnen wird.

2.4 Vorgehensweise

Zunächst betrachtet man ein einzelnes Bild. Mit dem a-priori-Wissen ist es möglich, aus den Bildkoordinaten der Eckpunkte des planaren Vierecks selbige im Raum Euklidisch zu berechnen. Man erhält die Lage dieser vier Punkte im Raum mit dem Projektionszentrum der Kamera als Koordinatenursprung. Das ist die **monokulare Rekonstruktion**.

Die **Erweiterung** bezieht sich auf die Verwendung mehrerer Bilder/Kameras.

Man hat also je Bild die Lage der Eckpunkte des Referenzvierecks im Raum, aber in unterschiedlichen Koordinatensystemen (nämlich bezogen auf das jeweilige Projektionszentrum). Da nun die monokulare Rekonstruktion Euklidisch ist, kann man die Koordinatensysteme durch Rotation und Translation zur Deckung bringen (bei Abwesenheit von Fehlern). Dies ergibt die externen Parameter einer jeden Kamera in Bezug zur ersten.

Damit sind die vollständigen Abbildungsmatrizen bekannt und Triangulation ist möglich.

2.4.1 Monokulare Rekonstruktion

Es wird mit einem Bild gearbeitet. Seien $\mathbf{y}^{(i)} = (y_1^{(i)} \ y_2^{(i)})^T$ (stets $i = 1, \dots, 4$) die bekannten CAD-Koordinaten der Eckpunkte des Referenzvierecks und $\mathbf{x}^{(i)} = (x_1^{(i)} \ x_2^{(i)})^T$ die zugehörigen Bildkoordinaten. Dann bezeichnet $\mathbf{X}^{(i)} = (X_1^{(i)} \ X_2^{(i)} \ X_3^{(i)})^T$ die entsprechenden 3-D-Punkte, $\tilde{\mathbf{y}}/\tilde{\mathbf{x}}/\tilde{\mathbf{X}}$ zeigt jeweils die Schreibweise in homogenen Koordinaten an, $\tilde{\mathbf{y}}^{(i)} = (y_1^{(i)} \ y_2^{(i)} \ 1)^T$ usw. \sim steht für Gleichheit bis auf einen Faktor, Vektoren sind stets Spaltenvektoren.

Die Punkte $\mathbf{X}^{(i)}$ liegen in einer Ebene im Raum (die im Raum eingebettete CAD-Ebene), lassen sich also in der Form

$$\mathbf{X}^{(i)} = \mathbf{d} + y_1^{(i)} \mathbf{e}^{(1)} + y_2^{(i)} \mathbf{e}^{(2)} \quad (1)$$

schreiben, wobei \mathbf{d} der Ursprung der CAD-Ebene im Raum ist und $\mathbf{e}^{(1)}$, $\mathbf{e}^{(2)}$ die normierten Einheitsvektoren der Achsen.

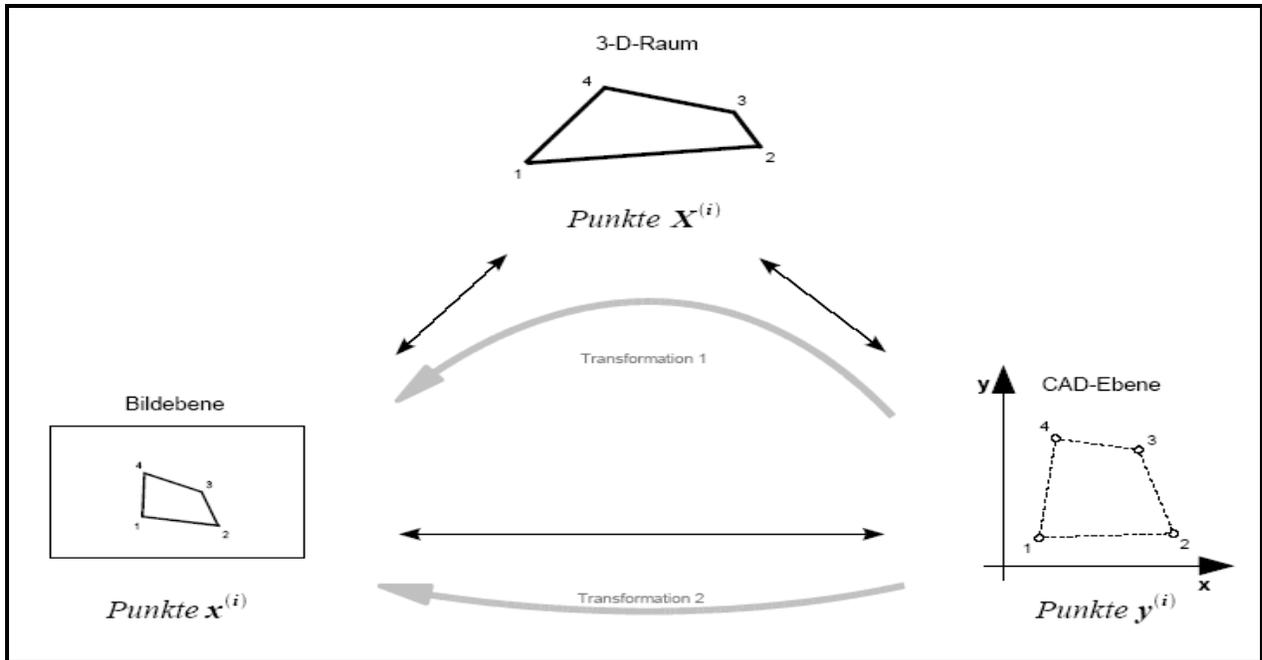


Abb. 2: Betrachtete Transformationen bei der monokularen Rekonstruktion

Die Punkte $x^{(i)}$ sind die (nach Möglichkeit von Verzeichnung befreiten) Bildpunkte der $X^{(i)}$, somit

$$\tilde{x}^{(i)} \sim P \tilde{X}^{(i)}$$

mit der Abbildungsmatrix P der Kamera. Da aber der Ursprung des Koordinatensystems in das Kamerazentrum gelegt und die Kameraorientierung gemäß Einheitsmatrix I_3 gesetzt wurde, vereinfacht sich die Abbildungsgleichung zu

$$\tilde{x}^{(i)} \sim K X^{(i)}.$$

Zusammen mit der Beziehung (1) ergibt sich

$$\tilde{x}^{(i)} \sim K d + K y_1^{(i)} e^{(1)} + K y_2^{(i)} e^{(2)} \quad (2)$$

mit der Matrix der internen Kameraparameter

$$K = \begin{pmatrix} \alpha_x & s & u_0 \\ 0 & \alpha_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Dies ist die erste Transformation gem. Abb. 2.

Andererseits existiert eine zweidimensionale projektive Transformation H von der CAD- in die Bildebene (Transformation 2 gem. Abb. 2), sodass

$$\tilde{x}^{(i)} \sim H \tilde{y}^{(i)}.$$

Sei nun $H = (h_1, h_2, h_3)$, dann ist leicht nachzurechnen, dass

$$\tilde{\mathbf{x}}^{(i)} \sim \mathbf{h}_1 y_1^{(i)} + \mathbf{h}_2 y_2^{(i)} + \mathbf{h}_3. \quad (3)$$

Aus den Gleichungen (2) und (3) ergibt sich jetzt durch Koeffizientenvergleich bzgl. der $y_j^{(i)}$ ($j=1,2$)

$$\begin{pmatrix} K \mathbf{e}^{(1)} \\ K \mathbf{e}^{(2)} \\ K \mathbf{d} \end{pmatrix} \sim \begin{pmatrix} \mathbf{h}_1 \\ \mathbf{h}_2 \\ \mathbf{h}_3 \end{pmatrix}.$$

Man erhält also drei lineare Gleichungssysteme, die sehr simpel zu lösen sind, da K bereits in Zeilenstufenform ist (obere Dreiecksmatrix). Wegen der zugrundeliegenden projektiven Beziehungen gilt die Gleichheit aber nur bis auf einen gemeinsamen Faktor, der jedoch durch die Forderungen $|\mathbf{e}^{(1)}|=1$ oder $|\mathbf{e}^{(2)}|=1$ oder praktisch besser $|\mathbf{e}^{(1)}| \cdot |\mathbf{e}^{(2)}|=1$ leicht zu eliminieren ist. Folglich ergeben sich die Vektoren \mathbf{d} , $\mathbf{e}^{(1)}$, $\mathbf{e}^{(2)}$ und damit die Punkte $\mathbf{X}^{(i)}$, indem man mit linearen Mitteln eine projektive Transformation bestimmt und drei lineare Gleichungssysteme löst.

2.4.2 Bestimmung einer Euklidischen 3-D-Transformation aus Punktkorrespondenzen

Man betrachtet nun n Bilder ($n>1$). Mit der monokularen Rekonstruktion erhält man für das Referenzviereck n verschiedene Euklidische 3-D-Rekonstruktionen mit Punkten ${}^{(j)}\mathbf{X}^{(i)}$ (Punkt i im Bild j , $j=1,\dots,n$). Es ist bekannt, dass sich aus unterschiedlichen Bildern rekonstruierte Punkte ${}^{(k)}\mathbf{X}^{(i)}$, ${}^{(l)}\mathbf{X}^{(i)}$ ($1 \leq k, l \leq n$, $k \neq l$) nur durch Rotation und Translation unterscheiden. Im Dreidimensionalen braucht man zur Bestimmung dieser Transformationen drei nicht kollineare Punkte. Nun hat man aber vier gestörte Punktkorrespondenzen und gesucht ist somit die beste Lösung für die Euklidische Transformation im Sinne der kleinsten Defektquadrate. Also sind für Punkte aus Bildern k und l die Rotationsmatrix R und der Translationsvektor \mathbf{t} gesucht, zu lösen ist das Ausgleichsproblem

$$\sum_{i=1}^4 \| {}^{(k)}\mathbf{X}^{(i)} - (R {}^{(l)}\mathbf{X}^{(i)} + \mathbf{t}) \|^2 \rightarrow \text{Minimum},$$

R Rotationsmatrix.

Wegen der nichtlinearen Restriktionen an die Orthonormalmatrix R ist dieses Problem schwierig. Beherrschbar wird es, indem die Transformationen als duale Einheitsquaternionen dargestellt werden, vgl. WALKER et al., 1991. Dadurch kann das oben formulierte Ausgleichsproblem auf ein Eigenwertproblem zurückgeführt werden. So wird die Matrix

$$[\tilde{RT}]^{(l,k)} = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_1 \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_2 \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

auf direktem Weg stabil berechnet und ist zudem die Lösung im Sinne der kleinsten Fehlerquadrate.

Damit sind aber Rotation und Translation zwischen den Kameras bekannt.

2.4.3 Rekonstruktion

Indem man die äußeren Parameter der ersten Kamera auf I_4 setzt und für weitere Kameras/Bilder k ($1 < k \leq n$) die Transformation $[\tilde{RT}]^{(1,k)}$ bestimmt, sind die äußeren Parameter aller Kameras (bzgl. der ersten) bekannt. Mit

$$\tilde{K} = \begin{pmatrix} \alpha_x & s & u_0 & 0 \\ 0 & \alpha_y & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

und

$${}^{(j)}P = \tilde{K} \cdot [\tilde{RT}]^{(1,j)}$$

ist die vollständige Abbildungsmatrix einer jeden Kamera verfügbar.

Für Bildpunkte (Korrespondenzen) ${}^{(j)}\tilde{\mathbf{x}}$ und deren unbekanntes Urbild $\tilde{\mathbf{X}}$ im Raum gilt ${}^{(j)}\tilde{\mathbf{x}} \sim {}^{(j)}P \tilde{\mathbf{X}}$, folglich

$${}^{(j)}\tilde{\mathbf{x}} \times ({}^{(j)}P \tilde{\mathbf{X}}) = 0. \quad (4)$$

Da aber ein Bildpunkt nur zwei Koordinaten hat, kann er höchstens zwei unabhängige Gleichungen liefern, die für die Triangulation verwendbar sind. Wenn man nun die Abbildungsmatrix der j -ten Kamera aufschreibt in der Form

$${}^{(j)}P = \begin{pmatrix} {}^{(j)}\mathbf{p}_1^T \\ {}^{(j)}\mathbf{p}_2^T \\ {}^{(j)}\mathbf{p}_3^T \end{pmatrix},$$

dann wählt man aus dem Vektorprodukt (4) z.B. die ersten beiden Zeilen und erhält als Ausgleichsproblem das homogene lineare Gleichungssystem $A \tilde{\mathbf{X}} = 0$ mit

$$A = \begin{pmatrix} {}^{(1)}\mathbf{p}_1^T - {}^{(1)}\tilde{x}_1 {}^{(1)}\mathbf{p}_3^T \\ {}^{(1)}\tilde{x}_2 {}^{(1)}\mathbf{p}_3^T - {}^{(1)}\mathbf{p}_2^T \\ \vdots \\ {}^{(n)}\mathbf{p}_1^T - {}^{(n)}\tilde{x}_1 {}^{(n)}\mathbf{p}_3^T \\ {}^{(n)}\tilde{x}_2 {}^{(n)}\mathbf{p}_3^T - {}^{(n)}\mathbf{p}_2^T \end{pmatrix}.$$

Gesucht ist $\tilde{\mathbf{X}} \neq (0,0,0,0)^T$ als Lösung im Sinne kleinster Fehlerquadrate. Dies wird erreicht mit Hilfe der Singulärwertzerlegung,

$$A = UDV^T,$$

und $\tilde{\mathbf{X}}$ ist die zum betragsmäßig kleinsten Singulärwert gehörende Spalte von V .

Zwischen den rekonstruierten Punkten $\tilde{\mathbf{X}}$ kann man nun leicht den Euklidischen Abstand berechnen.

3 Ergebnisse

Zum Testen des Verfahrens wurden Messungen in verschiedenen Szenen durchgeführt. Dabei haben sich vor allem die Winkel zwischen den optischen Achsen der Kameras sowie zwischen optischer Achse und der Ebene des Referenzvierecks als einflussreiche Größen gezeigt. Mit dem ersten Parameter für den Fehler (Winkel zwischen optischen Achsen) ist jede photogrammetrische Methode konfrontiert, der zweite ist verfahrensspezifisch.

In einer Straßenszene (s. Abb. 3) wurde ein Fahrzeug mit ca. 10 m Abstand zur Kamera in zwei Bildern vermessen. Der Winkel zwischen den optischen Achsen lag bei $13,8^\circ$, die Winkel zwischen den optischen Achsen und dem Viereck bei $12,2^\circ$ bzw. $16,9^\circ$. Diese Werte erwiesen sich als für die Vermessung suboptimal und bedingten relative Fehler von 2% bis 3%.

Es kann jedoch gezeigt werden, dass bei günstigen Bedingungen der relative Messfehler unter 1% liegt (s. Abb. 4). Diese günstigen Bedingungen sind praktisch leicht zu realisieren, indem das Referenzviereck aufgerichtet und damit aus steilem Winkel ($>30^\circ$) abgebildet wird und zwischen mindestens zwei Aufnahmen eine ausreichend große Bewegung stattfindet (ebenso $>30^\circ$ zwischen optischen Achsen bei Ausrichtung auf das Objekt). Die in Abb. 4 dargestellten Fehlerwerte wurden erhalten, indem ein 70,2 cm großes Objekt in einem Abstand von 7,76 m zur ersten Kamera in jeweils zwei Bildern vermessen wurde.

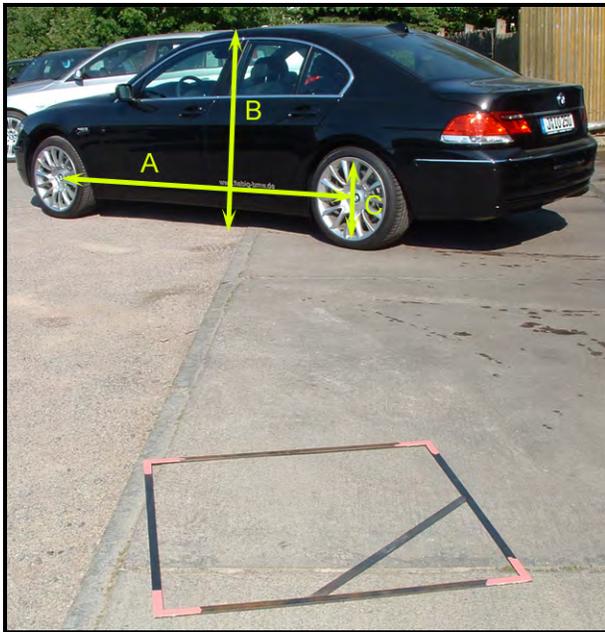


Abb. 3: Vermessung in einer Straßenszene⁵, ermittelte Werte (relativer Fehler bzgl. Ground-Truth-Daten), **A**: 305,7 cm (2,2 %), **B**: 152,3 cm (2,2 %), **C**: 49,4 cm (2,7 %)

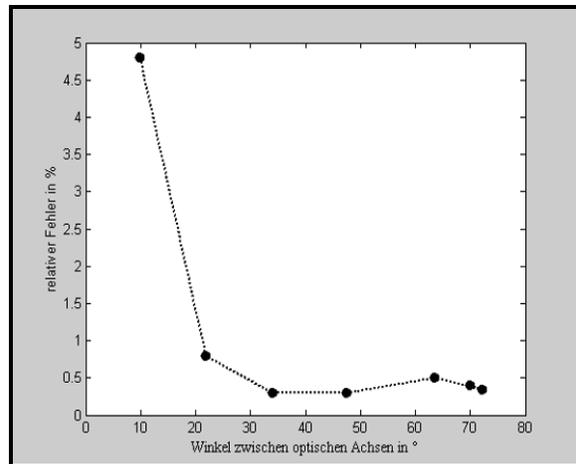


Abb. 4: Vermessung in zwei Bildern mit unterschiedlichen Kamerapositionen

4 Zusammenfassung

Das hier vorgestellte Verfahren hat zum Ziel, Spezialwissen anzuwenden, um metrische 3-D-Vermessung mit absolut minimaler Interaktion am Einsatzort und bei der Nachbereitung am

Rechner zu realisieren, dabei mathematisch stabile und gegen Fehler robuste Ergebnisse zu liefern.

Dieses Ziel wird durch die Separierung des Problems erreicht (monokulare Rekonstruktion – Euklidische Transformation – Rekonstruktion). Durch diese Zerlegung erhält man mathematisch voll beherrschbare Teilprobleme, kann diese direkt und stabil lösen (jeweils Lösungen im Sinne kleinster Fehlerquadrate) und beherrscht damit das gesamte Problem. Hier unterscheidet sich das Verfahren von vergleichbaren, z. Bsp. ZHANG, 2000. Die benötigten Eingaben (Kameraparameter, Koordinaten des Vierecks) müssen nur einmal im Labor ermittelt werden. Die Interaktion vor Ort beschränkt sich auf das Plazieren des Referenzvierecks und ist damit minimal.

5 Literatur

- VOSS, K., NEUBAUER, R. & SCHUBERT, M., 1995: Monokulare Rekonstruktion für Robotvision – Verlag Shaker, Aachen, S. 76 ff.
- HARTLEY, R. & ZISSERMAN, A., 2002: Multiple View Geometry in Computer Vision, Second Edition – Cambridge University Press, Cambridge, S. 312 f.
- TRUCCO, E. & VERRI, A., 1998: Introductory Techniques for 3D Computer Vision – Prentice-Hall, New Jersey
- FAUGERAS, O., 1996: Three-Dimensional Computer Vision: A Geometric Viewpoint– MIT Press, Cambridge
- WALKER, M.W., SHAO, L. & VOLZ, R.A., 1991: Estimating 3D location parameters using dual number quaternions – Computer Vision, Graphics and Image Processing: Image Understanding, Vol. 54, S. 358 – 367
- ZHANG, Z., 2000: A flexible new technique for camera calibration – IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 22(11): S. 1330-1334

Genauigkeitsparameter der digitalen Photogrammetrie

VESELINA DENCHEVA¹, KARL KRAUS²

Zusammenfassung: Über die Qualität der Auswertergebnisse, die aus digitalisierten bzw. digitalen Luftbildern entstehen, gibt es verhältnismäßig wenig Literatur. Es fehlen sowohl Konzepte zur Erstellung von Qualitätsparametern als auch Zahlenangaben. In diesem Beitrag werden Konzepte zur Ableitung von Genauigkeitsparametern, den wichtigsten Qualitätsparametern, vorgestellt. Diese Konzepte werden anhand eines umfangreichen Zahlenmaterials erprobt. Die Ergebnisse aus diesem Zahlenmaterial werden analysiert und einige Aussagen über die Leistungsfähigkeit der digitalen Photogrammetrie werden gemacht.

1 Einleitung

Der Schwerpunkt des Vortrages liegt in der Ableitung von Genauigkeitsparametern für die dreidimensionale linienweise Auswertung. Da die auf dem Markt befindlichen photogrammetrischen Auswertesysteme für eine dreidimensionale linienweise Auswertung noch keine Automatik anbieten, werden vor allem die Genauigkeitsparameter für die manuelle dreidimensionale Linienauswertung ermittelt. Es wird aber auch das Potenzial einer automatischen dreidimensionalen Linienauswertung zahlenmäßig erschlossen. Die Linien werden mit aktiven Konturlinien (Snakes) modelliert, ein bekanntlich halbautomatisches Verfahren.

2 Konzepte zur Ableitung von Genauigkeitsparametern

Zuerst wird auf die Genauigkeitsparameter der punktweisen Messung, die die Vorstufe der linienweisen Messung ist, eingegangen. Wir beschränken uns auf die manuelle dreidimensionale Punktmessung. Die automatische punktweise Messung ist die Kernprozedur der Aerotriangulation. Sie ist heutzutage sehr erfolgreich im praktischen Einsatz. Über die automatische Aerotriangulation gibt es auch viele Genauigkeitsuntersuchungen (ROTTENSTEINER & PRINZ, 1996; KACZYNSKI ROMUALD ZIOBRO JAN, 1999; HEIPKE & KONRAD, 1999).

Genauigkeitsparameter kann man aus Messreihen schätzen. Die statistischen Schätzungen sind sehr von den Messbedingungen abhängig, in der Photogrammetrie von der Qualität des Bildmaterials, von der Definitionsunsicherheit der Punkte und Linien, etc. Dem Anwender kommen statistische Schätzungen auf der Basis umfangreicher Messreihen sehr entgegen. Sie repräsentieren die Genauigkeit für ein konkretes Projekt, das auch als Experiment bezeichnet werden kann. Theoretische Genauigkeitsmodelle, die aus der Fortpflanzung von a-priori angenommenen Varianzen und Kovarianzen entstehen, sind dagegen für das konkrete Projekt nicht repräsentativ genug. Für ein großes Projekt sollte man sich umfangreiche Messreihen zur Schätzung der Genauigkeitsparameter beschaffen. In diesem Beitrag wird ein Konzept vorgestellt, wie man die statistische Analyse der umfangreichen Messreihen durchführen kann.

¹ Dipl.-Ing. Veselina Dencheva, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung (I.P.F.), Technische Universität Wien, A-1040 Wien, Gusshausstrasse 27-29, e-mail: veselinadencheva@yahoo.com

² o. Univ.-Prof Dr. Karl Kraus, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung (I.P.F.), Technische Universität Wien, A-1040 Wien, Gusshausstrasse 27-29, e-mail: kk@ipf.tuwien.ac.at

Die besten Bedingungen für die statistische Analyse wären Messergebnisse mit einer übergeordneten Genauigkeit als Referenz. Das Ergebnis mit einer solchen Referenz ist die absolute Genauigkeit. Der Aufwand zur Beschaffung von Messungen mit einer übergeordneten Genauigkeit ist allerdings in der Regel zu aufwendig. Man begnügt sich in der Regel mit der Analyse der Abweichungen der Wiederholungsmessungen in der jeweiligen Projektumgebung. Das Ergebnis ist die relative Genauigkeit.

2.1. Genauigkeitsparameter der punktweisen Auswertung

Wir gehen davon aus, dass für ein Experiment der Bildmaßstab, die Kamerakonstante, das Basis/Höhenverhältnis, der Filmtyp, die Pixelgröße und das Auswertesystem unverändert bleiben. Es variieren aber die Punktarten (Hausecken, Punkte auf Dachfirste, ...). Aus Wiederholungsmessungen der verschiedenen Punkte bekommt man die Koordinatengenauigkeit - repräsentativ für **eine** Messung - wie folgt:

$$\sigma_{rel,X}^P = \sqrt{\frac{\sum (X_i - \bar{X})^2}{n-u}} \quad \sigma_{rel,Y}^P = \sqrt{\frac{\sum (Y_i - \bar{Y})^2}{n-u}} \quad \sigma_{rel,Z}^P = \sqrt{\frac{\sum (Z_i - \bar{Z})^2}{n-u}} \quad (1)$$

n ... Anzahl aller Messungen für eine Punktart

u ... Anzahl der Punkte innerhalb einer Punktart

$\bar{X}, \bar{Y}, \bar{Z}$... arithmetisches Mittel für den jeweiligen Punkt aus den Wiederholungsmessungen

Die Gleichung (1) kann man aus der Sicht der Ausgleichung nach der Methode der kleinsten Quadrate wie folgt interpretieren: Die Koordinaten der einzelnen Punkte einer Punktart sind die Unbekannten; zu ihrer Bestimmung gibt es n Beobachtungen; dann ergibt sich die Genauigkeit einer Beobachtung, also einer gemessenen Koordinate aus der bekannten Beziehung

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum vv}{(n-u)}}.$$

Gleichung (1) liefert die relativen Genauigkeiten. Die absoluten Koordinatengenauigkeiten erhält man, wenn man an die Stelle der Mittelwerte $\bar{X}, \bar{Y}, \bar{Z}$ die wahren Werte einsetzt und $u=0$ setzt.

Bei umfangreichen Messreihen treten auch grobe Messfehler auf. Zu ihrer Elimination werden

- bevorzugt die Medianwerte $X_{med}, Y_{med}, Z_{med}$ verwendet,
- die einzelnen Messungen mit den Medianwerten verglichen und
- den Schwellwerten 3σ gegenübergestellt:

$$|X_i - X_{med}| \leq 3\sigma_X \quad |Y_i - Y_{med}| \leq 3\sigma_Y \quad |Z_i - Z_{med}| \leq 3\sigma_Z \quad (2)$$

Die Standardabweichungen $\sigma_X, \sigma_Y, \sigma_Z$ bekommt man aus den Gleichungen (1). Da sie anfangs von groben Fehlern beeinflusst sein können, werden einige Iterationen nötig sein.

2.2. Genauigkeitsparameter der linienweisen Auswertung

Wir beginnen mit der manuellen linienweisen Auswertung. Sie ist immer noch die gebräuchlichste Methode der auf dem Markt befindlichen photogrammetrischen Auswertesysteme.

2.2.1. Genauigkeitsparameter der manuellen linienweisen Auswertung

Für ein Experiment einer linienweisen Auswertung gelten die gleichen Rahmenbedingungen wie sie bei der punktweisen Auswertung erwähnt wurden. Es variieren nur die Linienarten (Gehsteigskanten, Firstlinien der Dächer, Linien im flachen Gelände, ...). Die linienweisen Auswertungen werden mehrmals wiederholt. Das topographische Modell einer Linie wird als Polygonzug angenommen. Die Diskrepanzen zwischen zwei Linienmessungen sind die Abstände d_R der Punkte einer Linie von den Geraden g durch die Punkte der anderen Linie (Abb. 1).

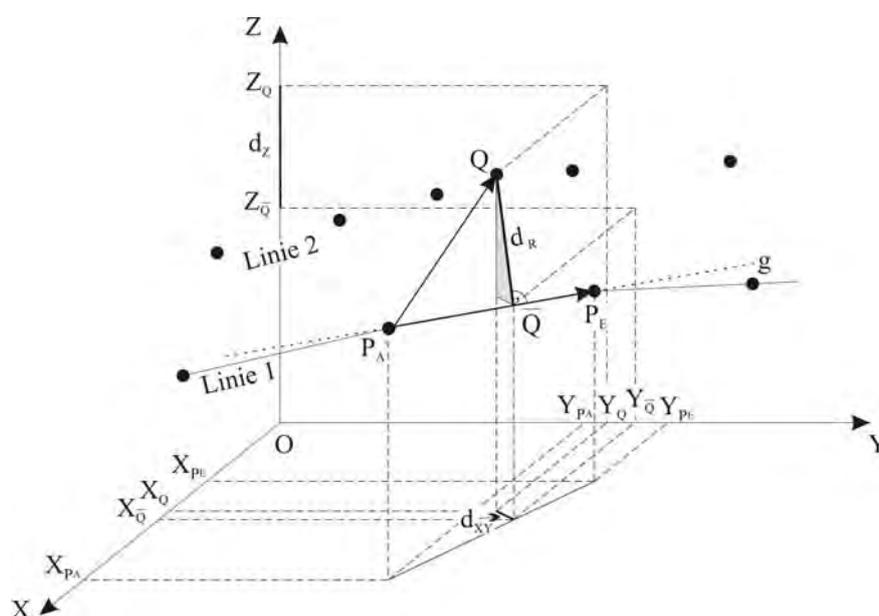


Abb. 1: Diskrepanzen von zwei dreidimensionalen Linien

Die Formeln zur Berechnung der Diskrepanzen d_R findet man z.B. bei DENCHEVA (2005). Da wir an den unterschiedlichen Lage- und Höhengenaugigkeiten interessiert sind, wird die räumliche Diskrepanz d_R in die Lagediskrepanz d_{XY} und Höhendiskrepanz d_Z aufgeteilt:

$$d_Z = Z_Q - Z_{\bar{Q}} \quad d_{XY} = \sqrt{d_R^2 - d_Z^2} \quad (3)$$

Da bei der Bestimmung der relativen Genauigkeit keine der beiden Linien (Abb. 1) einen Vorzug genießt, werden für die Punkte der Linie 1 auch die Diskrepanzen von den Geraden durch die Punkte der Linie 2 berechnet. Die relative Genauigkeit einer Linie aus Wiederholungsmessungen der verschiedenen Linien bekommt man auf folgende Weise:

$$\sigma_{rel,XY}^{Linie} = \sqrt{\frac{\sum \bar{d}_{rel,XY}^2}{m}} \quad \sigma_{rel,Z}^{Linie} = \sqrt{\frac{\sum \bar{d}_{rel,Z}^2}{m}}$$

$$\sigma_{rel,R}^{Linie} = \sqrt{(\sigma_{rel,XY}^{Linie})^2 + (\sigma_{rel,Z}^{Linie})^2} \quad (4)$$

m ... Anzahl aller Diskrepanzen für alle Linien einer Linienart

Die Verwendung des Querstriches bei den Diskrepanzen \bar{d} deutet das Problem an, dass quadratische Mittelwertbildungen in der Statistik - wie in den Gleichungen (4) - nur dann erlaubt sind, wenn alle Diskrepanzen a-priori die gleiche Genauigkeit haben. Ansonsten sind Gewichte für die einzelnen Diskrepanzen einzuführen oder alle Diskrepanzen sind rechnerisch auf ein gleiches Genauigkeitsniveau zu bringen. Wir schlagen den zweiten Weg ein.

Der Zweite Autor stand vor längerer Zeit (KRAUS & BETTIN, 1970) im Rahmen der photogrammetrischen Katastervermessung vor einem vergleichbaren Problem. Die dort gefundene Lösung kann auf dieses Problem übertragen werden. Es ist in der Abb. 2 skizziert.

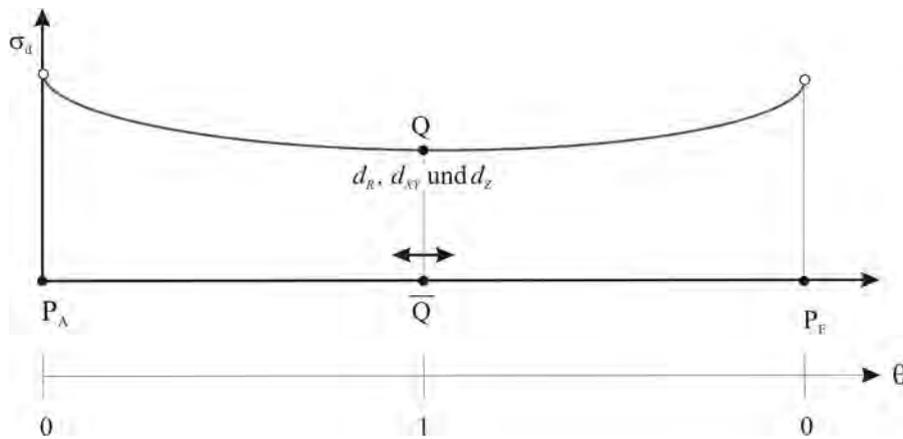


Abb. 2: Genauigkeit der Diskrepanzen d_R, d_{XY}, d_Z in Abhängigkeit von der Position der gemessenen Punkte P_A, P_E und Q

Die Genauigkeit der Diskrepanzen ist offensichtlich von der Lage des Punktes Q abhängig. Diese Position legen wir mit folgendem Verhältnis fest:

$$\theta = \frac{P_A \bar{Q}}{\bar{Q} P_E} \quad (5)$$

Die Genauigkeit der Diskrepanz d_R oder d_{XY} oder d_Z ergibt sich aus folgender Formel:

$$\sigma_d^2 = \left(2 - \frac{2\theta}{(\theta+1)^2} \right) \sigma_{X \text{ bzw. } Y \text{ bzw. } Z}^2 \quad (6)$$

Falls θ gleich Null oder Unendlich wird, geht die Formel (6) in die zwei- bzw. dreidimensionale Streckengenauigkeit bzw. in die Genauigkeit für den Höhenfehler aus zwei Punkten über:

$$\sigma_{d_Z}^2 = 2\sigma_Z^2 \quad \sigma_{d_{XY}}^2 = 2\sigma_{XY}^2 \quad \sigma_{d_R}^2 = 2\sigma_{XYZ}^2 \quad (7)$$

Die Überführung der Differenzen d_z und d_{xy} auf gleiche a-priori Genauigkeiten kann mit den Gleichungen (5) und (6) erreicht werden:

$$\bar{d}_{xy} = \frac{d_{xy}}{\sqrt{2 - \frac{2\theta}{(\theta+1)^2}}} \quad \bar{d}_z = \frac{d_z}{\sqrt{2 - \frac{2\theta}{(\theta+1)^2}}} \quad (8)$$

In den Gleichungen (4) wurden \bar{d}_{xy} und \bar{d}_z eingeführt.

Für die Elimination der groben Messfehler benötigt man ebenfalls die oben angeführten Erkenntnisse. Nur Messungen, die innerhalb folgender Schwellwerte liegen, werden akzeptiert:

$$\left| \bar{d}_{rel,XY,i} \right| \leq 3\sigma_{XY}^{Linie} \quad \left| \bar{d}_{rel,Z,i} \right| \leq 3\sigma_Z^{Linie} \quad (9)$$

$\sigma_{XY}, \sigma_Z \dots$ mit den Formeln (5), (8) und (4) berechnet

Die Elimination der groben Fehler erfolgt in mehreren Schritten, also iterativ.

Die Gleichungen (4) liefern die relativen Genauigkeiten. Die absoluten Genauigkeiten erhält man, wenn die Linie, entlang der die Geraden g definiert sind (Abb. 1), als fehlerfreie Referenz angesehen werden kann. Die jeweilige wahre Linie dient für alle Wiederholungsmessungen als fehlerfreie Referenzlinie.

2.2.2. Genauigkeitsparameter der halbautomatischen Linienmessung

Die auf dem Markt befindlichen photogrammetrischen Auswertesysteme bieten noch keine automatische oder halbautomatische Linienauswertung an. Wir wollen aber doch das Genauigkeitspotenzial diese Auswertetechnik demonstrieren. Wir greifen auf die Dissertation von KERSCHNER (2003) zurück. Er hat Snakes zur Linienextraktion eingesetzt. Eine Snake-Lösung ist bekanntlich halbautomatisch, weil der Näherungsverlauf der Linie bekannt sein muss. Den Näherungsverlauf bekommt man durch eine grobe manuelle Digitalisierung.

Wünschenswert wären Stereo-Snakes, das heißt die internen Formparameter sollten im dreidimensionalen Raum definiert werden und die photometrischen Terme sollten in den beiden beteiligten Bildern wirksam sein. Mangels der Verfügbarkeit dieser Lösung wurde folgende Kompromisslösung verwendet (DENCHEVA, 2005):

- Im Stereomodell werden Linien grob manuell digitalisiert.
- Diese groben dreidimensionalen Linien werden in die beiden Bilder transformiert.
- In beiden Bildern werden unabhängig voneinander mit der Snake-Technik zweidimensionale Linien extrahiert.
- Mit Hilfe von Kernstrahlen und Interpolation werden korrespondierende Punkte auf beiden zweidimensionalen Snake-Linien gefunden.
- Mit den Bildkoordinaten korrespondierender Punkte werden räumliche Vorwärtsschnitte berechnet.
- Das Ergebnis ist eine Punktfolge entlang von dreidimensionalen Objektlinien.

Diese dreidimensionalen Objektlinien bezeichnen wir als Snake-Linien. Ihre Genauigkeit kann in gleicher Weise wie die manuell digitalisierten dreidimensionalen Linien (Abschnitt 2.2.1) ermittelt werden.

3 Empirische Genauigkeiten

Zur Erprobung der im Abschnitt 2 vorgestellten Konzepte zur Ableitung von Genauigkeitsparametern wurden in mehreren Projekten ein umfangreiches Datenmaterial gewonnen. Es stand unterschiedliches Bildmaterial - in den Kopfleisten der folgenden Tabellen als Blöcke bezeichnet - zur Verfügung. Die Auswertungen wurden an der digitalen Auswertestation SUMMIT EVOLUTION vorgenommen.

3.1. Relative Genauigkeit der punktweisen Auswertung

Die Ergebnisse - berechnet nach den Formeln (1) - zeigt Tab. 1, und zwar für die drei Punktarten M = Markierungen insbesondere auf Sportplätzen, H = Hausecken und F = Firstpunkte.

	Block1 1:15000, RGB, 20 μ ,21cm B/Z=1/2.55			Block2 1:6000, SW, 15 μ ,21cm B/Z=1/2.37			Block3 1:4000, RGB, 30 μ ,15cm B/Z=1/1.86			Block4 1:4000, SW, 30 μ ,15cm B/Z=1/1.86			Block5 1:4000, RGB, 15 μ ,15cm B/Z=1/1.86		
	$\sigma_{rel,X}^P$ [m]	$\sigma_{rel,Y}^P$ [m]	$\sigma_{rel,Z}^P$ [m]	$\sigma_{rel,X}^P$ [m]	$\sigma_{rel,Y}^P$ [m]	$\sigma_{rel,Z}^P$ [m]	$\sigma_{rel,X}^P$ [m]	$\sigma_{rel,Y}^P$ [m]	$\sigma_{rel,Z}^P$ [m]	$\sigma_{rel,X}^P$ [m]	$\sigma_{rel,Y}^P$ [m]	$\sigma_{rel,Z}^P$ [m]	$\sigma_{rel,X}^P$ [m]	$\sigma_{rel,Y}^P$ [m]	$\sigma_{rel,Z}^P$ [m]
M				0.046	0.046	0.134	0.032	0.036	0.121	0.022	0.023	0.072	0.018	0.021	0.064
H	0.086	0.128	0.346	0.044	0.048	0.132	0.040	0.049	0.096	0.024	0.034	0.064	0.030	0.043	0.092
F	0.083	0.131	0.371	0.031	0.030	0.157	0.060	0.060	0.137	0.048	0.060	0.139	0.024	0.027	0.095
	0.085	0.130	0.359	0.041	0.042	0.141	0.046	0.049	0.119	0.033	0.042	0.098	0.024	0.032	0.085
	0.109	0.359		0.041	0.141		0.047	0.119		0.038	0.098		0.028	0.085	

Tab. 1: Relative Genauigkeit manuell gemessener Punkte im Objektkoordinatensystem

Kommentare:

- Die Variation der Genauigkeit - abhängig von den Punktarten - ist verhältnismäßig gering. Es wird daher ein quadratischer Mittelwert σ_{rel}^P - repräsentativ für alle Punktarten - in der vorletzten Zeile der Tab. 1 angegeben.
- Obwohl die Y-Koordinaten etwas ungenauer als die X-Koordinaten sind, ein bekanntes Phänomen in der Stereophotogrammetrie (z.B. KRAUS, 1996), wird in der letzten Zeile der Tab. 1 noch ein Mittelwert für die Lagekoordinaten angegeben.
- Die Erfahrung der Operateurin (Erstautorin) hat einen verhältnismäßig großen Einfluss. Die Messungen erstreckten sich von November 2003 bis Oktober 2004 (DENCHEVA, 2005). In dieser Zeitspanne verbesserte sich die Genauigkeit um circa 35 %.
- Farbbilder und Schwarzweißbilder ergeben überraschenderweise etwa die gleiche Genauigkeit.
- Die Lage- und Höhengenaugigkeit sollte sich wie das Basis/Höhenverhältnis B/Z verhalten, was allerdings nicht eingetreten ist.

3.2. Relative Genauigkeit der manuellen Linienauswertung

Die Ergebnisse – berechnet aus den Formeln (8) und (4) - zeigt Tab. 2, und zwar für die drei Linienarten E = Linien im flachen Gelände, G = Gehsteigskanten und F = Firstlinien.

	Block1 1:15000, RGB, 20 μ ,21cm B/Z=1/2.55			Block2 1:6000, SW, 15 μ ,21cm B/Z=1/2.37			Block3 1:4000, RGB, 30 μ ,15cm B/Z=1/1.86			Block4 1:4000, SW, 30 μ ,15cm B/Z=1/1.86			Block5 1:4000, RGB, 15 μ ,15cm B/Z=1/1.86		
	$\sigma_{rel,R}^L$ [m]	$\sigma_{rel,XY}^L$ [m]	$\sigma_{rel,Z}^L$ [m]	$\sigma_{rel,R}^L$ [m]	$\sigma_{rel,XY}^L$ [m]	$\sigma_{rel,Z}^L$ [m]	$\sigma_{rel,R}^L$ [m]	$\sigma_{rel,XY}^L$ [m]	$\sigma_{rel,Z}^L$ [m]	$\sigma_{rel,R}^L$ [m]	$\sigma_{rel,XY}^L$ [m]	$\sigma_{rel,Z}^L$ [m]	$\sigma_{rel,R}^L$ [m]	$\sigma_{rel,XY}^L$ [m]	$\sigma_{rel,Z}^L$ [m]
E	0.355	0.105	0.340	0.192	0.054	0.185	0.132	0.043	0.125	0.090	0.028	0.086	0.086	0.027	0.081
G	0.347	0.116	0.327	0.195	0.056	0.187	0.129	0.045	0.121	0.109	0.034	0.104	0.092	0.030	0.087
F	0.379	0.089	0.368	0.131	0.022	0.130	0.119	0.048	0.109	0.136	0.049	0.127	0.089	0.021	0.087
	0.361	0.104	0.345	0.176	0.047	0.169	0.127	0.045	0.118	0.114	0.038	0.107	0.089	0.026	0.085

Tab. 2: Relative Genauigkeit (R... räumlich, XY... Lage, Z... Höhe) manuell gemessener Linien im Objektkoordinatensystem

Die Kommentare, die nach der Tab. 1 gemacht wurden, treffen weitgehend auch für die manuelle linienweise Auswertung zu. Die linienweise Auswertung liefert etwa die gleiche Lage- und Höhengenaugkeit wie die punktweise Auswertung. Diese Feststellung überrascht nicht, denn in der digitalen Photogrammetrie erfolgt die manuelle Linienauswertung im so genannten Punkt-Modus und nicht dynamisch wie in der analogen Photogrammetrie.

3.3. Absolute Genauigkeit der manuellen Linienauswertung

In den Blöcken 3, 4 und 5 wurden im Gelände mit dem Tachymeter Leica TC 1600 Vergleichswerte terrestrisch gemessen. Damit können die absoluten Genauigkeiten berechnet werden. Für die Diskrepanzen zwischen photogrammetrischen Auswertungen und den terrestrisch gemessenen Linien können die systematischen Anteile abgezogen und aus den reduzierten Diskrepanzen können die zufälligen Fehler berechnet werden. In der Tab. 3 sind die Ergebnisse zusammengefasst, wobei die systematischen Anteile (Verschiebungen in den drei Koordinatenrichtungen) für jede Linie getrennt bestimmt wurden.

Block 3 1:4000, RGB, 30 μ , 15cm B/Z=1/1.86				Block 4 1:4000, SW, 30 μ , 15cm B/Z=1/1.86				Block 5 1:4000, SW, 30 μ , 15cm B/Z=1/1.86			
$\sigma_{abs,R}^L$ [m]	$\sigma_{abs,XY}^L$ [m]	$\sigma_{abs,Z}^L$ [m]		$\sigma_{abs,R}^L$ [m]	$\sigma_{abs,XY}^L$ [m]	$\sigma_{abs,Z}^L$ [m]		$\sigma_{abs,R}^L$ [m]	$\sigma_{abs,XY}^L$ [m]	$\sigma_{abs,Z}^L$ [m]	
0.167	0.086	0.136		0.133	0.079	0.107		0.147	0.082	0.122	
$S_{abs,XY}^{L,sys}$ [m]	$S_{abs,Z}^{L,sys}$ [m]	$\sigma_{abs,XY}^{L,zuf}$ [m]	$\sigma_{abs,Z}^{L,zuf}$ [m]	$S_{abs,XY}^{L,sys}$ [m]	$S_{abs,Z}^{L,sys}$ [m]	$\sigma_{abs,XY}^{L,zuf}$ [m]	$\sigma_{abs,Z}^{L,zuf}$ [m]	$S_{abs,XY}^{L,sys}$ [m]	$S_{abs,Z}^{L,sys}$ [m]	$\sigma_{abs,XY}^{L,zuf}$ [m]	$\sigma_{abs,Z}^{L,zuf}$ [m]
0.075	0.061	0.043	0.122	0.069	0.055	0.039	0.092	0.072	0.085	0.039	0.088

Tab. 3: Absolute Genauigkeit von manuell gemessenen Linien sowie ihre Aufspaltung in systematische und zufällige Anteile

Die zufälligen Fehler passen sehr gut mit den relativen Genauigkeiten der linienweisen Auswertung zusammen. Die systematischen Anteile, die in der Lage beachtlich groß sind, rühren voraussichtlich von Restfehlern der absoluten Orientierung her.

3.4. Absolute und relative Genauigkeit der Snake-Linien

In den Blöcken 3 und 5 wurden für einige terrestrisch gemessene Linien auch Snake-Linien abgeleitet. Ihre Genauigkeiten sind in der Tab. 4 zusammengestellt.

Block 3 1:4000, RGB, 30μ, 15cm B/Z=1/1.86				Block 5 1:4000, SW, 30μ, 15cm B/Z=1/1.86			
$\sigma_{abs,R}^S$	$\sigma_{abs,XY}^S$	$\sigma_{abs,Z}^S$		$\sigma_{abs,R}^S$	$\sigma_{abs,XY}^S$	$\sigma_{abs,Z}^S$	
[m]	[m]	[m]		[m]	[m]	[m]	
0.150	0.088	0.121		0.247	0.068	0.237	
$s_{abs,XY}^{S,sys}$	$s_{abs,Z}^{S,sys}$	$\sigma_{abs,XY}^{S,zuf}$	$\sigma_{abs,Z}^{S,zuf}$	$s_{abs,XY}^{S,sys}$	$s_{abs,Z}^{S,sys}$	$\sigma_{abs,XY}^{S,zuf}$	$\sigma_{abs,Z}^{S,zuf}$
[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]
0.085	0.047	0.023	0.112	0.065	0.227	0.019	0.071

Tab. 4: Absolute und relative (=zufällige Fehler) Genauigkeit der Snake-Linien im Objektkoordinatensystem

Die abgespaltenen zufälligen Fehler können als relative Genauigkeit der Snake-Linien angesehen werden. Die relative Genauigkeit der Snake-Linien ist deutlich besser als die relative Genauigkeit der manuell gemessenen Linien.

4 Analyse des Zahlenmaterials und Verallgemeinerung der Aussagen

Im Abschnitt 3 wurden im Anschluss an die Tabellen bereits wichtige Aussagen formuliert. In der Dissertation (DENCHEVA, 2005) sind weitere Ergebnisse von Analysen enthalten. Beispielhaft soll hier nur ein Ergebnis präsentiert werden, das die Frage der optimalen Pixelgröße beantwortet. Für die Beantwortung der angeschnittenen Frage benötigt man empirische Genauigkeiten von mindestens drei verschiedenen Pixelgrößen. Sie waren nur bei der manuellen punkt- und linienweisen Auswertung gegeben. Wir führen die Ergebnisse der punkt- und linienweisen Auswertung zusammen, da sie - wie im Abschnitt 3 angemerkt - sich nur geringfügig unterscheiden. Die zusammengeführten Genauigkeiten für die Objektkoordinaten XY und Z nennen wir $\sigma_{o,XY}$ und $\sigma_{o,Z}$. Damit kann man die so genannte Messgenauigkeit σ_B im Bild sowohl aus den XY-Genauigkeiten als auch aus den Z-Genauigkeiten wie folgt berechnen (KRAUS, 2004):

$$\sigma_{B,XY} = \sigma_{o,XY} \frac{1}{m_B} \quad \sigma_{B,Z} = \sigma_{o,Z} \frac{B}{Z} \frac{1}{m_B} \quad \sigma_{B,R} = \sqrt{\frac{\sigma_{B,XY}^2 + \sigma_{B,Z}^2}{2}} \quad (10)$$

m_B ... Bildmaßstabszahl

B/Z ... Basis/Höhenverhältnis

In der Abb. 3 ist Bildmessgenauigkeit $\sigma_{B,R}$ über der Pixelgröße für die 5 Blöcke aufgetragen. Die Quadrate mit der dunklen Kurve geben die Genauigkeiten $\sigma_{B,R}$ in $[\mu\text{m}]$ wieder. Die Rauten mit der hellen Kurve veranschaulichen die Bildmessgenauigkeiten in Anteilen der Pixelgröße der Pixelgröße $[\Delta]$. Das Minimum der hellen Linie - es liegt bei $24.3 \mu\text{m}$ - gibt an, bei welcher Pixelgröße man die beste **Messsicherheit** im digitalen Stereobild hat. Für die Photogrammetrie ist die beste **Messgenauigkeit** wichtiger: sie ergibt sich aus dem Minimum der

dunklen Linie. Der Wert liegt knapp unter 20 μm Pixelgröße. An dieser optimalen Stelle beträgt die Messgenauigkeit 8.2 μm bzw. 0.41 Anteile der Pixelgröße.

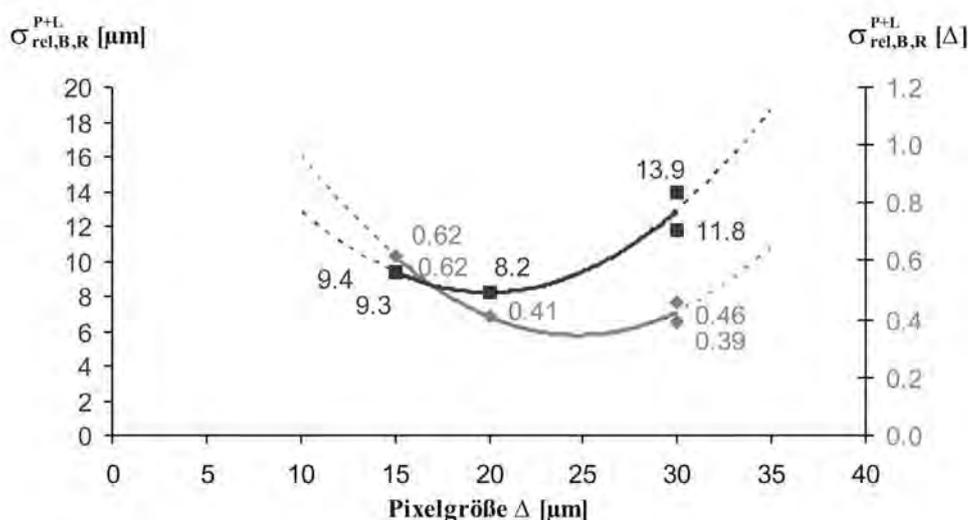


Abb. 3: Genauigkeit $\sigma_{rel,B,R}^{P+L}$ über der Pixelgröße, einmal ausgedrückt in μm und einmal in Anteilen der Pixelgröße Δ . Optimale Pixelgröße im Bild.

5 Zusammenfassung und Ausblick

- In der digitalen Photogrammetrie erfolgt die manuelle linienweise Auswertung punktweise, sodass für die Genauigkeit der Linienauswertung die Genauigkeit der punktweisen Auswertung herangezogen werden kann.
- Die günstigste Pixelgröße für die manuelle punkt- und linienweise Auswertung ist etwas kleiner als 20 μm . Bei deutlich kleinerer Pixelgröße beeinträchtigt das Rauschen die Messgenauigkeit sehr. Bei einer Pixelgröße größer als 20 μm steigt zwar die Messsicherheit, aber nicht die Messgenauigkeit.
- Für die punkt- und linienweise Auswertung liegt die Messgenauigkeit im Bild bei 8 μm bzw. bei 0.4 Anteilen der Pixelgröße. In der Lage ist die Genauigkeit deutlich besser (ca. 15 %). Die Genauigkeit der digitalen Photogrammetrie steht demnach der Genauigkeit der analytischen Photogrammetrie nicht nach.
- Die halbautomatische bzw. automatische Linienauswertung ist deutlich besser als die manuelle Linienauswertung (ca. 30 %). Bei einer künftigen Verwendung von Stereo-Snakes und einer verbesserten Software wird die Genauigkeitssteigerung vermutlich noch deutlicher ausfallen. Da die auszuwertenden Linien nicht parallel zur Flugbahn verlaufen dürfen, ist für die automatische Auswertung ein Flug mit 60 % Querüberdeckung erforderlich.
- Die bisherigen Schlussfolgerungen (weitere findet man in der Dissertation (DENCHEVA, 2005)) gelten streng genommen nur für das verwendete Bildmaterial. Für ein anderes Bildmaterial sind die empirischen Genauigkeiten mit Hilfe des vorgestellten Konzeptes zu ermitteln.
- In Zukunft sollte man projektbezogen die Messungen und Analysen durchführen. Auf diese Weise bekommt man sehr zuverlässige Qualitätsparameter für die photogrammetrischen Endprodukte.

6 Literaturverzeichnis

- ROTTENSTEINER, F. & PT – **Qualitätsverbesserung** FALKE PRINZ, R., 1996: Aerotriangulation mit digitalen Bildern: Der Testblock Forsa der OEEPE - Vermessung & Geoinformation, Heft 2/96, S. 189-195
- KACZYNSKI ROMUALD ZIOBRO JAN, 1999: Digital and analytical aerial triangulation - A comparison test - OEEPE Workshop 22-24 June, Paris
- HEIPKE, CH. & KONRAD, E., 1999: Performance of tie point extraction in automatic aerial triangulation - OEEPE Workshop 22-24 June, Paris
- DENCHEVA, V., 2005: Genauigkeitsparameter der digitalen Photogrammetrie – Dissertation am I.P.F. der TU Wien
- KRAUS, K. & BETTIN, R., 1970: Kombinierte photogrammetrisch-terrestrische Katastervermessung - BuL 38, S. 241-248
- KERSCHNER, M., 2003: Snakes für Aufgaben der digitalen Photogrammetrie und Topographie – Dissertation am I.P.F. der TU Wien:
http://www.ipf.tuwien.ac.at/phdtheses/mk/diss_mk.pdf
- SUMMIT EVOLUTION: <http://www.datem.com/products/evolution.html>
- KRAUS, K., 1996: Photogrammetrie Band 2 - 3. Aufl., S. 137
- KRAUS, K., 2004: Photogrammetrie Band 1 - 7. Aufl., S. 32

Dank: Die Autoren bedanken sich bei Herrn Dr. H. Kager, Prof. Dr. J. Jansa, Dr. C. Ressler für sehr wertvolle kritische Anregungen. Die Erstautorin bedankt sich für das Neumaier-Stipendium in den vergangenen beiden Jahren. Es war die finanzielle Basis für den Forschungsaufenthalt am I.P.F..

Automatische auflösungsabhängige Anpassung variabler Straßenmodelle

J. HELLER¹ & K. PAKZAD¹

Zusammenfassung: In diesem Bericht wird eine Methode zur automatischen Anpassung von Objektmodellen für die Straßenextraktion an eine niedrigere Auflösung vorgestellt. Dabei wird ein manuell erstelltes Objektmodell, das geeignet ist für die Objektextraktion in einer bestimmten Auflösung der Bilddaten, vollautomatisch an eine niedrigere Auflösung adaptiert. Die Objektmodelle werden durch Semantische Netze repräsentiert, die Landschaftsobjekte explizit beschreiben. Die Methoden zur Adaption wurden für Straßen im Vorstadtbereich entwickelt. In diesem Beitrag werden dynamische Relationen verwendet, um die Anzahl der Fahrspuren variabel zu halten.

Anhand eines Beispiels zur Modellierung von Straßen werden die Wirkungsweise und Ergebnisse der Methodik zur automatischen auflösungsabhängigen Anpassung von Objektmodellen für die Extraktion von Straßen aus digitalen Bilddaten an eine niedrigere Bildauflösung demonstriert.

1 Einleitung

Die räumliche Auflösung der zur Verfügung stehenden Bilddaten spielt eine große Rolle bei der Erzeugung geeigneter Objektmodelle für die Extraktion von Landschaftsobjekten. In Luft- und Satellitenbildern hoher Auflösung sind mehr bzw. andere Details erkennbar als in Bildern mit niedrigerer Auflösung. Nicht nur der Typ und die Erkennbarkeit der Objekte ändern sich mit zunehmender Bodenpixelgröße, sondern auch die Ausprägung ihrer Merkmale und damit deren Bedeutung für den Extraktionsprozess. Dementsprechend müssen auch die Objektmodelle, die die Beschreibung der Objekte beinhalten, für die Extraktion desselben Objektes in Bilddaten anderer Auflösung modifiziert werden.

Ein Konzept und Algorithmen zur automatischen auflösungsabhängigen Anpassung von manuell erstellten Modellen für die Straßenextraktion an eine niedrigere Bildauflösung wurden bereits präsentiert (Pakzad & Heller, 2004), (Heller & Pakzad, 2005a), (Heller & Pakzad, 2005b). Die Landschaftsobjekte werden durch Semantische Netze beschrieben, die eine leichte intuitive Erzeugung der Modelle auf eine explizite Art gewährleisten. Die Straßenmodelle integrieren das Objektmodell und das Bildmodell nach Förstner (1993), da sowohl die hierarchischen und räumlichen Beziehungen der Objektteile als auch deren Aussehen im Bild beinhaltet sind. Die Modelle werden im Folgenden als „Objektmodelle“ bezeichnet. Die Methoden zur Anpassung nutzen die Theorie des linearen Skalenraumes, über den eine Vielzahl von Arbeiten existiert, z.B. Florack (1994) und Lindeberg (1994). Die automatische Anpassung konnte bisher jedoch nur für relativ einfache Modelle mit einer festen Anzahl von parallelen linienhaften Objektteilen durchgeführt werden.

Die vorher entwickelten Methoden zur auflösungsabhängigen Anpassung von einfacheren Objektmodellen wurden auf flexiblere Modelle für die Straßenextraktion erweitert, die eine variable Anzahl von Fahrspuren beschreiben. Die erweiterten Methoden werden hier vorgestellt, wobei auf die bisherigen Methoden der Auflösungsanpassung nicht eingegangen wird. In Kapitel 2 wird kurz ein Überblick über die verwendete Strategie zur auflösungs-

¹ Institut für Photogrammetrie und GeoInformation, Universität Hannover, Nienburger Str. 1, 30167 Hannover, e-mail: heller@ipi.uni-hannover.de, pakzad@ipi.uni-hannover.de

abhängigen Anpassung gegeben. Kapitel 3 gibt eine Beschreibung für den Aufbau variabler Straßenmodelle. Die Methoden werden im Kapitel 4 erläutert. Ein Beispiel für die automatische Anpassung eines Objektmodells für die hohe Auflösung mit einer variablen Anzahl Fahrspuren an eine niedrigere Auflösung wird in Kapitel 5 gegeben. Kapitel 6 schließt diesen Beitrag mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick ab.

2 Strategie

Unter Kenntnis der Zielauflösung wird das vorgegebene Objektmodell für die hohe Bildauflösung in Objektteile mit ähnlichem Skalenverhalten und in Gruppen von Objektteilen zerlegt, die bei der Auflösungsänderung miteinander interagieren. Die Erscheinung der Objektteile in der Zielauflösung wird über sog. Skalenmodelle prädiziert, die sowohl analytische als auch empirische Methoden nutzen. Diese Skalenmodelle werden für jeden Objekttyp erstellt und berücksichtigen auch eventuelle Skalenraumereignisse wie Auslöschung und Verschmelzung mehrerer Objekte. Die adaptierten Objektteile werden in einem letzten Schritt zu einem kompletten Objektmodell fusioniert, das für die Extraktion des Landschaftsobjektes in der niedrigeren Zielauflösung geeignet ist. Das Konzept der Strategie ist in Abb.1 dargestellt. Für eine detaillierte Beschreibung der Strategie siehe Pakzad & Heller (2004).

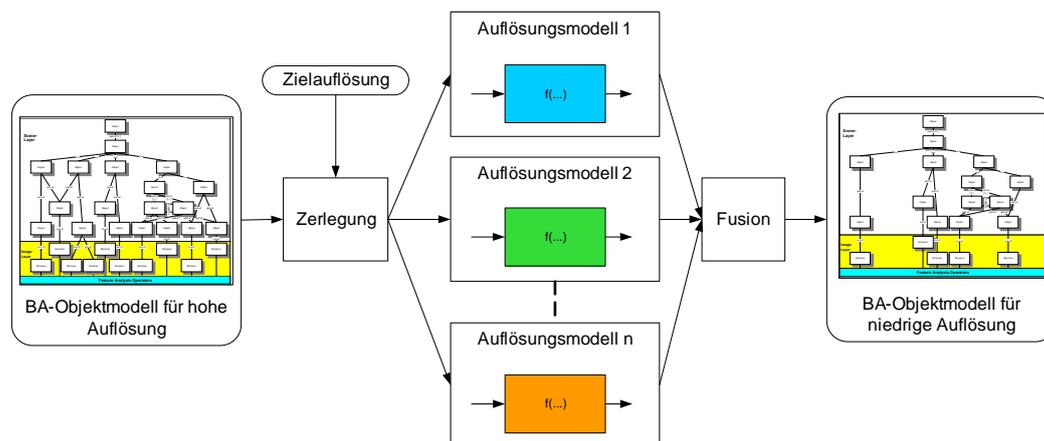


Abb. 1: Strategie zur skalenabhängigen Anpassung von Objektmodellen

3 Variable Straßenmodelle

Unter „variablen Objektmodellen“ verstehen wir Modelle zur Objektextraktion, bei denen die Anzahl von gleichartigen Teilobjekten im Semantischen Netz (Konzeptnetz) variabel ist. Dadurch können beispielsweise mehrere Fahrspuren in einem einzigen Straßenmodell beschrieben werden. Die Kenntnis der tatsächlich zu extrahierenden Fahrspuren eines konkreten Objektes ist dadurch nicht erforderlich. Mit demselben Modell können sowohl einspurige als auch mehrspurige Straßentypen beschrieben werden. Die variable Anzahl kann über so genannte „dynamische Relationen“ von Teilobjekten im Semantischen Netz umgesetzt werden, die sowohl hierarchische als auch räumliche Beziehungen beschreiben können. Die Anzahl der damit beschriebenen Teilobjekte ist nur durch einen maximalen und/oder minimalen Wert beschränkt. Abb. 2 zeigt einen Ausschnitt aus dem in Kapitel 5 vorgestellten Beispiel-Straßenmodell: eine dynamische Relation, die mehrere parallel verlaufende Fahrspuren (gegeben durch Fahrspurmarkierungen) beschreibt.

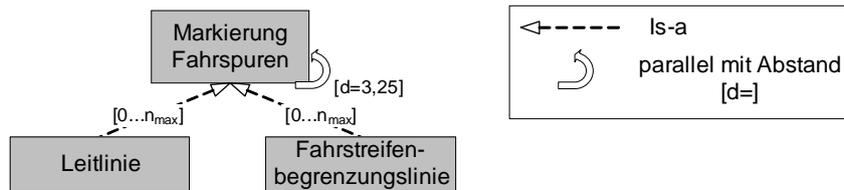


Abb. 2: Dynamische Relation für mehrere Fahrspuren

4 Methodik der auflösungsabhängigen Anpassung variabler Straßenmodelle

Die Methoden zur Anpassung von einfachen Objektmodellen mit einer festen Anzahl von parallelen linienhaften Objektteilen sind in Heller & Pakzad (2005a) ausführlich beschrieben. In diesem Beitrag werden die Besonderheiten in den Algorithmen, die sich durch die Integration von dynamischen Relationen ergeben, erläutert und veranschaulicht.

4.1. Zerlegung

Das manuell erstellte Semantische Netz der hohen Auflösung wird in diesem ersten Teilschritt der automatischen Anpassung in einzelne Objektteile bzw. Gruppen von Objektteilen zerlegt. Wenn benachbarte Objektteile sich gegenseitig in ihrem Skalenverhalten aufgrund ihrer räumlichen Nähe zueinander beeinflussen, müssen diese Objektteile bei der Anpassung in den Skalenmodellen zusammen betrachtet werden. Diese gegenseitige Beeinflussung bewirkt eine Interaktion der Objektteile in der Zielauflösung. Ob eine Interaktion benachbarter Objektteile vorliegt, kann über den Vergleich der Distanz zwischen den Objektteilen und dem räumlichen Einflussbereich der Auflösungsänderung festgestellt werden. Die Auflösungsänderung ist durch die Zielauflösung gegeben und bestimmt die zugehörige Größe des Skalenparameters σ_i im linearen Skalenraum, der durch die Filterung mit dem Gauß-Kernel unterschiedlicher Breite gebildet wird. Die Größe des Skalenparameters σ_i der Zielskala wiederum bestimmt die jeweilige Breite des Gauß-Filters.

Wenn keine Interaktion zu benachbarten Objektteilen vorliegt, muss die Breite des Gauß-Filters mit der zugehörigen Distanz der dynamischen Relation, die eine räumliche Beziehung beschreibt, nur ein Mal verglichen werden. Aufgrund der Gleichheit der Distanzen für die Objektteile der dynamischen Relation gilt diese Entscheidung zur Gruppierung für alle Objektteile gleichermaßen, obwohl deren Anzahl unbekannt ist. Wenn also eine Interaktion vorliegt, werden alle Objektteile, die die dynamische Relation beschreibt, zu einer einzigen Gruppe zusammengefasst, die in dem folgenden Teilschritt im Skalenmodell gemeinsam betrachtet wird. Diese Gruppe wird nachfolgend als Interaktions-Gruppe bezeichnet. Falls keine Interaktion in der Zielauflösung zu erwarten ist, werden alle Objektteile als Einzellinien behandelt. Dann ist eine Prädiktion des Aussehens der Linien in der Zielauflösung nur für eine einzige Linie erforderlich und für alle Einzellinien gültig, da alle Objektteile der dynamischen Relation gleichartig sind und dieselben Attributwerte besitzen.

Wenn Interaktion zwischen den Randobjekten der dynamischen Gruppe und dem benachbarten Objektteil auftritt, obwohl keine Interaktion innerhalb der Gruppe vorliegt, bilden das Nachbarobjekt und das Randobjekt eine eigene Interaktions-Gruppe. Dieser Fall ist dann separat zu betrachten.

4.2. Skalenmodelle

Skalenereignisse

Bei dynamischen Relationen mit parallelen linienhaften Objektteilen können die Skalenereignisse Annihilation (Auslöschung) und Verschmelzung auftreten. Skalenereignisse treten nur ein, wenn Interaktion vorliegt. Falls die Objektteile der dynamischen Relation bei Interaktion als eine einzige Gruppe in den Skalenmodellen betrachtet und Randobjekte nicht miteinbezogen werden müssen (s.o.), tritt für alle Objektteile das Skalenereignis gleichzeitig auf.

Ob eine Verschmelzung der Linien in der Interaktions-Gruppe für die Zielauflösung vorliegt, wird durch die Breite, den Kontrast und die Distanz der Linien bestimmt. Das Ereignis der Verschmelzung kann daher bereits mit zwei Linien vorhergesagt werden und ist auf die gesamte Gruppe übertragbar.

Wenn Einzellinien nach der Zerlegung vorliegen, gelten die gleichen Bedingungen für alle Objektteile bezüglich einer möglichen Annihilation. Daher ist die Betrachtung einer einzigen Linie als Muster in den Skalenmodellen ausreichend.

Das Ereignis der Annihilation für eine Interaktions-Gruppe ist allerdings von einem zusätzlichen Parameter abhängig: die Anzahl n der Objektteile. Annihilation tritt ein, wenn der Kontrast des Objektes zum Hintergrund in der Zielauflösung einen sehr kleinen Wert annimmt und die Extraktion mit dem Bildanalyse-Operator fehlschlägt. Der Kontrast der Liniengruppe wird durch die tatsächliche Anzahl der Linien im Objekt beeinflusst. Je mehr Objektteile beteiligt sind (bei ansonsten gleichen Attributen), desto später im Skalenraum wird die Annihilation eintreten, da der Grauwert größer ist. Dasselbe gilt auch für kleinere Abstände zwischen den Linien. Das Vorliegen einer Annihilation ist damit nicht eindeutig für eine unbegrenzte Anzahl von Objektteilen vorhersagbar. Aus diesem Grunde ist eine Begrenzung der maximalen Anzahl der Objektteile als Randbedingung für den manuellen Aufbau der Objektmodelle nötig, um eine automatisierte Adaption durchführen zu können.

Attribute

Für Einzellinien der dynamischen Relationen, die keine Annihilation erfahren, kann die Bestimmung der Attribute wie in Heller & Pakzad (2005) aus dem Gradientenbild erfolgen. Auch hier ist die Prädiktion des Aussehens, d.h. der Attributwerte, einer einzigen Musterlinie für alle Objektteile der dynamischen Relation ausreichend.

Die Breite und der Grauwert der Interaktions-Gruppe, in der eine Verschmelzung stattgefunden hat, werden dagegen von der konkreten Anzahl der Linien beeinflusst. Da die Anzahl der Objektteile variabel ist, kann sich im Konzeptnetz der Zielauflösung ein Wertebereich für die einzelnen Attribute ergeben. Solange die Skalenereignisse für alle Objektteile gleichermaßen eingetreten sind, können die minimale und die maximale Anzahl der gleichartigen Objektteile in den Skalenmodellen betrachtet und deren Werte als Grenzen im Semantischen Netz der Zielauflösung angegeben werden, in denen sich die tatsächlichen Attributwerte bewegen. Wenn trotz Interaktion keine Verschmelzung vorliegt, können der Grauwert und die Breite in der Zielauflösung wie bei Einzellinien bestimmt werden.

4.3. Fusion zum Objektmodell der Zielauflösung

Die Struktur des Semantischen Netzes der Zielauflösung verändert sich nur, wenn Skalenereignisse eingetreten sind. Mit Skalenereignissen ändern sich die Objekttypen und die Gesamtzahl der Knoten des Netzes wird geringer.

Bei Vorliegen einer Verschmelzung muss in der Fusion der prädizierten Objektteile zu einem einheitlichen Semantischen Netz für die Zielauflösung die Verschiebung der Position der Interaktions-Gruppe berücksichtigt werden. Die Distanz der Interaktions-Gruppe $L1$ zu einem benachbarten Objektteil $L2$ ergibt sich dabei aus den Distanzen d_{Rel} der dynamischen Relation und der Anzahl n der beteiligten Objektteile:

$$d_{\sigma_i L1, L2} = d_{\sigma_0 L1, L2} + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{n-1} d_{Rel} = d_{\sigma_0 L1, L2} + \frac{(n-1) \cdot d_{Rel}}{2}, \text{ für } n > 0 \quad (1)$$

5 Beispiel

Ein Objektmodell für die hohe Auflösung muss bestimmte Randbedingungen erfüllen, um automatisch anpassungsfähig zu sein, siehe Pakzad & Heller (2004). Ein Beispiel für ein Semantisches Netz zur Straßenextraktion mit einer dynamischen Relation für eine variable Anzahl von Fahrspuren, das die Randbedingungen erfüllt, zeigt Abb. 3. Das Modell wurde für Bildauflösungen von 3-5cm erzeugt.

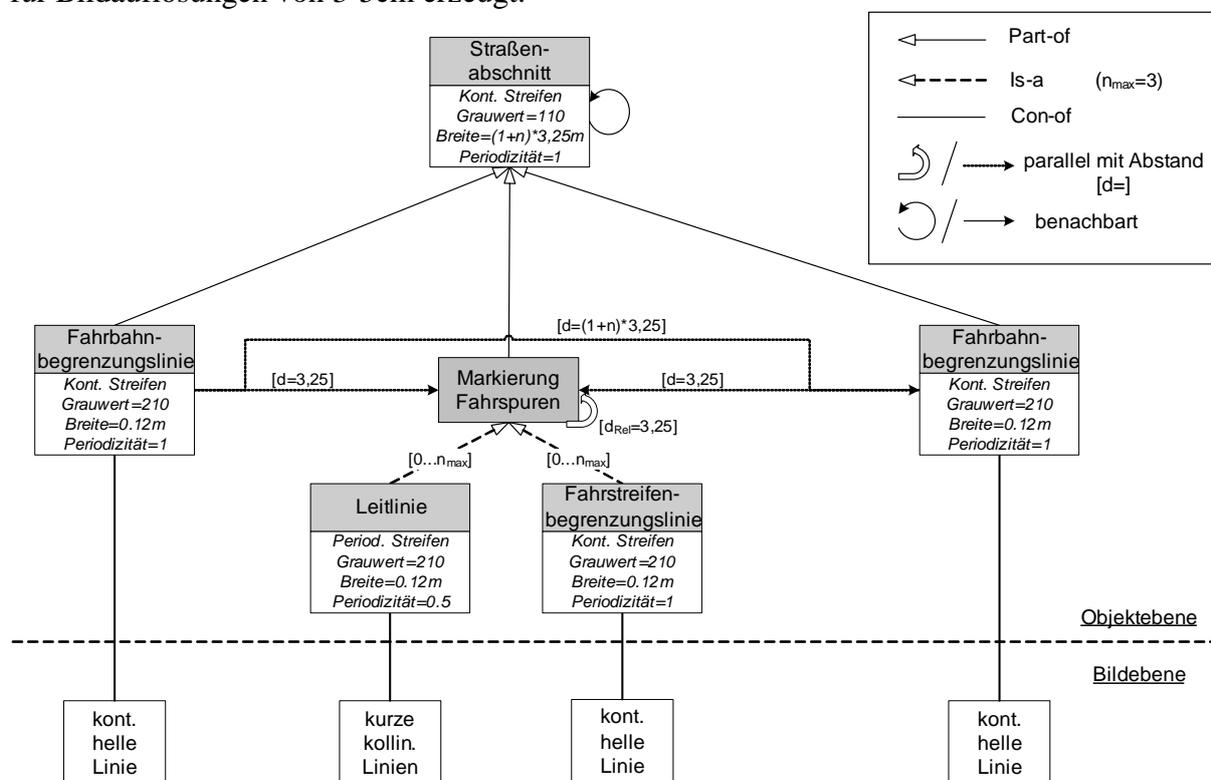


Abb. 3: Variables Straßenmodell für 3-5cm Bildauflösung

Im hochauflösten Bildbereich können Straßen vor allem über Fahrbahnmarkierungen modelliert werden. Modelliert ist hier ein Straßenabschnitt mit zwei festen Fahrbahnbegrenzungen und einer dazwischen liegenden variablen Anzahl von Fahrspurmarkierungen, die über die dynamische Relation realisiert wird. Die Markierungen liegen parallel zueinander mit einer festgelegten Distanz. Die Fahrspurmarkierungen können dabei sowohl Leitlinien (gestrichelte Markierung) als auch Fahrstreifenbegrenzungen (durchgezogene Markierung) sein. Außer der Periodizität (gestrichelt, durchgezogen) haben die Markierungen dieselben Attributwerte. Damit haben sie auch ein ähnliches Aussehen im Bild, das in der Bildebene des Modells beschrieben ist.

Die beispielhafte Anpassung wird hier anhand einer Zielauflösung von $\sigma_t = 50$ demonstriert, das einer Auflösungsänderung zu einer Bodenpixelgröße von etwa 5m entspricht. Die Anzahl der maximal möglichen Fahrspuren wird auf die realistische Größe von 4 begrenzt, d.h. $n_{\max}=3$. Diese Begrenzung ist notwendig für eine sichere Prädiktion der Verschmelzung der Fahrspurmarkierungen in der Zielauflösung. Für die Bestimmung der Grenzen der Wertebereiche der Attribute werden die minimale Konstellation mit den beiden feststehenden Fahrbahnbegrenzungen ($n_{\min}=0$) und die maximale Konstellation mit 3 zusätzlichen Fahrspurmarkierungen (hier Leitlinien), insgesamt also 5 Markierungen betrachtet. Dazu wird die Szene, die das Semantische Netz mit den Attributen in den Knoten und Kanten beschreibt, in einem synthetisch erzeugten Rasterbild simuliert. Ein Ausschnitt aus dem erzeugten synthetischen Bild zur Simulation mit drei Leitlinien zeigt Abb. 4a). Die Simulation beschränkt sich dabei auf Teile der Linien, da diese konstant parallel verlaufen.

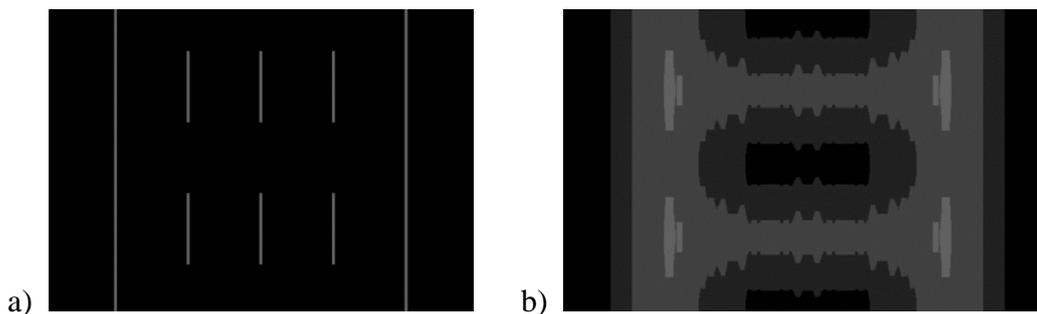


Abb. 4: Synthetisches Bild der Simulation mit 5 Fahrbahnmarkierungen in a) der Ausgangsskala $\sigma=0$ und b) der Zielskala $\sigma_t=50$

Die Zerlegung des Modells ergibt eine einzige Gruppe mit allen Markierungen, da sie alle dieselbe Distanz (entsprechend einer Fahrspur von 3,25m) zueinander aufweisen und diese von der Breite des Gauß-Filters in der Zielskala übertroffen wird. Alle Objektteile der niedrigsten Hierarchiestufe, d.h. die Fahrbahnmarkierungen, interagieren also bei der vorgegebenen Auflösungsänderung miteinander.

In den Skalenmodellen werden zuerst mögliche Skalenergebnisse in der Interaktions-Gruppe untersucht. In der Zielauflösung 5m liegt eine Verschmelzung aller Fahrbahnmarkierungen vor. Der Eintritt der Annihilation wird durch den resultierenden Kontrast in der Mitte der Liniengruppe bestimmt, der mit der Anzahl der an der Gruppe beteiligten Linien variiert. Bei sehr großen Skalenparametern σ ist der korrespondierende Gauß-Filter ebenfalls sehr groß und kann mehrere Linien mit ihren Abständen überdecken. In einer Liniengruppe, in der Interaktion vorkommt, wird daher in der Zielskala der Grauwert einer Liniengruppe mit vielen Linien höher oder gleich hoch ausfallen im Vergleich zu einer Gruppe mit wenigen Linien. Der Grauwert ist abhängig von der Anzahl der Objektteile in der tatsächlichen Szene. In dem hier präsentierten Beispiel ist der Grauwert der Liniengruppe für die minimale Konfiguration (2 Linien) und die maximale Konfiguration (5 Linien) identisch, da mit der Größe des Gauß-Filters von $\sigma_t = 50$ eine unterschiedliche Anzahl von Linien keine signifikante Auswirkung auf den Grauwert hat. Der Kontrast bleibt in der Zielauflösung groß genug, um das Objekt noch extrahieren zu können, so dass keine Annihilation auftritt. In der Zielauflösung von 5m ist nur noch ein einziges Objektteil vorhanden, in das alle Objektteile der niedrigsten Hierarchie verschmolzen sind. In Abb. 4b) ist das synthetische Bild der Liniengruppe mit 5 Fahrbahnmarkierungen in der Zielskala (Target Scale) $\sigma_t = 50$ im linearen Skalenraum dargestellt.

Bei der Verschmelzung von kontinuierlichen Linien und periodischen Linien entsteht ein Objekt, das dem Objekttyp „kontinuierliche Linie“ zugeordnet werden kann. Abb. 5 verdeutlicht den entstandenen Objekttyp in der Zielauflösung. Die Periodizität der resultierenden Liniengruppe beträgt daher 1. Zu beachten ist, dass die erkennbaren Grauwertunterschiede im Originalbild sehr gering sind - Abb. 5 zeigt eine radiometrisch angepasste Darstellung. Die Konstellation mit drei periodischen Linien entspricht dem Extremfall des Anteils periodischer Linien. Das Ergebnis der Simulation dieser Konstellation ist eine Verschmelzung zu einer kontinuierlichen Linie und ist für alle Kombinationen von gestrichelten und durchgezogenen Linien gültig. Da sich ausschließlich derselbe Objekttyp bei der Verschmelzung von kontinuierlichen Linien ergeben kann, erübrigt sich die Simulation mit allen anderen Kombinationen. Aufgrund derselben eingetretenen Skalenergebnisse haben alle Ergebnisnetze die gleiche Struktur. Somit ergibt sich nur ein Semantisches Netz als Ergebnis der automatischen Anpassung. Nur ein einziges Objektteil verbleibt aufgrund der Verschmelzung. Sämtliche räumliche Relationen und zugehörige Distanzen entfallen damit. Das mit der automatischen Anpassung erzeugte Semantische Netz der Zielauflösung von 5m zeigt Abb. 6.

Das Aussehen der verbleibenden Objektteile wird über die Werte der Attribute ebenfalls in den Skalenmodellen prädiziert. Der Kontrast hat für alle Konfigurationen denselben Betrag und wird aus dem synthetischen Bild, das nach der Gauß-Filterung in die Zielauflösung von 5m (Abb. 5) überführt wurde, entnommen. Mit Hilfe des Gradientenbildes im Skalenraum bei $\sigma_t = 50$ wird die Breite der Interaktions-Gruppe berechnet. Die Breite der Liniengruppe variiert je nach Anzahl der beteiligten Linien. Hier muss das Ergebnis ein Wertebereich für die Breite im angepassten Semantischen Netz der Zielauflösung sein, der durch die minimale und maximale Konfiguration begrenzt wird.

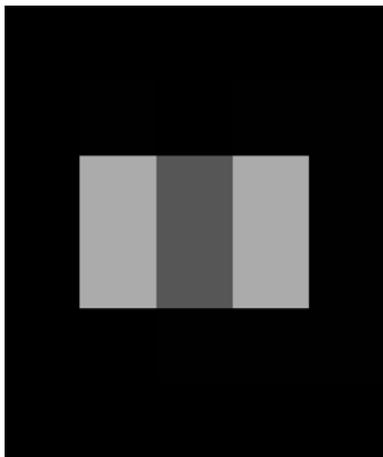


Abb. 5: Synthetisches Bild der Simulation mit 5 Fahrbahnmarkierungen in der Zielauflösung 5m/pel

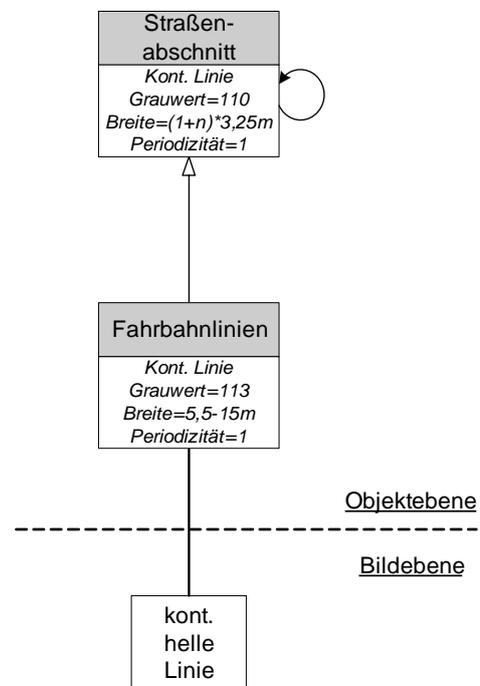


Abb. 6: Variables Straßenmodell in der Zielauflösung 5m/pel

6 Ausblick

In diesem Beitrag wurden neue Algorithmen als Weiterentwicklung der bestehenden Methoden zur Anpassung von Bildanalyse-Objektmodellen für die Extraktion von Straßen aus Luft- und Satellitenbildern an eine gegebene niedrigere Bildauflösung vorgestellt. Die Methoden zielen auf die automatische Anpassung von variablen Straßenmodellen, die eine variable Anzahl gleichartiger Objektteile durch die Verwendung dynamischer Relationen zulassen. Ein Beispiel zur automatischen Anpassung eines variablen Straßenmodells verdeutlicht die präsentierten Algorithmen.

Zukünftig sollen die Methoden zur auflösungsabhängigen Anpassung von Straßenmodellen auf realistischere Objektmodelle erweitert werden. Die Modellierung des typischen Netzwerkcharakters von Straßen gehört ebenso dazu wie die Einbeziehung von Kontextobjekten in die Modelle für eine zuverlässigere Objektextraktion. Weiterhin werden die Beispiel-Objektmodelle in das wissensbasierte Interpretationssystem GeoAIDA (Bückner, 2004) implementiert und bewertet. Die Extraktionsergebnisse in realen Luft- und Satellitenbildern unterschiedlicher Auflösungen können dann zur Verifikation der entwickelten Verfahren herangezogen werden.

Dank

Die Arbeit, die zum vorliegenden Beitrag führte, wird durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) unter dem Kennzeichen HE 1822/13 gefördert.

7 Literaturverzeichnis

- BÜCKNER, J., PAHL, M., STAHLHUT, O. & LIEDTKE, C.-E., 2002: A Knowledge-Based System for Context Dependent Evaluation of Remote Sensing Data - DAGM2002, Springer Verlag, Berlin, S. 58-65.
- FLORACK, L., HAAR ROMENY, B., KOENDERINK, J. & VIERGEVER, M., 1994: Linear Scale-Space - Journal of Mathematical Imaging and Vision, 4(4), S. 325-351.
- FÖRSTNER, W., 1993: A future of photogrammetric research - NGT Geodesia, 93 (8), S. 372-383.
- HELLER, J. & PAKZAD, K., 2005A: Adaption of Object Models for Road Extraction in Images of Different Resolution – Intern. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Inform. Sciences, Band XXXVI-8/W27. 3rd URBAN Symposium, Tempe, USA, 6 S., CD.
- HELLER, J. & PAKZAD, K., 2005B: Scale-Dependent Adaption of Object Models for Road Extraction - akzeptiert für 'Object Extraction for 3D City Models, Road Databases and Traffic Monitoring – Concepts, Algorithms, and Evaluation', 29-30. August 2005, Wien, 6 S.
- LINDBERG, T., 1994: Scale-Space Theory in Computer Vision - Kluwer Academic Publishers, 423 S.
- PAKZAD, K. & HELLER, J., 2004: Automatic Scale Adaptation of Semantic Nets - International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Band XXXV, Teil B3, S. 325-330, Istanbul.
(ebenfalls in: Publikationen der DGPF. Band 13. Halle, S. 67-76.)

Metadatenkonzepte zur Unterstützung der GIS-Bearbeitung im Monitoring bergbaulicher Umweltauswirkungen

HEIDRUN MATEJKA¹, WOLFGANG BUSCH¹, JULITA GORCZYK¹, FRANK MAUERSBERGER¹,
STEFAN NICKEL¹, TOBIAS RIEKEBERG¹, PETER VOSEN²

Zusammenfassung: Der untertägige Steinkohlenbergbau ist mit Bodenbewegungen und hieraus folgenden Beeinträchtigungen der natürlichen und anthropogenen Umwelt verbunden. Die bergbaubedingten Auswirkungen sind in einem begleitenden Monitoringverfahren zu prognostizieren sowie über die Zeit zu beobachten, zu kontrollieren und zu steuern. Dabei ist der Bergbaubetreiber verpflichtet, entscheidungsrelevante Unterlagen für die Genehmigungsbehörden zu erbringen. Zur Durchführung dieser Aufgabe wird das Fachinformationssystem Monitoring (FISMon) aufgebaut, dessen Metadatenkonzepte es erlauben, die Dimension Zeit in Geographische Informationssysteme (GIS) zu integrieren, die Genese von Geodaten zu dokumentieren und damit das Monitoring langfristiger Abbauvorhaben EDV-technisch zu unterstützen.

1 Monitoring bergbaubedingter Umwelteinwirkungen

Die Entnahme großer Mengen von Steinkohle in Teufen von über 1.000 m führt zu unterirdischen Hohlräumen, die sich nach dem Abbau unter dem Gebirgsdruck wieder schließen. Dies leitet einen Senkungsvorgang der nächst höheren Gesteinsschichten ein, der sich bis an die Erdoberfläche fortsetzt und aufgrund von Senkungen, Schiefungen und Verschiebungen Veränderungen an der Tagesoberfläche hervorrufen kann (KRATZSCH, 1997). Abbauvorhaben, welche derartige Senkungen der Erdoberfläche von 3 m und mehr verursachen, bedürfen gem. § 1 UVP-V Bergbau einer Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP). Nach § 52 Abs. 2a BBergG ist für deren Zulassung ein obligatorischer Rahmenbetriebsplan aufzustellen und hierfür ein Planfeststellungsverfahren nach Maßgabe der §§ 57a und 57b BBergG durchzuführen.

Die Laufzeiten dieser Rahmenbetriebspläne umfassen gegenwärtig etwa 25 Jahre. Da bei der Planung solcher langfristiger Vorhaben keine detaillierten Angaben zur Lagerstätte und somit zur Durchführung des Kohlenabbaus hinsichtlich der räumlich-zeitlichen Abfolge gemacht werden können, sind in dieser Phase auch senkungsbedingte Veränderungen der Umwelt nur unzureichend beschreibbar. Dies betrifft insbesondere die Auswirkungen auf das Grund- und Oberflächenwasser sowie auf die Arten- und Lebensgemeinschaften. Da zahlreiche wasser- und naturschutzrechtliche Entscheidungen somit zur Zeit der Rahmenbetriebsplanzulassung unmöglich sind, wird der Steinkohlenabbau in Nordrhein-Westfalen gegenwärtig durch ein System der räumlichen Beobachtung, Kontrolle und Steuerung der Umweltauswirkungen (Monitoring) begleitet.

¹ Dr. rer. nat. Heidrun Matejka, Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Busch, Dipl.-Ing. Julita Gorczyk, Dipl.-Geoökol. Frank Mauersberger, Dipl.-Ing. Stefan Nickel, Dipl.-Wirt.-Inf. Tobias Riekeberg, Institut für Geotechnik und Markscheidewesen, TU Clausthal, Erzstrasse 18, 38678 Clausthal Zellerfeld, mail to: heidrun.matejka@tu-clausthal.de

² Dipl.-Ing. Peter Vosen, Deutsche Steinkohle AG, Abteilung BG G1 – Geoinformation, Shamrockring 1, 44623 Herne.

Der Begriff Monitoring wird häufig mit dem Begriff der Dauerbeobachtung gleichgesetzt, beinhaltet aber im Rahmen eines Monitorings bergbaulicher Umweltveränderungen weitaus mehr. Rechtliche Auflagen fordern insbesondere, für fest vorgeschriebene Zeitschnitte eingetretene Umweltauswirkungen zu erfassen und kurzfristige Veränderungen auf der Grundlage zeitnaher Abbauplanungen zu prognostizieren. Um frühzeitig Abweichungen von erwarteten Entwicklungen zu erkennen, sind zudem bestehende Auswirkungsprognosen durch den periodischen Vergleich mit Ist-Zuständen zu überprüfen. Des Weiteren ist über die Einleitung von gegensteuernden und kompensatorischen Maßnahmen zu entscheiden sowie deren Wirksamkeit im Hinblick auf definierte Umweltqualitätsziele zu kontrollieren (vgl. BEZIRKSREGIERUNG ARNSBERG, 2002). Dem Bergbaubetreiber kommt dabei die Aufgabe zu, alle entscheidungsrelevanten Unterlagen im Sinne eines periodischen Nachtrags zum Rahmenbetriebsplan jährlich bzw. zweijährlich zu erbringen.

Das Monitoring bergbaulicher Auswirkungen kann unter der Berücksichtigung potentiell betroffener Umweltbereiche in unterschiedliche thematische Arbeitsbereiche untergliedert werden. Beispielsweise werden für das Gebiet *Kirchheller Heide / Hünxer Wald* - Bergwerk *Prosper-Haniel* der Deutschen Steinkohle AG (DSK) - folgende, inhaltlich miteinander verknüpfte Monitoringthemen unterschieden: Basis ist das *Senkungsmonitoring*, in dem geometrische Verformungen der Tagesoberfläche beobachtet und prognostiziert werden. Darauf aufbauend widmen sich das *Grundwassermonitoring* und das *Wasserwirtschaftliche Monitoring* den senkungsbedingten Veränderungen der Fließ- und Stillgewässer. Die Monitoringthemen *Ökologisches Fließ- und Stillgewässermonitoring*, *Biotoptypen-/Bodenmonitoring* und *Faunistisches Monitoring* handeln wiederum die resultierenden Auswirkungen auf Arten und Lebensgemeinschaften ab. Vor dem Hintergrund der interdisziplinären Aufgabenstellung sind mit der Durchführung des Monitorings externe Fachgutachter betraut, die themenspezifisch Zustandsdaten erheben, Auswirkungsprognosen erstellen und Umweltveränderungen bewerten. Diese Arbeiten werden von der DSK unterstützt, die alle relevanten Monitoringdaten intern vorhält und aufbereitet, GIS-basierte Veränderungsanalysen durchführt und den externen Gutachtern erforderliche Informationen zur Verfügung stellt.

2 Anforderungen an das Fachinformationssystem Monitoring

Aufgrund der Komplexität der Aufgabenstellung und der enormen Datenmengen kann die Verwaltung und Aufbereitung der Monitoringdaten seitens der DSK nicht ohne den Einsatz eines geeigneten Informationssystems durchgeführt werden. Dieses muss die Grundfunktionalitäten Geographischer Informationssysteme (GIS) zur Verarbeitung raumbezogener Daten integrieren und zudem die fachübergreifenden Besonderheiten sowie die zeitliche Komponente des längerfristig zu begleitenden Abbauprozesses berücksichtigen. Vor diesem Hintergrund wird derzeit am Beispiel des Bergwerkes *Prosper Haniel* am Institut für Geotechnik und Markscheidewesen (TU-Clausthal) in Zusammenarbeit mit dem Vorhabensträger das Fachinformationssystem Monitoring (FISMon) aufgebaut, an das folgende Anforderungen zu stellen sind:

- Abbildung aller Monitoring-Teilprogramme und dazwischen bestehender Abhängigkeiten,

- Erfassung, strukturierte Speicherung und Dokumentation der Monitoringdaten zu Ist- und Prognosezuständen sowie deren Zusammenführung über einen einheitlichen Raum- und Zeitbezug,
- Unterstützung der themenspezifischen GIS-Bearbeitungsschritte und Durchführung raumzeitlicher Analysen, insbesondere Veränderungsanalysen,
- Präsentation der Monitoringergebnisse als Grundlage für die Berichterstellung.

3 Aufbau und Komponenten von FISMon

Entsprechend der Softwareumgebung bei der DSK wird das FISMon auf der Basis des kommerziellen Geoinformationssystem ArcGIS der Firma ESRI in Kombination mit einer Oracle-Datenbank realisiert. Zur persistenten Speicherung der raumbezogenen Daten dient die FISMon-GeoDataBase (GDB), die zentral auf dem Datenbankserver abgelegt ist (vgl. Abb. 1). Diese baut auf dem ESRI-proprietären *Multiuser GeoDataBase-Modell* auf und nutzt das ArcGIS-spezifische Versionskonzept zur Speicherung unterschiedlicher Zustände von Geodaten in nutzerdefinierten "Snapshots" der GDB (vgl. ESRI, 2004). Darauf aufbauend werden im FISMon Daten unterschiedlicher Zeitschnitte, die im Rahmen der Berichterstellung für festgelegte Stichtage zu erheben bzw. zu prognostizieren sind, in unterschiedlichen Versionen der FISMon-GDB abgelegt. Kennzeichnend ist ein versionsübergreifend einheitliches Datenschema, das auf objektrelationalen Modellierungstechnologien basiert und die Klassen für die abzubildenden Geodaten sowie Beziehungen zwischen Layern und Geobjekten festlegt. Der clientseitige Zugriff auf diese Daten erfolgt mittels ArcSDE.

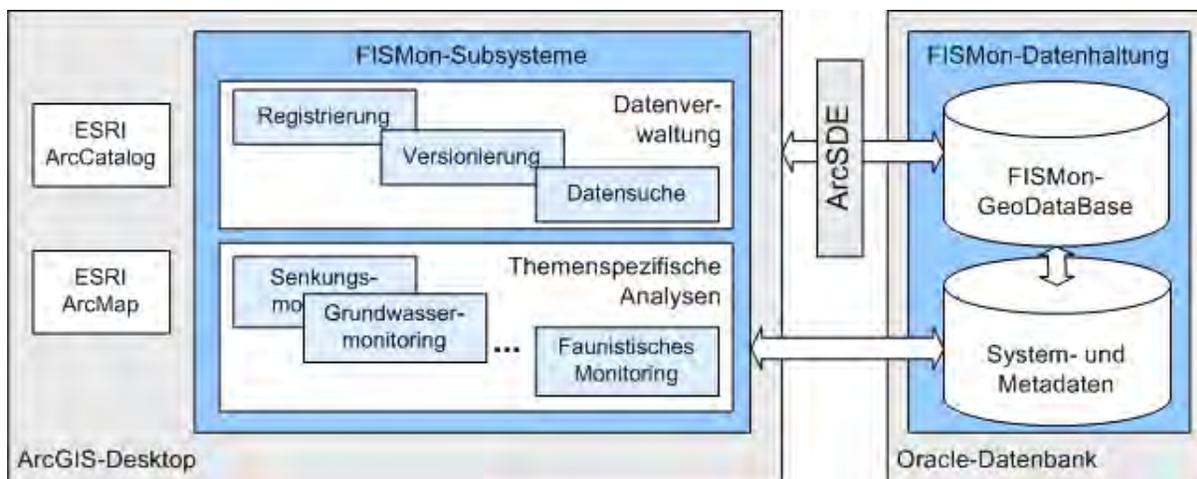


Abb. 1: Struktur des Fachinformationssystems Monitoring (FISMon)

Die FISMon-eigenen System- und Metadatentabellen stellen den zweiten Bestandteil der serverseitigen Datenhaltung dar. Diese dienen einerseits der Strukturierung und Hierarchisierung der zahlreichen Datenlayer im Monitoring. Andererseits werden dadurch für die GIS-Bearbeitung fach- und layerspezifische Zusatzinformationen bereitgestellt, deren Struktur und Inhalte in den nachfolgenden Kapiteln näher erläutert werden.

Die clientseitige GIS-Bearbeitung erfolgt über die ESRI-Komponenten ArcMap und ArcCatalog, die standardmäßig umfangreiche Möglichkeiten zur Analyse und Präsentation von Geodaten zur Verfügung stellen. Diese Applikationen werden durch FISMon-eigene Subsysteme ergänzt: Die zentrale Stellung nehmen die Datenverwaltungstools ein, die der Registrierung von Geodaten im FISMon, der Erfassung und Verwaltung von Geo- und Metadaten, der strukturierten Datensuche sowie der Versionsverwaltung dienen. Zusätzlich verfügt das FISMon über themenspezifische Analysetools, die die von ArcGIS bereitgestellten Bearbeitungsmöglichkeiten entsprechend den Anforderungen der GIS-Bearbeitung im Monitoring erweitern.

4 Metadatenkonzepte des FISMon

Bei der Konzeption und Entwicklung des FISMon spielt neben der persistenten Speicherung und Verwaltung raumbezogener Daten die Integration von Metadaten eine wichtige Rolle. Unter Metadaten werden im Allgemeinen Daten verstanden, mit deren Hilfe eine Informationsressource näher beschrieben und besser auffindbar gemacht wird. Im FISMon kommen Metadaten zwei übergeordnete Aufgabenbereiche zu:

- Zum einen muss der strukturierte Zugriff auf Datenlayer der unterschiedlichen Monitoringthemen und Zeitschnitte durch ein geeignetes Metadatenschema sichergestellt werden, da ArcGIS nur unzureichende Möglichkeiten zur Hierarchisierung und Gruppierung von Geodaten in einer GDB aufweist. Nur so kann eine Unterstützung des Anwenders bei der Datensuche und Navigation im umfangreichen Datenbestand des FISMon gewährleistet werden.
- Zum anderen müssen auf unterschiedlichen Daten- und Bezugsebenen layer- und themenspezifische Zusatzinformationen bereitgestellt werden, die geeignet sind, den Sachbearbeiter bei der Identifikation relevanter Datenquellen und der Beurteilung der Eignung von Datensätzen für bestimmte Aufgaben zu unterstützen. Im Rahmen des Monitorings sind hierbei an erster Stelle die Verwaltung und der Zugriff auf die temporalen Gültigkeiten der zeitvarianten Geodaten zu nennen. Die Integration der Zeit wird bisher durch kommerzielle GIS nicht unterstützt, ist aber im Monitoring die Grundlage für die Analyse und Bewertung von umweltrelevanten Veränderungen. Ferner ist die Dokumentation der Entstehungsgeschichte einzelner Geodaten und der inhaltlichen Abhängigkeiten zwischen verschiedenen Layern von besonderer Bedeutung. Insbesondere im Monitoring werden zahlreiche Layer - sowohl im Rahmen der Prognose als auch bei der Analyse und Bewertung von Umweltveränderungen - durch Transformations- und Analyseschritte aus anderen Geodaten abgeleitet. Das systemseitige Vorhalten und Aufzeigen dieser Beziehungen, die bisher in der individuellen Wissensbasis der jeweiligen Sachbearbeiter "abgespeichert" waren, unterstützt nicht nur den fachlich richtigen Umgang mit den Geodaten, sondern trägt auch zu einer erweiterten Bearbeiterunabhängigkeit und zur langfristigen Nutzbarkeit der Datenbasis bei.

Derzeitig werden zahlreiche Anstrengungen unternommen, Standards für die Beschreibung von Geodaten über Metadaten zu definieren und umzusetzen. Hierbei seien beispielsweise der FGDC-Standard in den USA (FGDC, 1994) und die internationale Metadaten-Norm ISO/TC 211 19115 (ISO, 2003) genannt, die vorrangig den Austausch von Geodaten als Ziel verfolgen. Potentielle Nutzer sollen durch die Einsicht der Metadaten in einem Datenkatalog die Eignung von Geodaten für einen bestimmten Anwendungszweck beurteilen und die Bezugsmodalitäten

wie auch sinnvolle Verarbeitungs- und Präsentationsmethoden feststellen können. Diese Zielsetzung wird von der Firma ESRI aufgegriffen: ArcGIS stellt Möglichkeiten zur Erfassung und Verwaltung von Metadaten zur Verfügung, deren Inhalte sich an den oben genannten Standards orientieren. Dabei sind Metadaten im plattformübergreifend les- und austauschbaren XML-Format abgelegt, das allerdings - im Vergleich zu relationalen Speicherstrukturen - eine datenbankseitige Verknüpfung von Geo- und Metadaten sowie den effizienten Zugriff auf Metainformationen aus der eigentlichen GIS-Bearbeitung heraus erschwert. Zudem wird durch das ArcGIS-spezifische Versionskonzept die Verwaltung von Metadaten für versionierte Klassen innerhalb einer GDB nicht unterstützt. D.h. pro Klasse kann nur ein Metadatensatz abgelegt werden, so dass versionsspezifische Metainformationen für einzelner Datenlayer nicht ohne grundsätzliche Änderungen bzw. Anpassungen des ESRI-proprietären GDB-Modells verwaltet werden können.

Vor dem Hintergrund der Einschränkungen bzgl. des Metadatenmodells von ArcGIS sowie der Zielsetzung, Daten überwiegend für die DSK-interne GIS-Bearbeitung bereitzustellen, werden die Möglichkeiten von ArcGIS zur Erfassung, Speicherung und Nutzung von Metadaten im Rahmen von FISMon nicht aufgegriffen. Anstelle dessen werden Metainformationen in den System- und Metadatentabellen abgelegt und direkt mit den Geodaten verknüpft. Das Metadaten-schema ist dabei – aufbauend auf eine Anforderungsanalyse – eng an die Spezifika der abzuspeichernden Geodaten und an notwendige GIS-Bearbeitungsschritte im Monitoring angepasst.

5 Metadatenkategorien im FISMon

Im Folgenden werden drei Metadatenarten vorgestellt, denen vor dem Hintergrund der aufgezeigten Anforderungen an die Metadatenhaltung besondere Bedeutung zukommt. Die vorgenommene Klassifizierung orientiert sich an den Arbeiten von BORNHÖVD (2001), der zwischen struktur- und semantikbeschreibenden Metadaten unterscheidet: Während die erstgenannte Kategorie den Aufbau und die strukturellen Beziehungen innerhalb einer Datenbasis beschreibt und somit überwiegend unabhängig vom konkreten Informationsgehalt der Daten ist, geben semantische Metadaten Auskunft über Inhalt, Qualität und Ursprung der eigentlichen Daten.

5.1 Strukturelle Metadaten

Diese Metadatenkategorie hat die Aufgabe, Klassen und Versionen der FISMon-GDB nach fachthemenatischen und aufgaben-orientierten Gesichtspunkten zu strukturieren und zu hierarchisieren. Einerseits kann somit dem Anwender die Datensuche und der Datenzugriff nach inhaltlich-fachlichen Kriterien ermöglicht werden, andererseits bilden diese Strukturen die Grundlage für die Erfassung und Verwaltung klassen- und klassengruppenspezifischer Metadaten, die den fachlich richtigen Umgang mit den Geodaten gewährleisten sollen.

Klassenbezogen werden durch strukturelle Metadaten folgende Gruppierungen vorgenommen:

- Auf oberster Ebene werden die Klassen nach dem Monitoringthema untergliedert.
- Innerhalb der hierarchisch übergeordneten Themenbereiche werden Klassen nach der inhaltlichen Zusammengehörigkeit und der Abhängigkeit von anderen Klassen in Klassengruppen (Kategorien) zusammengefasst. Dieser Gruppierung basiert auf der Analyse notwendiger Da-

tenverarbeitungsschritte im Monitoring und schließt Aspekte der Datengenese mit ein (vgl. Kap. 5.3).

- Zudem werden Klassen entsprechend ihrer Thematik in folgende Gruppen unterteilt:
 - Klassen, die nur bei der Beschreibung von Istzuständen verwendet werden,
 - Klassen, die nur für die Beschreibung von Prognosezuständen relevant sind,
 - Klassen, die zur Beschreibung von Ist- und Prognosezuständen notwendig sind.

Diese Gruppierungen sind systemseitig vorgegeben, nicht durch den Anwender manipulierbar und unabhängig von den eigentlichen, zeitvarianten Geodaten.

Ergänzend dazu werden für Versionen der FISMon-GDB datensatzbezogene, strukturelle Metadaten vorgehalten. Für jede Version umfassen diese das Monitoringthema sowie einen Versionsstatus (Ist- oder Prognoseversion), die vom Anwender beim Erstellen der Version angegeben werden müssen. In Verbindung mit den klassenbezogenen Metadaten erlauben diese Informationen eine Differenzierung von Versionen nach thematischen und aufgabenbezogenen Gesichtspunkten sowie eine strukturierte Klassenzuweisung zu Versionen: Während nach dem Versionskonzept von ArcGIS auf alle Klassen innerhalb der GDB uneingeschränkt zugegriffen werden kann, können in FISMon-Versionen nur die Klassen bearbeitet werden, die dem ausgewählten Monitoringthema angehören und dem Versionsstatus entsprechen.

5.2 Temporale Metadaten

Im Monitoring spielt insbesondere die Welt- bzw. Gültigkeitszeit raumbezogener Daten eine entscheidende Rolle, die in das FISMon durch temporale Metadaten integriert ist. Diese Zeit beschreibt die Gültigkeit von Objekten in der modellierten Realität, d.h. also die Zeit, für die ein Datensatz den Zustand der (tatsächlichen oder prognostizierten) Realwelt abbildet (vgl. KAISER, 2000). Damit sind Gültigkeitszeiten den semantikbeschreibenden Metadaten zuzuordnen. Im FISMon werden Gültigkeitszeiten mit Hilfe von zwei diskreten Zeitfolgetypen modelliert: Während die Gültigkeitszeit von Objekten nach dem *zustandsstabilen Ansatz* durch ein Zeitintervall beschrieben wird, sind Objekte nach dem *ereignisorientierten Ansatz* nur für einen Zeitpunkt gültig.

Temporale Metadaten werden im FISMon auf der Ebene von Klassen und Versionen vorgehalten:

- Auf Klassenebene umfassen diese einen fest definierten Zeitfolgetyp, der von der Veränderlichkeit der Klasse in der Realwelt bzw. der abzubildenden Fachthematik abhängt. Digitalen Höhenmodellen (DHM) beispielsweise wird der Zeitfolgetyp *ereignisorientiert* zugeordnet, da diese aufgrund der kontinuierlichen Senkungen die Realität nur zu dem Zeitpunkt beschreiben, zu dem sie vermessen bzw. für den sie mit Hilfe von digitalen Senkungsmodellen (DSM) errechnet wurden. DSM hingegen, die die Senkungen für einen festgelegten Zeitraum beschreiben, werden *zustandsstabil* modelliert. Unter Berücksichtigung des klassenspezifischen Zeitfolgetyps werden die jeweiligen Gültigkeitszeiten, die vom Nutzer bei der Einstellung raumbezogener Daten in das FISMon angegeben werden müssen, in den System- und Metadatentabellen abgelegt, mit den eigentlichen Geodaten verknüpft und so für die GIS-Bearbeitung verfügbar gemacht.

- Ergänzend wird auf der Metadatenebene jeder Version der Stichtag des jeweiligen Zeitschnittes zugeordnet, den diese Version im FISMon abbilden soll. In diesem Zusammenhang stellen temporale Restriktionen sicher, dass einer Version nur solche Geodaten zugewiesen werden können, deren Weltzeit den Stichtag der Version mit einschließt.

Damit erlauben es temporale Metadaten, die Weltzeiten von Geodaten für die GIS-Bearbeitung bereitzustellen und die zahlreichen Datenlayer - neben einer fachthematisch-inhaltlichen Untergliederung (vgl. Kap 5.1) - nach zeitlichen Aspekten zu gruppieren.

5.3 Genetische Metadaten

Zudem integriert das Metadatenkonzept von FISMon genetische Metadaten (vgl. STROBL 1995), deren Aufgabe es ist, layerspezifische Transformations- und Analyseschritte zu dokumentieren. Allgemeine Vorteile dieser, ebenfalls semantikbeschreibender Metadaten liegen in der langfristigen, bearbeiterunabhängigen Nachvollziehbarkeit von durchgeführten GIS-Bearbeitungen und von daraus resultierenden Abhängigkeiten sowie in den Vererbungsmöglichkeiten von Dateneigenschaften (z.B. temporale Gültigkeit oder Datenqualität) über mehrere Verarbeitungsschritte hinweg. Das Datenschema bzgl. genetischer Metainformationen setzt auf der Ausweisung von Klassengruppen auf (vgl. Kap. 5.1) und hält kategoriespezifische Strukturen vor, die für Geodaten unterschiedlicher Zeitschnitte das systemseitige Speichern kennzeichnender Transformationschritte ermöglichen. Beispielsweise können für ein DHM, das durch das Absenken eines anderen DHM mit Hilfe eines DSM entstanden ist, sowohl das Ausgangs-DHM als auch das verwendete DSM in den genetischen Metadaten abgelegt werden.

Genetische Metadaten können optional vom Anwender in das FISMon eingestellt werden und sind direkt mit den Geodaten verknüpft. Die Integration dieser Zusatzinformationen in die themenspezifischen Analysetools des FISMon und die Festlegung fachlicher und logischer Restriktionen, die u.a. temporale Constraint bezüglich der Verrechnung einzelner Datenlayer umfassen, erlauben eine verbesserte Workflow-Unterstützung des Anwenders und tragen zur Sicherung einer konsistenten Datenbasis bei.

6 Unterstützung des GIS-Bearbeitung durch Metadaten

Im Weiteren sollen exemplarisch die vorgestellten Metadatenkonzepte sowie Möglichkeiten für die Unterstützung von GIS-Bearbeitungsschritten im Monitoring anhand einer Aufgabenstellung aus dem *Wasserwirtschaftlichen Monitoring* aufgezeigt werden. Im Rahmen dieses Monitoringthemas ist insbesondere die Geometrie von Fließgewässern zu überwachen und für vordefinierte Zeitschnitte zu prognostizieren, um potentielle Beeinträchtigungen der Vorfluterfunktion frühzeitig erkennen und durch gegensteuernde Maßnahmen abwehren zu können. Hierzu werden sogenannte Längenschnitte erstellt, in denen u.a. die Höhen von Gewässersohlen und Uferlinien in Abhängigkeit der Lauflänge des Fließgewässers für unterschiedliche Zeitschnitte dargestellt und senkungsbedingte Änderungen aufgezeigt werden.

Zur Unterstützung dieser Aufgabe stellt FISMon das Analysetool *Längenschnitte plotten* bereit. Dieses greift auf die zeitvarianten Geodaten zum Fließgewässer und die damit verknüpften Metadaten zu, deren Aufbau und Inhalt zunächst näher beschrieben werden soll:

- In der FISMon-GDB werden zur persistenten Speicherung des Gewässernetzes Klassen vorgehalten, in denen u.a. der Sohlenverlauf und die Uferlinien für unterschiedliche Zeitschnitte abgelegt werden können.
- Diese Klassen sind in der Kategorie *Gewässernetz* zusammengefasst und durch folgende GIS-Bearbeitungsschritte gekennzeichnet: Die Geometrie- und Höhenwerte von Gewässernetzdaten werden im Regelfall aus einem detaillierten DHM (TIN-Format) des jeweiligen Zeitschnittes entnommen. Das zugrunde liegende DHM kann entweder direkt aus Vermessungsdaten generiert oder aber durch die Absenkung der Geländehöhen eines vermessenen DHM berechnet worden sein. Sind für Prognosezeitschnitte zusätzlich gewässerbauliche Maßnahmen (z.B. Verlegung eines Gewässerabschnittes) vorgesehen, werden diese in die Gewässernetzdaten des jeweiligen Zeitschnittes eingearbeitet. Damit können auf Teilabschnitten Abweichungen zwischen den Geometrien des zugrunde liegenden DHM und der Gewässernetzdaten auftreten.
- Vor dem Hintergrund dieser charakteristischen Bearbeitungsschritte werden für das Gewässernetz in unterschiedlichen Zeitschnitten genetische Metadaten verwaltet, die für jede Version Referenzen auf das zugrunde liegende DHM sowie auf eingebaute Maßnahmen umfassen.
- Temporale Metadaten und systemseitige Integritätsprüfungen stellen sicher, dass bei der Metadatenzuweisung die Gültigkeitszeitpunkte der Gewässernetzdaten und des zugeordneten DHM übereinstimmen.

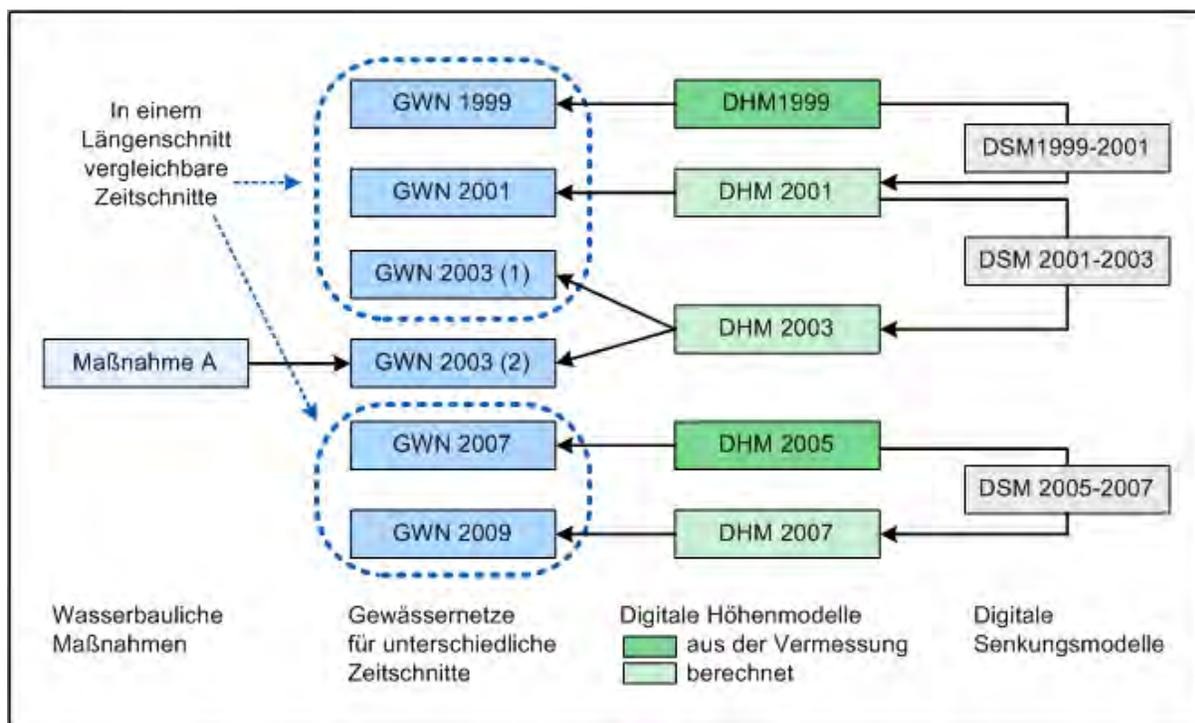


Abb. 2: Datengenerierung und Vergleichbarkeit von Fließgewässern in Längenschnitten

Das Analysetool *Längenschnitte plotten* wertet nun die genetischen Metadaten zum Gewässernetz für alle Zeitschnitte aus, wobei auch Daten zur Genese zugeordneter DHM mit einbezogen werden (vgl. Abb. 2). Darauf aufbauend wird der Anwender bei der Auswahl vergleichbarer

Zeitschnitte unterstützt: Durch das Tool werden für die Längenschnitterstellung standardmäßig nur solche Ist- bzw. Prognosezeitschnitte angeboten, die auf das gleiche DHM aus Vermessungsdaten zurückzuführen sind und die sich zudem nicht durch den Einbau gewässerbaulicher Maßnahmen unterscheiden. Diese Einschränkungen garantieren die Übereinstimmung der 2D-Verläufe zeitvarianter Fließgewässer, die Voraussetzung für eine vergleichende, laulängenabhängige Darstellung in einem Längenschnitt ist. Der Nutzer kann allerdings die systemseitige Vorauswahl erweitern, beispielsweise um Zeitschnitte anzuzeigen, für die vom Anwender Metadaten nicht oder nur unvollständig angegeben wurden.

8 Schlussfolgerung

Wie u.a. das vorgestellte Beispiel exemplarisch aufzeigt, ermöglichen es strukturelle, temporale und genetische Metadaten

- die im Monitoring anfallenden raum- und zeitvarianten Daten strukturiert abzulegen,
- Gültigkeitszeiten und bestehende Abhängigkeiten zwischen Geodaten zu dokumentieren und dem Anwender verfügbar zu machen,
- erweiterte Konsistenzprüfungen auf der Basis temporaler Gültigkeiten und fachthematischer Zusammenhänge in die GIS-Bearbeitung zu integrieren und so den Anwender bei der Durchführung fachspezifischer Aufgabenstellungen zu unterstützen.

Die vorgestellten Metadatenkonzepte erlauben es damit, die Grundfunktionalitäten von ArcGIS zur Verarbeitung räumlicher Daten entsprechend den EDV-technischen und fachlichen Anforderungen an ein Informationssystem zur Begleitung langfristiger Abbauvorhaben auszubauen und FISMon zur Unterstützung des begleitendes Monitoringverfahrens einzusetzen.

Literaturverzeichnis

- BEZIRKSREGIERUNG ARNSBERG, 2002: Entwurf eines Monitoringkonzeptes zur Erfassung der bergbaulichen Einwirkungen im Bereich Kirchheller Heide/Hünxer Wald für den Zeitraum bis 2019. – Bezirksregierung Arnsberg, Abteilung Bergbau und Energie.
- BORNHÖVD, C., 2001: Semantikbeschreibende Metadaten zur Integration heterogener Daten aus dem Internet. – Shaker Verlag, Aachen.
- ESRI, 2004: Versioning - An ESRI® Technical Paper.
- FGDC, 1998: Content Standard for Digital Geospatial Metadata (CSDGM) - Version 2. <http://www.fgdc.gov/metadata/metadata.html>.
- ISO, 2003: Geographic information – Metadata (ISO/TC 211 19115).Genf.
- KAISER, A., 2000: Die Modellierung zeitbezogener Daten. - Peter Lang Verlag, Frankfurt.
- KRATZSCH, H., 1997: Bergschadenkunde. - Deutscher Markscheider-Verein e.V., Bochum.
- STROBL, J., 1995: Grundzüge der Metadatenorganisation für GIS. - Salzburger Geographische Materialien: Beiträge zur Geographischen Informationswissenschaft (Proceedings AGIT 1995), (22), S. 275-286.

GOFC-GOLD und Initiativen zur Harmonisierung und Validierung von Landbedeckungsdatensätzen

KATHLEEN NEUMANN¹, MARTIN HEROLD² & CHRISTIANE SCHMULLIUS³

Zusammenfassung: GOFC-GOLD (Global Observation of Forest Cover – Global Observation of Land Dynamics) stellt Akteuren der Erdbeobachtung eine übergreifende Plattform für die internationale Kommunikation und Kooperation zur Verfügung. Dabei zielt es vorrangig auf einen Beitrag zur kontinuierlichen und standardisierten Erfassung von Landoberflächen zur Verbesserung der Informationsgrundlagen über den Kohlenstoffkreislauf und den Zustand von Ökosystemen auf globaler und regionaler Ebene. Ein Problem existierender Landbedeckungs-Datensätze ist deren unzureichende Vergleichbarkeit und Genauigkeitsanalyse. Aus diesem Grund wurde in internationaler Kooperation eine Implementierungsstrategie entwickelt, deren zentrales Anliegen eine Initiative zur Harmonisierung und Validierung der Datensätzen darstellt. Vor diesem Hintergrund werden gegenwärtig Pilotstudien durchgeführt, um Erfahrungen zur Harmonisierung von Landbedeckungsdaten bereitzustellen und zukünftige Projekte entsprechend zu unterstützen.

1 Einleitung

Technologischer Fortschritt, eine wachsende Weltbevölkerung und wirtschaftliche Umstrukturierungen unterwerfen unsere Erde und ihrer Umwelt raschen Änderungen. Im Zuge dieses ‚Globalen Wandels‘ werden zunehmend Forderungen von Entscheidungsträgern laut, umfangreiche und exakte Daten für die Bewertung unserer Umwelt offen zur Verfügung zu stellen. Diese sollen das Verständnis für stattfindende Umweltprozesse erhöhen, eine verbesserte Modellierung globaler Veränderungen ermöglichen und somit eine Grundlage zur Erarbeitung von Entwicklungsstrategien legen. Exakte und vergleichbare Landbedeckungsinformationen sind dafür von essentieller Bedeutung und werden vor allem von internationalen Abkommen und Konventionen, z.B. Agenda 21, Kyoto Protokoll gefordert (ROSENQVIST et al., 1999).

Als Reaktion auf diese Nachfrage wurden bisher verschiedene globale und regionale Landbedeckungsdatensätze erstellt. Ihre Entwicklung war durch die unterschiedlichen Interessen geprägt und Anforderungen und Methoden der leitenden Initiativen und Programme und spiegelt sich in den jeweiligen Karten wider. Zu den zur Verfügung stehenden Datensätzen zählen IGBP DISCOVER, das MODIS Landbedeckungsprodukt, die ‚Global Land Cover for the Year 2000‘ (GLC 2000), CORINE 1990 und 2000, AFRICOVER sowie weitere regionale Datensätze. In fast allen Kartierungsprojekten werden Harmonisierungs- und Validierungsbestrebungen erwähnt. Allerdings sind diese Karten und ihre Legenden nur eingeschränkt kompatibel. Die einzelnen Karten existieren vielmehr als eigenständige Datensätze (HEROLD et al., im Druck).

Dieser Beitrag soll Strategien und erste Erfahrungen bei der Bildung und Umsetzung einer Initiative zur Stärkung von Harmonisierungs- und Validierungsaktivitäten globaler Landbedeckungsdatensätze vorstellen. Die Bündelung und gemeinsame Nutzung internationaler

¹ Kathleen Neumann, Institut für Geographie, Lehrstuhl für Geoinformatik und Fernerkundung, Friedrich-Schiller-Universität Jena, Löbdergraben 32, 07743 Jena, e-mail: kathleen.neumann@uni-jena.de

² Dr. Martin Herold, e-mail: m.h@uni-jena.de

³ Prof. Dr. Christiane Schmullius, e-mail: c.schmullius@uni-jena.de

Kräfte basierend auf einer konsensorientierten Diskussion sind entscheidend für die erfolgreiche Durchführung einer solchen Aufgabe.

2 Der Rahmen für eine internationale Kooperation

Internationale Organisationen und Programme wie die ‚Group of Earth Observation‘ (GEO), das ‚Integrated Global Observing System‘ (IGOS) und ‚Global Monitoring for Environment and Security‘ (GMES) haben die Entwicklung einer Vielzahl satellitengestützter globaler Landbedeckungsdaten initiiert und unterstützt. Verschiedene internationale Initiativen, z.B. das ‚Committee in Earth Observation Satellites‘ (CEOS) versuchen, existierende und zukünftige Landbedeckungsdaten zu harmonisieren und zu validieren und somit die operationelle satellitenbasierte Erdbeobachtung zu unterstützen (Abbildung 1). Insbesondere der gerade veröffentlichte GEOSS 10-Jahres Umsetzungsplan (GEOSS, 2005) stellt die Harmonisierung und Validierung in den Mittelpunkt zukünftiger Erdbeobachtung.

Neben diesen Akteuren liefert das ‚Global Terrestrial Observing System‘ der Vereinten Nationen (GTOS) einen essentiellen Beitrag zur internationalen Beobachtung, Modellierung und Analyse terrestrischer Ökosysteme für die Unterstützung einer nachhaltigen Entwicklung. GTOS hat das Ziel, den Zugang zu globalen, langfristig gewonnenen und methodisch aufgearbeiteten Landbedeckungsinformationen zu verbessern sowie Umweltbeobachtungssysteme aufzubauen und zu stärken. Global Observation of Forest Cover – Global Observation of Land Dynamics (GOF-C-GOLD) ist ein GTOS-Gremium mit dem Bestreben, exakte, vergleichbare und validierte Landbedeckungsdaten auf regionaler und globaler Maßstabsebene einem breiten Nutzerkreis zugänglich zu machen (GTOS, 2004).

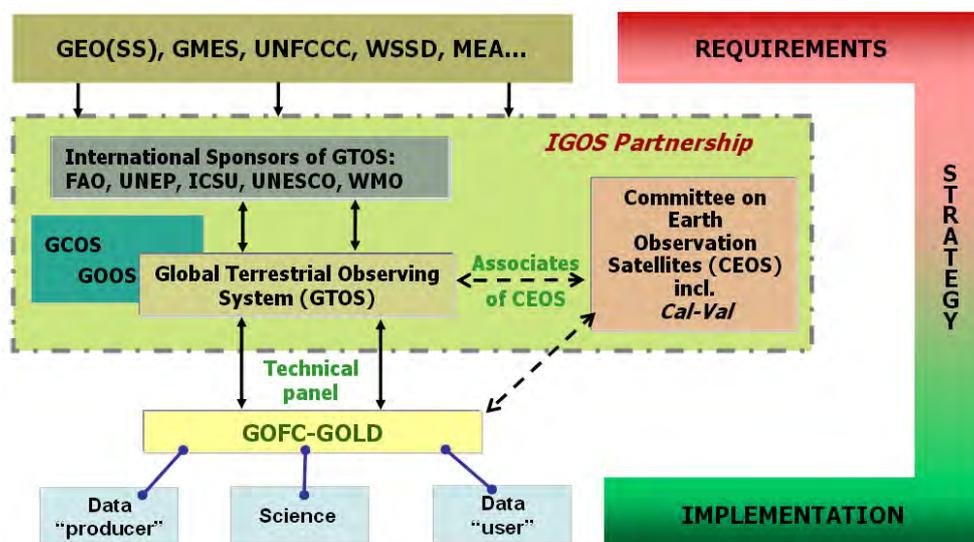


Abb. 1: Anforderungen, Umsetzung und Akteure bei der Erstellung regionaler und globaler Landbedeckungsdatensätze

2.1 GOFC-GOLD als Plattform für die Koordination der Landoberflächenbeobachtung

GOFC-GOLD stellt zahlreichen Akteuren der Erdbeobachtung, z.B. Raumfahrtbehörden, der Wissenschaftsgemeinde und anderen Datennutzern eine übergreifende Plattform für die internationale Kommunikation und Kooperation zur Verfügung. Die Aktivitäten des GOFC-GOLD Land Cover Teams werden seit Anfang 2004 durch das an der Friedrich-Schiller-Universität Jena errichtete und von der ESA finanzierte GOFC-GOLD Projektbüro koordiniert (www.gofc-gold.uni-jena.de). Hauptaufgabe des Projektbüros ist neben der Unterstützung von GOFC-GOLD in der Umsetzung seiner Ziele, vor allem die Unterstützung der ESA bei der Koordination und Durchführung von Harmonisierungs- und Validierungsaktivitäten. Dabei stehen vorrangig Landbedeckungsdatensätze im Vordergrund, bei deren Entwicklung die ESA federführend ist, z.B. GLOBCOVER.

2.2 GOFC-GOLD und internationale Umweltabkommen

Die Forderung internationaler Abkommen und Konventionen nach aktuellen, umfangreichen, exakten und vergleichbaren Landbedeckungsinformationen sind mannigfaltig. So unterstützt die ‚World Summit on Sustainable Development‘ (WSSD) der Vereinten Nationen die Entwicklung und einen breiten Einsatz von Erdbeobachtungstechnologien, auch aus dem Bereich der Satellitenfernerkundung, für die Gewinnung qualitativ hochwertiger Landbedeckungsdaten (UNITED NATIONS, 2002). Auch die ‚Vertragsstaatenkonferenz zur Klimarahmenkonvention‘ (COP), die das höchste Gremium der Klimarahmenkonvention bildet, betont die Einsatzmöglichkeiten von Fernerkundungstechnologien zur Gewinnung erforderlicher Daten.

Eine wichtige Richtlinie für GOFC-GOLD bildet der Umsetzungsplan der ‚Framework Convention on Climate Change‘ der Vereinten Nationen (UNFCCC) und des Global Climate Observing System (GCOS, 2004), der von COP 10 und GEO (3rd Earth Observation Summit) beschlossen wurde. Mit Hinblick auf die Beobachtung der Landbedeckung und ihrer Änderungen wird GOFC-GOLD die Verantwortung für folgende Aufgabenfelder zugewiesen:

- 1) Errichten internationaler Standards für die Erstellung von Landbedeckungskarten,
- 2) Entwicklung verlässlicher Methoden für die Genauigkeitsanalyse dieser Produkte und
- 3) Zugang zu umfangreichen Referenzdaten ermöglichen und
- 4) Unterstützung der Erstellung jährlicher Information über den globalen Zustand der Landoberfläche.

In zahlreichen weiteren internationalen Vereinbarungen und Umsetzungsplänen wird das Engagement von GOFC-GOLD befürwortet und unterstützt. Hierzu zählt neben den bereits genannten GTOS und IGOS Aktivitäten die Einbindung in weitere langfristig orientierte Landbedeckungsprogramme wie das ‚Global Land Cover Network‘ der Vereinten Nationen (GLCN) und das ‚Global Earth Observation System of Systems‘ (GEOSS).

3 Harmonisierung von Landbedeckungsdaten

3.1 Warum Harmonisierung?

In den vergangenen Jahren ist die Nachfrage nach exakten Informationen über die Landbedeckung und deren räumliche und zeitliche Änderungen stark gestiegen und resultierend daraus wurden seither zahlreiche regionale und globale Landbedeckungsdatensätze entwickelt. Diese Karten, die das Ergebnis verschiedenster nationaler und internationaler Initiativen und Programme sind, reflektieren unterschiedliche Kartierungsmethoden und Klassifikationsansätze

und erschweren somit einen Vergleich untereinander. Die Anwendungsmöglichkeiten der Datensätze werden dadurch stark eingeschränkt und die ursprüngliche Zielstellung, die Daten flexibel einem großen Nutzerkreis zur Verfügung zu stellen, kann nur noch bedingt erreicht werden. Interoperabilität und Vergleichbarkeit von Landbedeckungsdaten ist daher ein langfristiges Ziel aller in die Landbedeckungskartierung involvierten Akteure. Dieses Ziel kann jedoch nur basierend auf einem internationalen Konsens über Kartier- und Klassifikationsstandards erreicht werden (HEROLD et al., im Druck).

Die Problematik der mangelnden Vergleichbarkeit kann exemplarisch anhand der unterschiedlichen Definitionen von Wald verdeutlicht werden. Wald wird in den international genutzten Datensätzen anhand der Parameter Bedeckungsgrad und Wuchshöhe definiert, allerdings werden für diese Parameter in den einzelnen Datensätzen unterschiedliche Schwellwerte definiert (Tabelle 1). Die verschiedenen Klassendefinitionen bilden somit eine mögliche Ursache für die unterschiedliche räumliche Ausweisung von Wald in den jeweiligen Karten (Abbildung 2).

Tab.1: Schwellwerte für die Definition der Klasse ‚Wald‘

Datensatz	Bedeckungsgrad [%]	Mindesthöhe [m]
GLC2000	>15	3
CORINE	≥30	5
IGBP	>60	2
FAO	>10	5, Mindestfläche 0,5ha

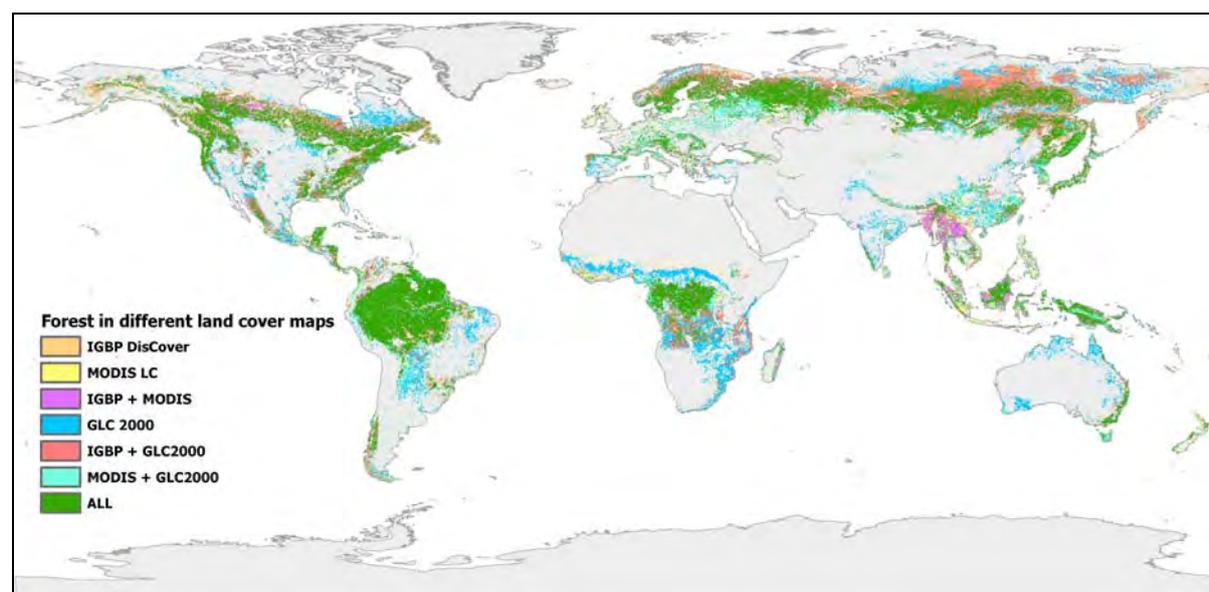


Abb. 2: Darstellung von Waldgebieten in verschiedenen Karten (Herold et al., im Druck).

3.2 Das Land Cover Classification System (LCCS) der Vereinten Nationen

Das Land Cover Classification System (LCCS) wurde gemeinsam von der ‚Food and Agriculture Organization of the United Nations‘ (FAO) und dem ‚United Nations Environment Programme‘ (UNEP) im Zuge internationaler Standardisierungsbestrebungen für Landbedeckungsdaten entwickelt.

LCCS ist ein a priori Klassifikationssystem für Landbedeckung das in der Lage ist, sowohl ein sehr hohes Maß an Flexibilität (=Beschreibung aller global vorkommender Landbedeckungsformen unabhängig von der gewünschten Detailliertheit) als auch eine Standardisie-

nung der Klassendefinition (durch die Vorgabe fest definierter Schwellwerte) für eine Nutzung zwischen verschiedenen Anwendern, zur Verfügung zu stellen. LCCS ist keine Legende sondern bildet die Grundlage für die Erstellung einer solchen.

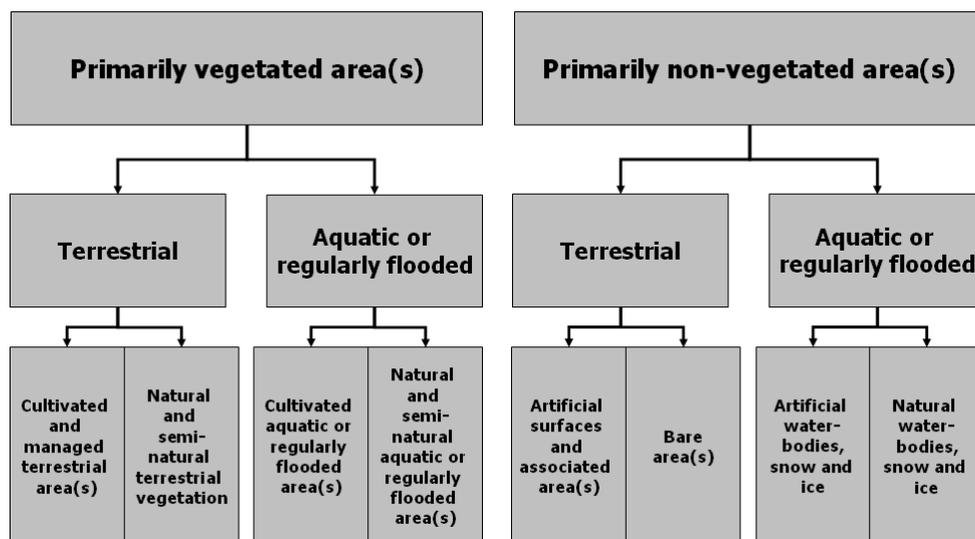


Abb. 3: LCCS-2 Benutzeroberfläche in der ‚dichotomous phase‘

LCCS ermöglicht eine flexible Klassenerstellung anhand einer beliebigen Kombination von Landbedeckungsattributen (= ‚classifiers‘). Der Anwender wird nicht gezwungen, seine Landbedeckungsformen den, in einer starren Legende vordefinierten Klassen zuzuordnen, sondern er kann seine Klassen beliebig definieren. LCCS unterscheidet in der ersten Klassifikationsphase (= ‚dichotomous phase‘) zwischen acht Hauptklassen (Abbildung 3). Diese können in der zweiten Klassifikationsphase (= ‚modular-hierarchical phase‘) unter Verwendung und Kombination der Classifiers konkretisiert werden. Lebensform (für Vegetation), Wuchshöhe (für Vegetation), Tiefe (für Gewässer) und räumliche Aspekte sind Beispiele für solche Classifiers. Die Hinzunahme von Umweltattributen (z.B. Klima, Boden, Erosion) und speziellen Attributen (z.B. Art der Feldfrucht, Salzgehalt) erlaubt eine weitere Differenzierung und Konkretisierung der Klassen. Die flexiblen Definitionsmöglichkeiten ermöglichen es dem Anwender, eine Vielzahl von Landbedeckungsklassen zu definieren. Die sich hinter jeder einzelnen Klasse verborgene Kombination von Classifiers und der Anwendung von Schwellwerten bei diesen Classifiers garantiert trotz der potenziellen Vielzahl eine eindeutige Unterscheidung aller möglichen Klassen (DI GREGORIO & JANSSEN, 2000).

Von großer Bedeutung bei der Legendenerstellung mittels LCCS ist die Möglichkeit, flexible aber dennoch standardisierte Mischklassen zu definieren. Anhand eines eindeutigen LCCS-Codes ist die exakte Zusammensetzung jeder Mischklasse erkennbar. Mischklassen können aus einer kartografischen Generalisierung (durch die Berücksichtigung von Mindestkartiereinheiten), einem möglichen Nebeneinander verschiedener Bedeckungsformen (z.B. Schnee oder Eis), einer räumlichen Überlagerung verschiedener Landbedeckungen (z.B. Stockwerkartige Kombination von Wald und Landwirtschaft) oder der zeitlicher Abfolge verschiedener Landbedeckungsformen (nur bei landwirtschaftlichen Nutzungen) resultieren. Wichtige Anwendungen fand LCCS in der Erstellung der Legende für ‚Global Land Cover of the Year 2000‘ und im AFRICOVER Projekt der Vereinten Nationen.

Im Zuge der Harmonisierungsbestrebungen ist derzeit GOF-C-GOLD aktiv tätig bei der Übersetzung existierender Landbedeckungskarten und deren Legenden in LCCS (HEROLD & SCHMULLIUS, 2004). Umfangreiche Vergleiche und Übersetzungen wurden bisher für den europäischen CORINE Datensatz durchgeführt. Dabei zeigte sich, dass einige Klassen sehr

gut LCCS-kompatibel sind, sich aber CORINE Klassen die ein komplexes Landbedeckungsmuster widerspiegeln nur bedingt sinnvoll nach LCCS übersetzen lassen. Bei der Übersetzung der IGBP Legende (die auch für die Landbedeckungsklassifikation der MODIS Daten genutzt wird) nach LCCS traten dagegen nur geringe Schwierigkeiten auf.

Die LCCS Software wird regelmäßig fortgeschrieben und ist unter <http://www.glc-lccs.org> verfügbar. LCCS wurde bei der International Organization for Standardisation (ISO) eingereicht, um den Status eines internationalen Standards zu erlangen.

3.3 Handlungsbedarf für GOF-C-GOLD

GOF-C-GOLD empfiehlt allen Akteuren, die in die Kartierung der Landbedeckung involviert sind, LCCS für die Entwicklung neuer Legenden sowie für die Übersetzung bereits existierender Legenden zu nutzen. Dieses Vorgehen wird auf internationaler Ebene von Produzenten und Nutzern regionaler und globaler Landbedeckungsdaten im breiten Rahmen unterstützt. Um bereits bekannte Probleme wie semantische Fehler, uneindeutige Klassendefinitionen und andere Unstimmigkeiten bei der Legendenerstellung zu vermeiden ist es empfehlenswert, auf bisherige Erfahrungen, z.B. in der Wahl von Schwellwerten bei der Definition der Landbedeckungsparameter, zurückzugreifen. Initiativen und Bemühungen zur Verknüpfung existierender Datensätze dürfen jedoch nicht darüber hinwegtäuschen, dass eine optimale Harmonisierung nur möglich ist, wenn sie schon in der Entstehungsphase des Datensatzes ansetzt. Das heißt, eine effiziente Harmonisierung kann nur gewährleistet werden, wenn diese bereits auf die Definition der Landbedeckungsklassen Einfluss nehmen kann. Sobald eine bereits bestehende, nicht LCCS-kompatible Legende nach LCCS übersetzt wird, können Inkonsistenzen auftreten. Diese wiederum schränken die unmittelbare Vergleichbarkeit dieser Legende mit anderen Legenden ein.

4 Validierung von Landbedeckungsdaten

4.1 Notwendigkeit der Datenvalidierung

Obwohl derzeit existierende Landbedeckungskarten Ungenauigkeiten aufweisen, wurden sie bisher nur selten beziehungsweise in unzureichendem Maße validiert (LATIFOVIC & OLTTHOF, 2004). Vielmehr beschränkten sich Genauigkeitsanalysen bislang, häufig aufgrund mangelnder Finanzierungsmöglichkeiten und unzureichenden Referenzdaten, auf das Aufzeigen von Ungenauigkeiten einzelner Datensätze bzw. Klassen. Eine fehlende oder ungenügende Validierung schränkt jedoch das ursprüngliche Ziel der Datensätze, nämlich ein breites Anwendungsspektrum zu bedienen, deutlich ein.

Ergebnisse einer Validierung und die Bereitstellung dieser Informationen sind sowohl für die Nutzer als auch für die Hersteller der Karten hilfreich. Dem Nutzer erlauben sie einen sicheren Umgang mit den Karten, auch kann der Hersteller durch Hinweise auf Ungenauigkeiten Einfluss auf eine angemessene Verwendung der Karten nehmen. Derzeit ist es Nutzern nicht klar welcher global Datensatz für eine bestimmte Anwendung am besten geeignet ist und warum. Dem Hersteller dient die Validierung vorrangig zur Selbstbewertung und bietet eine gute Möglichkeit, aus Fehlern zu lernen. Mit einer Genauigkeitsanalyse wird außerdem die Grundlage für eine Bewertung und einen Vergleich verschiedener Klassifikationsansätze und Algorithmen geschaffen (CONGALTON, 2004).

Eine Vielzahl von Ansätzen wurde bisher entwickelt, um Genauigkeitsanalysen für satellitenbasierte Landbedeckungskarten durchzuführen. Die meisten quantitativen Methoden basieren auf einer Analyse der aus dem Datensatz abgeleiteten Fehlermatrix. Neuere Ansätze

konzentrieren sich auf die Faktoren, die die Genauigkeitsbewertung der Karte beeinflussen. Hierzu zählen neben Art und Umfang der Stichprobe auch das Klassifikationssystem, die Genauigkeit der Referenzdaten sowie die räumliche Fehlerverteilung (LATIFOVIC & OLTHOF, 2004).

4.2 Die GOF-C-GOLD Validierungsinitiative

Die Validerung von Landbedeckungsdaten stellt aufgrund des hohen Anteils von Mischpixeln, den Schwierigkeiten bei der genauen Lagebestimmung des Datensatzes sowie logistischen Hürden bei der Erhebung von Referenzdaten vor Ort eine große Herausforderung dar. GOF-C-GOLD startete daher in Kooperation mit dem Committee on Earth Observation Satellites' (CEOS) und dessen Arbeitsgruppe für Kalibrierung and Validierung (CEOS Cal-Val) eine internationale Validierungsinitiative deren Ziel es ist, die Erfahrungswerte und Ressourcen aller in die Erdbeobachtung involvierten Akteure effektiv zu kombinieren und daraus resultierende Synergieeffekte für gemeinsame Validierungsaktivitäten zu nutzen. Zu den Hauptnutzern dieser Initiative zählen neben den Raumfahrtsbehörden ESA und NASA vor allem die Datennutzer, z.B. die FAO und das ‚Joint Research Center der Europäischen Kommission‘ (JRC), sowie CEOS-Cal/Val selbst (MORISSETTE et al., 2004).

Ziel der GOF-C-GOLD/CEOS Initiative ist es, eine konsistente, einheitliche und aktuelle Referenzdatenbank zu erstellen und zu pflegen. Das kann jedoch nur erreicht werden wenn ein neuer Satz Validierungsflächen zur Verfügung steht. Bei der Auswahl dieser Flächen sollte darauf geachtet werden, dass diese unabhängig von bereits existierenden Landbedeckungskarten ausgewählt werden und dass sie für eine Validierung verschiedener Karten genutzt werden können. Die Idee ist, eine ‚lebende‘ Datenbank zu entwickeln die all diese Flächen inklusive Metadaten beinhaltet, um sie für die Validierung bestehender und zukünftiger Landbedeckungskarten zu nutzen. Die Validierung selbst soll vorrangig unter Auswertung hoch auflösender Satellitendaten erfolgen. Eine Fortführung operationeller Satellitenprogramme zur Beobachtung der Erdoberfläche ist daher essentiell für eine erfolgreiche Entwicklung und Fortführung der Datenbank (HEROLD et al., im Druck).

5 GLOBCOVER – Ein aktuelles Beispiel für die Umsetzung der Harmonisierungs- und Validierungsbestrebungen

Eine bedeutende, sich derzeit im Entstehungsprozess befindende globale Landbedeckungskarte ist GLOBCOVER. Das GLOBCOVER Projekt wurde 2004 von der ESA gestartet und wird nun von einem Netzwerk an internationalen Partnern (UN, EU, GOF-C-GOLD) umgesetzt. Im Rahmen von GLOBCOVER wird, basierend auf derzeit gewonnenen ENVISAT-MERIS Satellitenbilddaten mit einer räumlichen Auflösung von 300m, eine globale Landbedeckungskarte für das Jahr 2005 erstellt. Diese Karte dient zur Aktualisierung und Ergänzung vorangegangener Karten, vorrangig der ‚Global Land Cover for the Year 2000‘ (GLC2000). GLOBCOVER zeichnet sich ebenso wie GLC2000 durch eine LCCS-kompatible Klassifikation der Landbedeckung aus und ermöglicht dadurch einen direkten Vergleich beider Datensätze. Die validierte GLOBCOVER Karte soll 2008 zur Verfügung stehen.

Die vorgestellten Ansätze der Harmonisierung von Landbedeckungsdaten sowie der Validierung dieser Daten können im Rahmen des GLOBCOVER Projektes unmittelbar angewandt werden. Die Aufgaben für GOF-C-GOLD erstrecken sich vor allem auf die Definition einer standardisierten aber dennoch flexiblen Kartenlegende sowie auf die Genauigkeitsanalyse der fertigen Landbedeckungskarte. Weitere Informationen und Zugang zum GOF-C-GOLD Newsletter finden Sie im WWW:

- GTOS: <http://www.fao.org/gtos/>
- CEOS Cal-Val Land group: <http://landval.gsfc.nasa.gov/LPVS/>
- GOFc-GOLD: <http://www.fao.org/gtos/gofc-gold/>
- GOFc-GOLD land cover project office: <http://www.gofc-gold.uni-jena.de/>
- Land cover IT newsletter: <http://www.gofc-gold.uni-jena.de/sites/letter.html>

6 Literaturverzeichnis

- CONGALTON, R. G., 2004: Putting the Map Back in Map Accuracy Assessment. - Remote Sensing and GIS Accuracy Assessment. 1. Auflage, 304 S., CRC Press, Boca Raton.
- DI GREGORIO, A. AND JANSEN, L.J.M, 2000: Land Cover Classification System (LCCS): Classification Concepts and User Manual. - Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- GCOS, 2004: Implementation plan for the Global Observing System for Climate in support of the UNFCCC, October 2004, GCOS – 92, WMO Technical Document No. 1219, (WMO; Geneva), 153 pp., URL: <http://www.wmo.ch/web/gcos/gcoshome.html>. 2004.
- GEOSS, 2005: The Global Earth Observation System of Systems (GEOSS) 10-Year Implementation Plan and Reference Document, URL: <http://earthobservations.org>
- GLOBAL TERRESTRIAL OBSERVING SYSTEM (GTOS), 2004: GTOS Biennial Report 2002-2003. - GTOS Report Series 34, 36 S.
- HEROLD, M., WOODCOCK, C., DI GREGORIO, A., MAYAUX, P., BELWARD, A. AND SCHMULLIUS, C. A joint initiative for harmonization and validation of land cover datasets IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, *im Druck*.
- Herold M. and C. Schmillius 2004, Report on the Harmonization of Global and Regional Land Cover Products, Workshop report at FAO, Rome, Italy, 14-16 July 2004, GOFc-GOLD report series 20. URL: <http://www.fao.org/gtos/gofc-gold/series.html>.
- LATIFOVIC, R. AND OLT Hof, I., 2004: Accuracy assessment using sub-pixel fractional error matrices of global land cover products derived from satellite data. - Remote Sensing of Environment 90, S. 153-165.
- MORISSETTE, J.T., PRIVETTE, J. L., STRAHLER, A., MAYAUX, P. AND JUSTICE, C. O., 2003: Validation of Global Land-Cover Products by the Committee on Earth Observing Satellites. - Remote Sensing and GIS Accuracy Assessment. 1. Auflage, 304 S., CRC Press, Boca Raton.
- ROSENQVIST, A., IMHOFF, M., MILNE A. AND DOBSON C., 1999: Remote Sensing and the Kyoto Protocol: A Review of Available and Future Technology for Monitoring Treaty Compliance. - Workshop Report of the International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS), Michigan, USA, October 20-22, 1999.
- UNITED NATIONS, 2002: Report of the World Summit on Sustainable Development. - Johannesburg, South Africa, 26 August- 4 September 2002.

Inwertsetzung von Geobasisdaten für Fachanwendungen am Beispiel der Bodenversiegelungserhebung auf Grundlage des ATKIS Basis-DLM

GOTTHARD MEINEL, ANITA HERNIG¹

Zusammenfassung: Die zunehmende Bodenversiegelung ist neben der Klimaveränderung das größte Umweltproblem der Industriestaaten. Eine umweltgerechte Flächenhaushaltspolitik benötigt ein quantitatives Monitoring der Bodenversiegelung. Eine exakte Erhebung ist sehr aufwendig und in der Fortschreibung meist nicht gesichert. Darum liegt hier die Nutzung fortschreibungsgesicherter Geobasisdaten, wie ATKIS, nahe. In diesem Beitrag wird eine Methode zur Ableitung der Bodenversiegelung aus dem ATKIS Basis-DLM vorgestellt und die Möglichkeiten und Grenzen des Verfahrens aufgezeigt. Dazu wird für alle Objektarten des ATKIS Basis-DLM eine Berechnung mittlerer Versiegelungswerte auf der Grundlage einer hochgenauen Bodenversiegelungserhebung durchgeführt. Anschließend wird für zwei Städte die Bodenversiegelung bestimmt und mit Referenzwerten verglichen. Im Ergebnis ist die Nutzung von ATKIS zur Bestimmung gesamt- und teilstädtischer Bodenversiegelungswerte gegeben, kleinteiligere Ausweisungen sind auf Grund der ungenügenden Differenzierung der Bebauung problematisch.

1 Problemstellung

Nach wie vor ist trotz schrumpfender Bevölkerungszahl eine besorgniserregende Flächeninanspruchnahme durch Siedlungstätigkeit zu verzeichnen. So ist die Zunahme der Siedlungs- und Verkehrsfläche (SuV) laut Umwelt-Barometer im Deutschen Umweltindex (DUX) das dringlichste Umweltproblem in Deutschland. Vom Ziel, den Flächenverbrauch von derzeit 119 ha/d bis zum Jahre 2020 auf 30 ha/d zu senken, ist man weit entfernt. So wuchs 2003 in Deutschland die Siedlungsfläche um 1,0 % und die Verkehrsfläche um 0,4 % (Statistisches Bundesamt, 2004). Seit der ersten gesamtdeutschen „Flächenerhebung nach Art der tatsächlichen Nutzung“ im Jahr 1993 nahm die Siedlungs- und Verkehrsfläche um 11,9 % zu! Von der Siedlungsfläche sind im Mittel etwa 50 % überbaut bzw. versiegelt, bei der Verkehrsfläche ist der Bodenversiegelungsgrad noch wesentlich höher (UMWELTBUNDESAMT, 2003).

Wegen ihrer negativen Wirkung auf Bodenwasserhaushalt, Mikroklima, Flora und Fauna (Zerstörung von Lebensräumen), Lärm und Stadtklima (Überwärmung) ist der Bodenversiegelungsgrad ein Basisindikator der Stadtökologie. Nur durch Erhebung der zeitlichen und räumlichen Entwicklung (Monitoring) des gesamt- und teilstädtischen Bodenversiegelungsgrades kann der tatsächliche Erfolg einer nachhaltigen Flächenhaushaltspolitik gemessen und beurteilt werden.

Für ein Monitoring der Entwicklung der Bodenversiegelung ist deren Kartierung notwendig. Diese muss in Abhängigkeit von der Aufgabenstellung in unterschiedlicher räumlicher Auflösung erfolgen. Eine hochgenaue (grundstücksscharfe) Ermittlung der Bodenversiegelung ist

¹ Dr. Gotthard Meinel, Anita Hernig, Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung e.V., Weberplatz 1, 01217 Dresden, e-mail: G.Meinel@ioer.de

im Rahmen der Einführung gesplitteter Regen-/Abwassergebühren notwendig und wurde bereits von einigen Kommunen in Deutschland realisiert. Die sehr aufwendige Kartierung der Bodenversiegelung erfolgte in diesen Fällen in der Regel auf Basis von Luftbilddaten im Maßstab 1 : 5 000 durch manuelle Kartierung überbauter Flächen und voll- oder teilversiegelter Böden.

Für die Stadtplanung, -umweltbeobachtung und -vorsorge ist eine räumlich geringer auflösende Erhebung der Bodenversiegelung ausreichend. Hier kann entweder eine visuelle Bewertung des Bodenversiegelungsgrades für jeden städtischen Baublock auf Basis von aktuellen Satelliten- oder Luftbildern (MEINEL, 2000) oder durch automatische Verarbeitung der multispektralen Information (einschließlich des Infrarotkanals) von Satellitenbilddaten (MEINEL, 1996) oder Scannern (MEINEL, 1997) erfolgen. Eine denkbare indirekte Bodenversiegelungsbestimmung aus der „Flächenerhebung nach Art der tatsächlichen Nutzung“ ist für Kommunen unzureichend, da sie nur zu einem sehr ungenauen städtischen Gesamtwert führt, denn die Daten sind nur auf Gemeindeebene verfügbar. Letztlich muss konstatiert werden, dass eine teilräumliche, effiziente und preiswerte Erhebung der Bodenversiegelung für die Stadtplanung und Umweltvorsorge ein derzeit ungelöstes Problem darstellt.

2 Untersuchungsziel

Ziel der Arbeit ist die Entwicklung einer kosteneffizienten Methode zum Monitoring städtischer Bodenversiegelung in ausreichender Genauigkeit. Es liegt der Gedanke nahe, vorhandene, in ihrer Fortschreibung gesicherte Geobasisdaten zu nutzen und aus diesen mittlere Bodenversiegelungswerte abzuleiten. Die wichtigste topographische Geobasisdate in Deutschland ist das ATKIS Basis-DLM (früher DLM25), welches auch den Kommunen über die Landesvermessungsämter zur Verfügung steht. Zielstellung der Arbeit ist es nun, ein Verfahren zur Erhebung der Bodenversiegelung auf Basis von Versiegelungsprofilen (Histogramme, Mittelwert der Bodenversiegelung) der Objektarten des ATKIS Basis-DLM zu entwickeln. Die Versiegelungsprofile sollen dabei auf Basis einer hochgenauen luftbildgestützten Bodenversiegelungskartierung der Stadtfläche Dresdens (1 : 5 000) durch GIS-technische Verschneidung mit dem ATKIS Basis-DLM (Maßstab 1 : 25 000) und einer anschließenden statistischen Analyse für jede ATKIS-Objektart erhoben werden. Durch spätere Anwendung der mittleren Bodenversiegelungswerte aller Objektarten auf beliebige ATKIS-Daten könnten dann räumlich aggregierte Versiegelungswerte effizient ermittelt werden. Die Genauigkeit der ermittelten Bodenversiegelungswerte soll dann für verschiedene räumliche Einheiten geprüft werden.

3 Eingangsdaten

3.1 Referenzdaten – Bodenversiegelungskartierung der Stadtentwässerung Dresden

Dresden hat die ehemalige Abwassergebühr in eine getrennte Schmutz- und Niederschlagswassergebühr (letztere wird auch als Bodenversiegelungsgebühr bezeichnet) überführt. Letztere errechnet sich aus dem Anteil der überbauten und versiegelten Fläche eines Grundstücks. Das Gebührensplittung erhöht die Gebührengerechtigkeit, wird dem Verursacherprinzip besser gerecht und fördert letztlich das Problembewusstsein zum Thema „Bodenversiegelung“.

Voraussetzung für die gesplittete Gebührenerhebung ist eine grundstücksbezogene Datenbank, die genaue Flächenangaben zu den überbauten (einschließlich Dachüberstand!), befestigten (voll- und teilversiegelt) und unbefestigten Grundstücksflächen beinhaltet. Diese wurde durch Luftbildkartierung der versiegelten und überbauten Flächen im Auftrag der Stadtentwässerung Dresden erarbeitet. Dazu wurden Luftbilder im Bildmaßstab 1 : 5 000 orthorektifiziert und nach einer „Auswerte- und Erfassungsrichtlinie“ unter stereoskopischer Sicht digitalisiert.

Die Geometriedaten dieser Erhebung einschließlich des Bodenversiegelungswertes für jede Fläche standen für die vorliegenden Untersuchungen flächendeckend für die Stadt Dresden zur Verfügung. Die Daten wurden von der Stadtentwässerung Dresden im DXF-Format bezogen (220 Teilareale mit insgesamt über 300 000 Polygonen!). Tabelle 1 gibt den verwendeten Klassifikationsschlüssel und die dazugehörigen Bodenversiegelungswerte der Erhebung wieder.

Tab. 1: Klassifikationsschlüssel der Bodenversiegelungsdaten

Objektart	Definition/Eigenschaft	Bodenversiegelungswert
Dächer	Alle Dachformen außer Gründächer	100 %
Gründächer	Flachdächer, die eindeutig als Gründach erkennbar sind	50 %
Wasserundurchlässige Flächen	Beton, Asphalt, Platten	100 %
Teildurchlässige Flächen	Pflaster, Platten mit versickerungsfähigen Fugen (teildurchlässig)	70 %
Schwachableitende Flächen	Wassergebundene Decken, wie Kies und Schotter (teildurchlässig)	50 %
Restfläche	Unbefestigte Flächen, wie Rasen, Garten, Wiese etc.	0 %

Die Kartierung erfolgte mit einer Lagegenauigkeit $< 0,2$ m. Damit standen für die Untersuchung hochgenaue Bodenversiegelungsdaten zur Verfügung, die für die Erstellung von Referenzprofilen der Versiegelung geeignet sind.

3.2 Geobasisdaten ATKIS Basis-DLM

Das Amtliche Topographisch-Kartographische Informationssystem ATKIS ist in Deutschland die grundlegende Digitale Topographische Datenbasis. Es dient zur einheitlichen topographischen Beschreibung des Gebietes der Bundesrepublik Deutschland durch Digitale Landschaftsmodelle (DLM). Im Rahmen des ATKIS-Projekts werden Landschaftsmodelle unterschiedlicher Informationsdichte aufgebaut: Basis-DLM, DLM50, DLM250 und DLM1000. Das DLM beschreibt die topographischen Objekte der Landschaft und das Relief der Erdoberfläche im Vektorformat. Die Objekte werden einer bestimmten Objektart zugeordnet und durch ihre räumliche Lage, ihren geometrischen Typ, beschreibende Attribute und Beziehungen zu anderen Objekten (Relationen) definiert. Jedes Objekt besitzt deutschlandweit eine eindeutige Identifikationsnummer (Identifikator). Welche Objektarten ein DLM beinhaltet und wie die Objekte zu bilden sind, ist im ATKIS-Objektartenkatalog (ATKIS-OK) festgelegt.

Für eine Bodenversiegelungserhebung, abgeleitet aus ATKIS-Daten, ist einzig das Basis-DLM relevant. Dieses wird inzwischen in der Regel auf Basis von digitalen Orthophotos im Maßstab 1 : 10 000 aktualisiert. Als wichtigste Geobasisdate ist die Fortführung des ATKIS

Basis-DLM durch die Landesvermessungsämter auch zukünftig gesichert. Diese gesicherte Fortführung ist ein bedeutender Fakt, der die weiterführende Nutzung der Daten, auch zur Gewinnung einzelner Fachdaten, nahe legt.

Während in der ersten Realisierungsstufe des Basis-DLM (DLM25/1) erst 61 Objektarten in den fünf Objektbereichen Siedlung, Verkehr, Vegetation, Gewässer und Gebiete erfasst wurden, sind in der zweiten Realisierungsstufe (DLM25/2) schon 116 Objektarten und zusätzlich der Objektbereich Relief enthalten. Die dritte Realisierungsstufe (DLM25/3) umfasst 189 Objektarten in sieben Objektbereichen. Die Objektarten werden dann durch Attributwerte genauer topographisch oder fachinhaltlich beschrieben. Durch diese Entwicklung wird nach der sehr aufwendigen Ersterhebung sowohl die geometrische als auch die thematische Qualität dieser digitalen Geobasisdate weiter erhöht.

Wenn es auch heute noch seitens von ATKIS-Anwendern immer wieder Kritik an der Korrektheit und der Aktualität von ATKIS-Daten gibt, so ist doch eine laufende Verbesserung des Datensatzes festzustellen. Noch bestehende Fehler werden in aktualisierten Fassungen zunehmend korrigiert und damit die Qualität des Datensatzes laufend verbessert. Auch die Aktualität von ATKIS wird erhöht, wie die Definition einer Spitzenaktualität (< 1 Jahr) für hochdynamische Objektbereiche, wie den Verkehr, zeigt.

4 Ermittlung der Bodenversiegelungsprofile der ATKIS-Objektarten

Die Ermittlung mittlerer Bodenversiegelungswerte je ATKIS-Objektart erfolgte durch GIS-technische Verschneidung der beiden Eingangsdatensätze. Sowohl Lage- als auch Attributin-formationen beider Ebenen blieben dabei erhalten. Abbildung 1 stellt einen Ausschnitt der Bodenversiegelungskartierung (Referenz), überlagert von den Grenzen des ATKIS Basis-DLM, dar.



Abb. 1: Bodenversiegelungskartierung (Referenz) überlagert mit dem ATKIS Basis-DLM (Ausschnitt aus Stadtzentrum Dresden)

Ergebnis der Verschneidung ist eine Polygonebene mit rund 330 000 Objekten. Jedes Polygon besitzt alle Attribute der Eingangsdaten (Flächengröße, ATKIS-Objektart, Versiegelungswert). Mit Hilfe der Polygonattributtabelle der Verschnittebene erfolgte die statistische Analyse für jede ATKIS-Objektart. Zunächst wurde für jedes ATKIS-Objekt ein mittlerer Versiegelungswert bestimmt. Anschließend wurde aus allen Objekten einer ATKIS-Objektart

der mittlere Gesamtversiegelungswert für diese Objektart bestimmt. Dabei gingen die Objekte, jeweils ihrer Größe nach, gewichtet in die Berechnung ein.

Für alle Objektarten, welche im Dresdner ATKIS Basis-DLM vorhanden sind, wurde mit dieser Methodik ein mittlerer Versiegelungswert bestimmt. Abbildung 2 zeigt beispielhaft die Bodenversiegelungsprofile (Histogramm, Mittelwert und Standardabweichung) der bodenversiegelungsrelevanten, flächenmäßig dominanten und auch häufigsten Objektarten Wohnbaufläche (2111), Industrie- und Gewerbefläche (2112), Fläche gemischter Nutzung (2113) und Wald, Forst (4107).

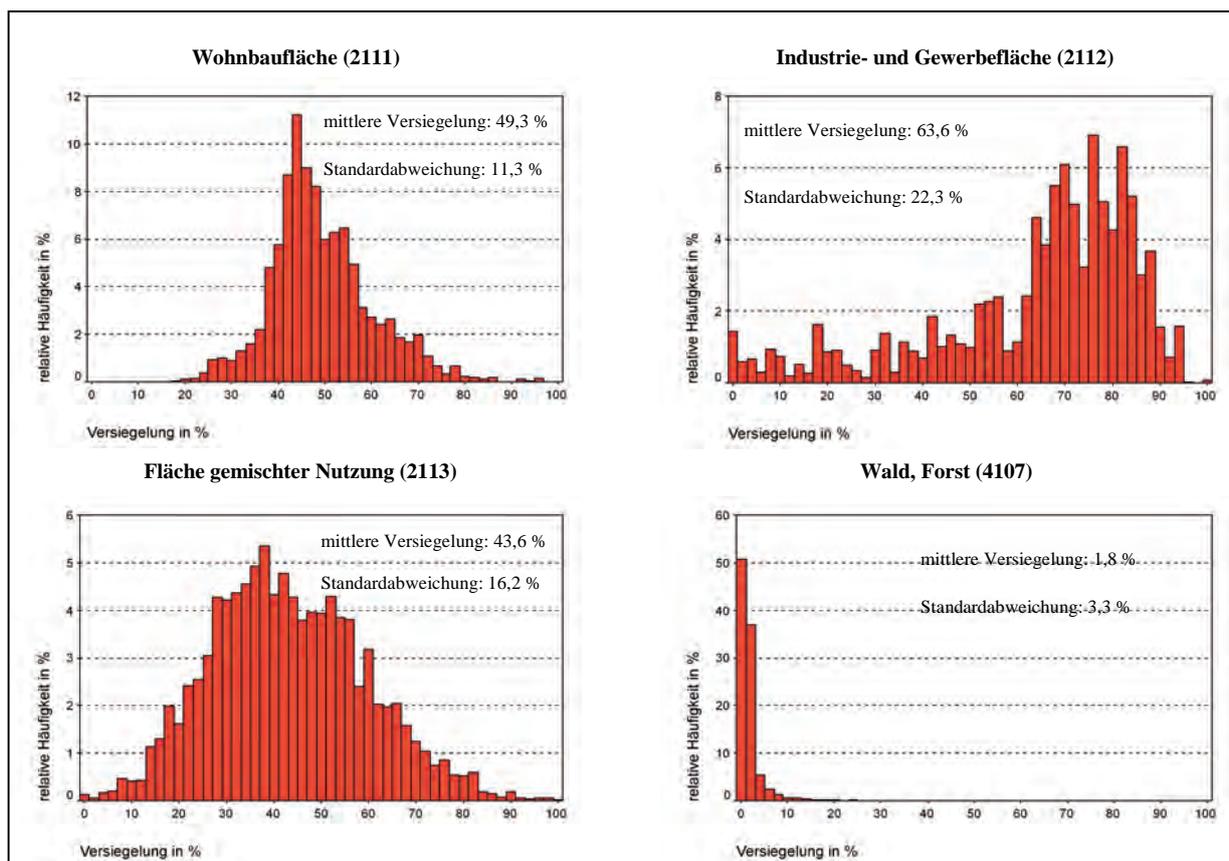


Abb.2: Bodenversiegelungsprofile wichtiger Objektarten des ATKIS Basis-DLM

Tab. 2: Mittelwert und Standardabweichung der Bodenversiegelung für wichtige ATKIS-Objektarten

ATKIS-Objektart	ATKIS-Code	Bodenversiegelung [%]		Objektanzahl in Dresden
		VSG _m	VSG ₆	
Wohnbaufläche	2111	49,3	11,3	786
Industrie-/Gewerbe	2112	63,6	22,3	731
Fläche gemischter Nutzung	2113	43,6	16,2	4789
Fläche besonderer funktionaler Prägung	2114	58,1	16,7	733
Grünanlagen	2227	14,6	12,4	316
Ackerland	4101	1,6	2,7	404
Grünland	4102	9,7	16,2	2207
Gartenland	4103	9,5	7,2	866
Wald/Forst	4107	1,8	3,3	2161

Bei einigen Objektarten (z. B. Wald, Ackerland, Fluss) zeigt sich trotz hoher Objektanzahl eine sehr geringe Streuung der Bodenversiegelungswerte der Einzelobjekte, d. h. die Mittelwerte der Bodenversiegelung dieser Objektarten können als sehr zuverlässig angesehen werden. Bei den Objektarten des Objektbereichs Siedlung, die den Bodenversiegelungsgrad wesentlich dominieren, wie Wohnbauflächen (2111), Industrie- und Gewerbeflächen (2112) und Flächen gemischter Nutzung (2113), kommt es durch die fehlende Differenzierung von Bauungstypen zu einer breiten Streuung der Versiegelungswerte (Abb. 2). Tabelle 2 zeigt den mittleren Bodenversiegelungswert (VSG_m) und dessen Standardabweichung (VSG_σ) für die wichtigsten ATKIS-Objektarten. Vergleicht man die ermittelten mittleren Versiegelungswerte mit Referenzwerten für die Bodenversiegelung stadtstruktureller Nutzungstypen aus anderen Studien (z. B. HEBER, 1993), so ist insgesamt eine große Übereinstimmung festzustellen.

5 Verfahrensprüfung an Referenzdaten

Ob nun die Verwendung dieser Mittelwerte zu belastbaren Ergebnissen in der Ermittlung gesamt- oder teilstädtischer Bodenversiegelungswerte führt, sollte durch einen Vergleich mit anderen Versiegelungserhebungen geprüft werden. Für diese Untersuchungen wurden die Städte Berlin und Dresden ausgewählt, da hier sowohl das ATKIS Basis-DLM als auch die Daten von Referenz-Bodenversiegelungserhebungen zur Verfügung standen. Diese wurden durch visuelle Interpretation auf Basis von Satelliten- und Luftbilddaten erhoben, im Falle Berlins zusätzlich unter Zuhilfenahme der digitalen Gebäudegrundrisskarte im Maßstab 1 : 5 000 (Digitaler Umweltatlas der Stadt Berlin). Es wurden nun auf Basis von Flächenanteilen der einzelnen ATKIS-Objektarten und anschließender Multiplikation der Flächenanteile mit dem jeweiligen mittleren Bodenversiegelungswert der ATKIS-Objektarten teil- und gesamtstädtische ATKIS-basierten Versiegelungswerte berechnet und mit den durch visuelle Interpretation erhobenen Versiegelungswerten verglichen (Tab. 3 und 4).

Wie die Tabellen 3 und 4 zeigen, kann im Mittel eine gute Übereinstimmung der ATKIS-basierten Bodenversiegelungserhebung mit denen durch Bildinterpretation erhobenen Versiegelungsreferenzwerten festgestellt werden. Während die gesamtstädtischen ATKIS-basierten Bodenversiegelungswerte sehr genau sind (Abweichung nur 1,9 % bzw. 0,4 %), sind die stadtbezirks- (Berlin) bzw. ortsamtsbezogen (Dresden) Werte teilweise ungenau. Insbesondere kommt es zu einer starken Unterschätzung der Bodenversiegelung der ATKIS-basierten Erhebungsmethode bei Berliner Stadtbezirken mit hoher Verdichtung (Friedrichshain-Kreuzberg, Mitte). Diese ist auf die Verwendung der in diesen Fällen zu niedrigen mittleren Versiegelungswerte der ATKIS-Objektarten „Wohnbaufläche“ (2111), „Industrie- und Gewerbefläche“ (2112), „Fläche gemischter Nutzung“ (2113) und „Fläche besonderer funktionaler Prägung“ (2114) zurückzuführen. Durch die leichte Überschätzung der Versiegelungswerte der Stadtteile mit lockerer Bebauung kommt es zu einem Fehlerausgleich über die Gesamtfläche Berlins bzw. Dresdens.

An dieser Stelle muss betont werden, dass auch die verwendeten Referenzdaten im Gegensatz zu den verwendeten Kalibrierungsdaten des Dresdner Abwasserbetriebes nicht fehlerfrei sind, da die Bodenversiegelung nur in 10 (Berlin) bzw. 5 Klassen (Dresden) visuell für die Teilflächen abgeschätzt wurde.

Um den systematischen Fehler durch zu starke Spreizung der Versiegelungswerte in den versiegelungsrelevanten ATKIS-Objektarten zu senken, kann das im ATKIS Basis-DLM/3 definierte Attribut „Offene oder geschlossene Bebauung“ (BEB) für die Objektarten 2111, 2113

und 2114 verwendet werden. Da in den einzelnen Bundesländern erst mit der Erfassung des DLM/3 begonnen wurde, war auch dieses Attribut für Dresden noch nicht belegt und musste für diese Arbeit durch visuelle Interpretation für die relevanten ATKIS-Objektarten vergeben werden. Tabelle 5 zeigt den mittleren Bodenversiegelungsgrad für diese Objektarten unter Differenzierung des ATKIS-Attributs BEB.

Tab. 3: Bodenversiegelungswerte ermittelt aus ATKIS im Vergleich zur Referenzerhebung für die Stadt Berlin auf Basis von CIR-Luftbilddaten²

Stadtbezirk	Referenzwert Bodenversiegelung [%]	Bodenversiegelung [%] ermittelt aus ATKIS	Mittlere Abweichung [%]
Friedrichshain-Kreuzberg	62,7	41,6	21,1
Mitte	59,1	43,0	16,1
Tempelhof-Schöneberg	45,9	43,9	2,0
Neukölln	43,0	40,4	2,6
Lichtenberg	42,1	36,3	5,8
Charlottenburg-Wilmersdorf	36,3	28,7	7,6
Pankow	29,6	27,6	2,0
Reinickendorf	28,0	32,0	4,0
Steglitz-Zehlendorf	25,7	29,4	3,7
Spandau	24,0	26,9	2,9
Berlin (10 von 12 Bezirken)	34,6	32,7	1,9

Tab. 4: Bodenversiegelungswerte ermittelt aus ATKIS im Vergleich zu Referenzerhebung für die Stadt Dresden auf Basis von CIR-Luftbilddaten

Ortsamt	Referenzwert Bodenversiegelung [%]	Bodenversiegelung [%] ermittelt aus ATKIS	Mittlere Abweichung [%]
Blasewitz	43,8	37,9	5,9
Altstadt	42,7	38,0	4,7
Pieschen	37,8	32,4	5,4
Leuben	36,4	35,0	1,4
Neustadt	34,3	28,8	5,5
Prohlis	34,1	35,1	-1,0
Plauen	33,0	34,2	-1,2
Cotta	21,3	22,1	-0,8
Klotzsche	16,4	18,6	-2,2
Loschwitz	6,7	8,8	-2,1
Dresden gesamt	22,1	21,7	0,4

² Die Bezirke Marzahn-Hellersdorf und Treptow-Köpenick konnten nicht einbezogen werden, da für diese das ATKIS Basis-DLM nicht flächendeckend vorlag.

Tab. 5: mittlere Bodenversiegelungswerte unter Nutzung des DLM/3-Attributs „Offene/geschlossene Bebauung) BEB

ATKIS-Objektart	VSG ohne Differenzierung [%]	VSG mit Differenzierung	
		VSG offene Bebauung [%]	VSG geschlossene Bebauung [%]
2111	49,3	49,1	62,9
2113	43,6	42,9	67,6
2114	58,2	58,0	82,4

Deutlich werden die nur geringfügig niedrigeren Bodenversiegelungswerte für die offene Bebauung, aber die sehr starke Erhöhung der Werte für die geschlossene Bebauung, die zwischen 13,8 % (2111) und 24,7 % (2113) über denen der offenen Bebauung liegen. Damit können letztlich auch die hochverdichteten Stadtgebiete genauer in ihrem Versiegelungsgrad ausgewiesen werden.

Natürlich sind prinzipiell auch Übersichtskartierungen der Bodenversiegelung auf Basis von ATKIS möglich. Allerdings ist die sehr kleinteilige Darstellung der einzelnen Objekte nicht unproblematisch, da es durch die Verwendung von Mittelwerten in Einzelfällen (vor allem bei hoch verdichteten Flächen) zu einer Fehlausweisung von bis zu 15 % kommen kann.

6 Schlussfolgerungen und Ausblick

Durch die entwickelte ATKIS-basierte Methode steht den städtischen Umweltämtern eine hocheffiziente Methode zur Ermittlung des Bodenversiegelungsgrades zur Verfügung. Durch Nutzung der Geobasisdaten ist gleichzeitig das Problem der Datenfortschreibung gelöst, ist letztere doch durch die Landesvermessungsämter dauerhaft gesichert. Zusätzlich können durch dieses Verfahren die mit hohem Aufwand erhobenen und gepflegten Geobasisdaten zusätzlich in Wert gesetzt werden.

Die Untersuchungen zeigen, dass die Nutzung von Geobasisdaten zur Ermittlung von Fachdaten sehr hilfreich ist. Es konnte gezeigt werden, dass auf Basis des ATKIS Basis-DLM die überschlägige Ermittlung gesamt- und teilstädtischer (z. B. Stadtbezirk, Ortsamt) Versiegelungswerte möglich ist. Für kleinere Bezugseinheiten, wie statistische Bezirke, Baublöcke und ATKIS-Objekte, wachsen die Fehler der beschriebenen ATKIS-basierten Versiegelungserhebung.

Eine weitere Verbesserung der beschriebenen Methodik kann in Zukunft durch die Nutzung der ATKIS DLM/3-Attribute Funktion (FKT), Gebäudefunktion (GFF) und Oberflächenmaterial (OFM) durch eine dann gegebene weitere bodenversiegelungsrelevante Differenzierung der Flächen erfolgen. Auch kann durch die Verwendung des Attributes „Breite der Fahrbahn“ (BRF) in der Objektgruppe Straßenverkehr (3100) eine weitere Qualifizierung erreicht werden, indem die nur linienhaft erfassten Straßen mit der Straßenbreite gepuffert und von den derzeit bis zur Straßenmitte gehenden ATKIS-Polygonen abgetrennt werden. Bei Straßenflächen, die in der Regel vollversiegelt sind und damit erheblich über den mittleren Versiegelungswerten der Siedlungsobjektarten von ATKIS liegen, kann somit die Berechnungsgenauigkeit weiter gesteigert werden. (Der Attributwert BRF für die Objektgruppe Straßenverkehr ist in der Version Basis-DLM/2 in Sachsen erst teilweise belegt und konnte darum nicht in die Untersuchung einbezogen werden).

Letztlich lassen auch der Aufbau und die Gliederung des ATKIS-Objektartenkataloges Ergänzungen weiterer Objektarten und Attribute aus topographischer und fachlicher Sicht zu. An dieser Stelle wird die Hoffnung ausgesprochen, dass wichtige Fachdaten, wie u. a. die Bodenversiegelung oder auch eine genauere Differenzierung der Bebauungsstruktur, zukünftig in ATKIS integriert werden können.

7 Literaturverzeichnis

- ARBEITSGEMEINSCHAFT DER VERMESSUNGSVERWALTUNGEN DER LÄNDER DER BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND (ADV)** (2003): Amtliches Topographisch-Kartographisches Informationssystem. Objektartenkatalog (ATKIS – OK), Teil D0, Erläuterungen zu allen Teilkatalogen (Version 3.2), Stand 01.07.2003
- DOSCH, F.** (2002): Auf dem Weg zu einer nachhaltigeren Flächennutzung? Informationen zur Raumentwicklung, Heft 1/2, 2002, S. 31-45
- DIGITALER UMWELTATLAS DER STADT BERLIN**
(www.stadtentwicklung.berlin.de/umwelt/umweltatlas/)
- HEBER, B. & LEHMANN, I.** (1993): Stadtstrukturelle Orientierungswerte für die Bodenversiegelung. IÖR-Schriften 05
- HERNIG, A.** (2005): Erhebung von Bodenversiegelungsprofilen für relevante Klassen von Geobasisdaten auf Grundlage hochgenauer Versiegelungskartierungen. Diplomarbeit, TU-Dresden
- MEINEL, G. & HENNERSDORF, J.** (2000): Fortschreibung von Stadtstrukturtypenkarten auf Basis von IRS-1C-Satellitenbilddaten am Beispiel des Stadtgebietes Dresden. Abschlussbericht (unveröffentlicht)
- MEINEL, G. & NETZBAND, M.** (1997): Bestimmung der Oberflächenversiegelung von Stadtgebieten auf Grundlage von ATM-Scannerdaten; Photogrammetrie-Fernerkundung-Geoinformationssysteme (PFG) 2/1997 S. 93-102; E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart
- MEINEL, G. & NETZBAND, M.** (1996): Erarbeitung von Übersichtskarten zur Versiegelungintensität. In UFZ-Berichte, Stadtökologische Forschungen Nr.7, Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle (Leipzig), ISSN 0948-9452, S.V1-V60
- STADTENTWÄSSERUNG DRESDEN** (2000): Auswerte- und Erfassungsvorschrift Luftbilddauswertung „Versiegelte Flächen“
- STATISTISCHES BUNDESAMT** (2004): Siedlungs- und Verkehrsfläche nach Art der tatsächlichen Nutzung, Erläuterungen und Eckzahlen. In „Land- und Forstwirtschaft, Fischerei“, Wiesbaden
- UMWELTATLAS DRESDEN** (2002): Hrsg. Umweltamt der Stadt Dresden
- UMWELTBUNDESAMT** (2003): Reduzierung der Flächeninanspruchnahme durch Siedlung und Verkehr. UBA-Texte 90/03

DANKSAGUNG

Dem Abwasserbetrieb Dresden sei an dieser Stelle ausdrücklich für die kostenfreie Bereitstellung der Versiegelungsdaten für die vorliegenden Untersuchungen gedankt.

Dokumentation und Publikation geobotanischer Fachinformationen durch Kopplung von GIS und Content Management Systemen

JÖRG SCHMITTWILKEN¹ & LUTZ PLÜMER²

Zusammenfassung: Geobotanische Fachinformationen sind für den Naturschutz von hoher Relevanz. Aus diesem Grund besteht großes öffentliches Interesse am Zugang zu diesen Daten. Wegen des enormen Informationsumfangs dieser raumbezogenen Daten werden hier Konzepte vorgestellt, die eine Präsentation naturschutzfachlicher Geoinformation im Internet ermöglichen. Es werden die Vorteile eines Multiautor Content Management Systems herausgestellt und die Integration von GIS in ein solches Redaktionssystem beschrieben.

1 Anforderungen

Als Teildisziplin der Botanik beschäftigt sich die Geobotanik mit dem Vorkommen und der räumlichen Verbreitung von Pflanzen. Die Datenerfassung der Untersuchungsobjekte ist sehr aufwendig, da großflächige Erfassungsmethoden wie Luftbilddauswertung oder Laserscanning aufgrund der geringen räumlichen Ausdehnung der Objekte nicht zum Einsatz kommen können. In der Praxis werden einzelne Gebiete beispielsweise im Rahmen von Diplomarbeiten oder von ehrenamtlich Tätigen kartiert. Im Gegensatz zur topographischen Aufnahme sind hier die Verbreitung und das Vorkommen einzelner Pflanzen relevant. Auch die räumliche Ausdehnung von Pflanzengesellschaften wird auf diese Weise erfasst. Da die so gewonnenen geobotanischen Daten eine hohe Relevanz für Naturschutzmaßnahmen haben, genießen sie großes öffentliches Interesse und ihre Dokumentation und Publikation gewinnt an Bedeutung.

Die Anforderungen an ein System, das geobotanische Fachinformationen für die (Fach)Öffentlichkeit vorhält, sind vielschichtig. Auf der einen Seite müssen Daten mit Ortsbezug wie z.B. die genaue Position einzelner Pflanzen auf Basis einer Karte visualisiert werden. Dies beinhaltet auch das Erstellen von Vegetationskarten, welche die räumliche Ausdehnung von Pflanzengesellschaften zeigen. Auf der anderen Seite sollte die Möglichkeit bestehen, dass mehrere Autoren ihre Daten unabhängig von einander in das System eingeben können. Mit Blick auf den Naturschutz und des damit verbundenen öffentlichen Interesses an geobotanischen Fachdaten liegt eine Präsentation der Informationen im Internet nahe. Dies führt wiederum zu zwei weiteren Notwendigkeiten: Einerseits verlangt die Präsentation auf einer Internetseite eine spezielle Aufbereitung der Daten. Die *Hypertext Markup Language* (HTML) ist das wohl bekannteste Format, das für diesen Zweck verwendet werden kann. Andererseits werden bei der Bereitstellung der Informationen über das Internet Konzepte benötigt, die es erlauben (a) Inhalte von mehreren Autoren zeit- und ortsunabhängig bearbeiten zu lassen und (b) sensible Daten nur eingeschränkten Benutzerkreisen zugänglich zu machen.

¹ Dipl.-Ing. Jörg Schmittwilken, E-Mail: schmittwilken@ikg.uni-bonn.de

² Prof. Dr. Lutz Plümer, E-Mail: pluemer@ikg.uni-bonn.de

Zusammenfassend können also vier Forderungen an ein mögliches System formuliert werden, das die Präsentation naturschutzfachlicher Geoinformation im Internet ermöglicht:

1. Darstellung raumbezogener Informationen,
2. Aufbereitung der Daten entsprechend des Mediums Internet,
3. Multiautoren-Fähigkeit (zeit- und ortsunabhängig) und
4. Einschränkung der Zugriffsrechte (lesend und schreibend)

Forderung Nr. 1 kann durch ein Geoinformationssystem erfüllt werden, da dort neben der Analyse auch die Visualisierung von ortsbezogenen Informationen im Vordergrund steht. Forderungen Nr. 2 bis 4 können durch ein *Content Management System* (CMS) gelöst werden. Diese Systeme, auch Redaktionssysteme genannt, bieten den gewünschten Funktionsumfang. Im Folgenden wird das Konzept eines CMS beschrieben und beispielhaft gezeigt, wie es um einfache GIS-Funktionalität erweitert werden kann.

1.1 Content Management Systeme

Eine genauere Betrachtung von Content Management Systemen setzt zunächst eine Definition dessen voraus, was durch solch ein System *gemanagt* werden soll. ROCKLEY et al. (2002) fassen unter *Inhalt* all jenes zusammen, was Autoren erzeugen, also u.a. Worte, Texte und Grafiken. Sie grenzen den so definierten Inhalt von *Informationen* ab, die sie wiederum als zusammenhängende Einheit von Inhalt wie z.B. eine Internetseite oder eine Bedienungsanleitung verstehen. Demnach ist ein CMS ein System, das aus unstrukturiertem Inhalt Informationen generiert. Ein Web Content Management System überführt den gespeicherten Inhalt in Internetseiten. Wir beschränken uns im Folgenden auf Web Content Management Systeme und werden diese, wie in der Literatur üblich, als CMS bezeichnen. Außerdem werden aus Gründen der Verständlichkeit die Begriffe Inhalt, Content und Information synonym verwendet. Abbildung 1 veranschaulicht das Konzept eines Content Management Systems.

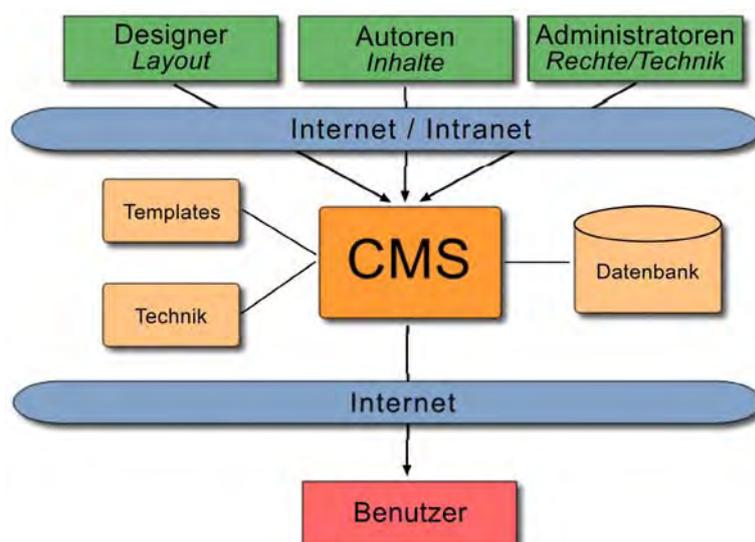


Abb. 1: Zugriff auf ein Content Management System

Im Gegensatz zur manuellen Erstellung statischer Internetseiten als HTML Code oder über eine grafische Oberfläche werden Informationen in CMS dynamisch erzeugt. Alle Inhalte liegen in einer Datenbank vor und werden erst bei Aufruf der Webseite dynamisch in HTML codiert. Gleiches ermöglichen Skriptsprachen wie *PHP* (PHP HyperText Preprocessor) oder *CGI* (Common Gateway Interface). Ein CMS, welches durchaus auf PHP basieren kann, bietet darüber hinaus weitere, vor allem für Multiautorensysteme sehr wichtige Funktionalitäten. Beispielsweise werden Inhalt und Layout der Seite(n) strikt von einander getrennt. Daraus ergeben sich einige Vorteile: Es ist so unter anderem möglich, das Design einer mehrere hundert Seiten umfassende Internetpräsenz ohne großen zeitlichen Aufwand oder tiefgreifende Programmierkenntnisse zu ändern, denn alle Designinformationen werden zentral und unabhängig vom Inhalt in so genannten *Templates* gespeichert. So bleibt die Corporate Identity (eines Unternehmens) auf allen Seiten des Webauftritts gewahrt. Ein weiterer Vorteil eines CMS gegenüber einfacher dynamischer Webseitenprogrammierung besteht darin, dass CMS i.d.R. Browser-basiertes Editieren des Contents ermöglichen und zusätzlich Mechanismen zur Automation des Einpflegens neuer Inhalte (Workflow-Tool) bieten. WEBER (2002) belegt die hier angeführten Vorteile durch die von ihm vorgestellte Studie. Er zeigt, dass Unternehmen, die CMS nutzen, hohe Einsparung bei der Pflege ihres Internetauftritts verzeichnen, da (a) keine Programmierkenntnisse für die Eingabe neuer Inhalte notwendig sind und (b) neue Inhalte schneller online gestellt werden können.

1.1.1 CMS für geobotanische Fachinformationen

Der für das hier skizzierte Szenario (Präsentation geobotanischer Fachinformation) entscheidende Vorteil eines CMS liegt in der detaillierten Rechteverwaltung für Zugriffe auf die Webseite. Die Benutzer werden in Autoren, Designer und Administratoren auf der einen Seite und Besucher auf der anderen Seite unterteilt. Die entsprechenden Bereiche der Internetseite werden als *Backend* und *Frontend* bezeichnet. Zugriffsbeschränkungen im Backend können differenziert festgelegt werden. Beispielsweise werden unterschiedliche Rechte für die Bereiche Design, Inhalt oder die Seitenstruktur vergeben. Hier spiegeln sich die unabhängig voneinander arbeitenden Gruppen Designer, Autoren und Administratoren (vgl. Abb.1) wieder. Für das Frontend können bestimmte Seiten passwortgeschützt werden, wobei verschiedene Stufen von Zugriffsrechten erteilt werden können. Dies ist z.B. bei Standortangaben hoch gefährdeter Arten sinnvoll, die keineswegs für die breite Öffentlichkeit, sondern viel mehr für einen ausgewählten Kreis von Geobotanikern zugänglich gemacht werden sollen.

Gesamtartenliste der Farn- und Blütenpflanzen	
Wissenschaftlicher Name	Deutscher Name
Acer pseudoplatanus	Berg-Ahorn
Achillea millefolium	Wiesen-Schafgarbe
Achillea ptarmica	Sumpf-Schafgarbe
Aegopodium podagraria	Giersch, Geißfuß

Abb. 2: Beispiel für die Aufbereitung geobotanischer Fachdaten im Internet

Abbildung 2 zeigt beispielhaft einen Auszug der Aufbereitung geobotanisch und naturschutzfachlich relevanter Daten auf einer Internetseite. Für ein 70ha großes Gebiet müssen einige hundert Arten der Farn- und Blütenpflanzen (höherer Pflanzen) präsentiert werden, von denen einige auf Roten Listen (NRW oder regionale Listen) verzeichnet sind und in ihrer Populationsstärke teilweise mehrfach (Historie) erfasst sind. Der Umfang an Informationen lässt sich aufgrund dieses Beispiels erahnen und die Notwendigkeit eines oben beschriebenen Multiautorensystems bzw. einer nach Detaillierungsgrad der Daten differenzierten Präsentation daraus ableiten.

1.2 GIS-Funktionalität

Die Präsentation geobotanischer Fachinformation im Internet geht über das Auflisten tabellarischer Daten hinaus. Gerade der Ortsbezug der meisten Daten verlangt nach GIS-Funktionalität. Ein kartenbasiertes Konzept genügt den Ansprüchen der reinen Informationsübermittlung über eine Internetseite. Jedoch sollte von statischen Karten abgesehen werden, da dynamische Karten besser geeignet sind, komplexe räumliche Sachverhalte zu vermitteln (vgl. CAQUARD (2003), DICKMANN (2001)). Ein etabliertes Verfahren der Webkartographie sind Multimediaprojektoren. Diese realisieren Hyperlinks in Karten, die zu weiteren Informationen führen.

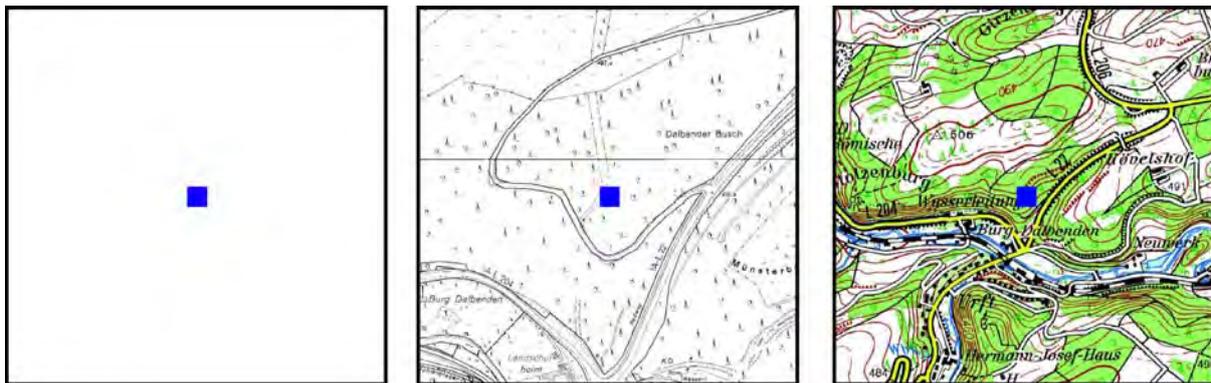


Abb. 3: Beispielhafte Darstellung des Vorkommens bestimmter Populationen auf Grundlage unterschiedlicher WMS Karten (links: Overlay, Mitte: DGK5, rechts: TK50)

Auf Grundlage amtlicher Kartenwerke, wie zum Beispiel der Topographischen Karte 1:25.000 (TK25), kann die Lage einzelner Populationen besonderer Pflanzen dargestellt werden. Die gewählte Kartengrundlage und die Kartiergenauigkeit der jeweiligen Populationen sollten von zwei Faktoren bestimmt werden können: (a) dem Gefährdungsgrad der Pflanze und (b) den Zugriffsrechten des Nutzers. Demnach würden für Benutzer mit den geringsten Zugriffsrechten nicht gefährdete Arten auf großmaßstäbigen Karten und stark gefährdete Arten, wenn sie überhaupt dargestellt werden, auf kleinmaßstäbigen Karten verzeichnet. Da diese Vorgehen von den Parametern Benutzerrechte und Gefährdungsgrad abhängig ist, könnte eine dynamische Lösung wie in Abbildung 3 skizziert aussehen: Bei bekannter Position (Koordinate) der Population würde der entsprechende Kartenausschnitt in Abhängigkeit der genannten Parameter von einem Web Map Server (WMS), beispielsweise dem Geoserver des Landesvermessungsamtes NRW, bezogen. Die darzustellende Population einer bestimmten Art wird stets in der Mitte der Karte gezeichnet und über die Karte gelegt (Overlay). Ein WMS antwortet auf eine Anfrage mit einem Rasterbild, dessen Höhe und Breite ebenso wie der geografische Ausschnitt oder gewählte Layer in der Anfrage spezifiziert werden. Je nach Kontext kann also der Layer der Deutschen Grundkarte 1:5000

(DGK5) oder aber der Layer der TK50 als Kartengrundlage angefordert werden. Diese beiden Möglichkeiten unterscheiden sich bei gegebener Breite und Höhe des Bildes nur durch ihren geografischen Ausschnitt, dessen Mittelpunkt durch die Koordinate des Standorts der Pflanze vorgegeben ist. Entsprechend wird bei mehreren darzustellenden Populationen generalisiert, und diese werden auf der kleinmaßstäbigen Karte zu einem Punkt zusammengefasst.

Neben der Eingabe von Inhalten durch registrierte bzw. berechnigte Autoren ist die Implementierung des von KOLBE et al. (2003) vorgestellten Konzepts der *Cooperative Web Maps* sinnvoll, um jedem Besucher der Internetseite die Möglichkeit zu geben, seine „Entdeckungen“ an die Redaktion zu übermitteln oder Bekannten mitzuteilen. Auch hier können Karten von frei verfügbaren, OGC-konformen (Open Geospatial Consortium) Kartenservern bezogen werden. Diese dienen dann als Kommunikations- und Diskussionsplattform, die dazu genutzt werden, raumbezogene Informationen auszutauschen. Durch einen Klick in die Karte wird die gewählte Position ermittelt und einem Kommentar des Benutzers angefügt. KOLBE et al. schlagen eine Kodierung der Informationen in einer URL (Uniform Resource Locator) vor, um alle Parameter (WMS, gewählte Layer, geografischer Ausschnitt, Kommentare usw.) system- und plattformunabhängig verbreiten zu können. Nicht registrierte Autoren könnten somit die Position und Populationsstärke einzelner Arten auf einfache Art und Weise mitteilen. Die so gewonnenen Informationen müssten ggf. von Fachleuten vor Ort verifiziert werden, die aufwendige Neuerfassung entfällt jedoch.

Die zwei gezeigten Möglichkeiten erläutern beispielhaft, wie ein CMS um einfache GIS-Funktionalität erweitert werden kann. Dazu werden dynamische Internetkarten verwendet, die von frei verfügbaren WMS abgerufen werden. Doch um diese Karten wirklich *dynamisch* zu gestalten reicht ihr kontextabhängiger Abruf von einem Kartenserver nicht aus. Bildschirmkarten sind erst dann dynamisch und somit ein echter Mehrwert für den Nutzer, wenn der Anwender frei in ihnen navigieren kann (z.B. Zoom und Pan) und Karteninformationen on demand verändern kann (z.B. durch (De)Aktivieren unterschiedlicher Layer). Dies hat jedoch zur Folge, dass eine Karte nicht wie ein einfaches Bild in die Internetseite eingebunden werden kann, sondern zusätzliche Funktionsleisten und Auswahlmenüs erfordert. Der Webaufttritt muss um einen vollständigen Map-Client erweitert werden, der in das CMS integriert werden muss. Dies bedeutet auf der einen Seite einen hohen Aufwand an Programmierung, da zur nahtlosen Integration viele Randbedingungen des CMS berücksichtigt werden müssen. Auf der anderen Seite steht nach erfolgreicher Implementierung ein recyclebares Modul des CMS zur Verfügung, das in viele Projekte eingebunden werden kann. Die Entwicklung eines solchen Moduls wird im folgenden Kapitel thematisiert.

2 Prototyp

Die oben beschriebenen Erkenntnisse sind Teil der Ergebnisse einer am Institut für Kartographie und Geoinformation der Universität Bonn durchgeführten Machbarkeitsstudie. Die Studie wurde von der NRW-Stiftung Natur, Heimat, Kultur in Auftrag gegeben, die ihre stiftungseigenen Naturschutzgebiete einer fachinteressierten Öffentlichkeit im Internet präsentieren will.

Die Machbarkeitsstudie mündet in den Vorschlag, ein Content Management Systems für diese Aufgabe zu verwenden. In einer Marktanalyse stellte sich unter Berücksichtigung der von BILL (2003) genannten Argumente für Open Source Software das CMS *Typo3*³ als besonders

³ <http://www.typo3.org>

geeignet heraus. Das kostenlose Open Source Produkt basiert auf *PHP*⁴ als Scriptsprache zur dynamischen Erzeugung von Internetseiten und der Datenbank *MySQL*⁵. Es wird um das Kommandozeilen-Bildbearbeitungsprogramm *ImageMagick*⁶ zur dynamischen Änderung der Bildgröße ergänzt und mit einem *Apache*⁷ Webserver betrieben. Sämtliche Softwareprodukte sind kostenlos und werden von einer breiten Anwendergemeinde unterstützt. Wie für Open Source Software üblich wird in Newsgroups oder Foren guter Support geboten.

2.1 Typo3

Ein wichtiger Aspekt bei der Konzeption des Prototypen war die optische Anpassung der Internetseite an den existierenden Webauftritt der NRW-Stiftung. Hier hilft die Trennung von Layout und Inhalt Arbeit zu vermindern, da eine zentrale Layoutdefinition durch *Cascading Style Sheets* (CSS) erstellt wurden.

Typo3 wird ausschließlich in einem Webbrowser bedient. Dies hat zur Folge, dass sämtliche Arbeiten der Autoren, Designer und Administratoren ortsunabhängig sind und sie keinen Hardwarezugriff auf den Webserver benötigen. Abbildung 4 zeigt das Backend von Typo3. Ganz links sind die Bedienelemente angeordnet. Die rechte Seite ist unterteilt in Seitenbaum (links) und Konfigurationsfenster (rechts). Standardmäßig lassen sich einer Seite Elemente wie Überschriften, Texte, Bilder oder Tabellen zuordnen. Diese Inhaltselemente können im Konfigurationsfenster über Formulare editiert werden. Einem Bild wird so beispielsweise

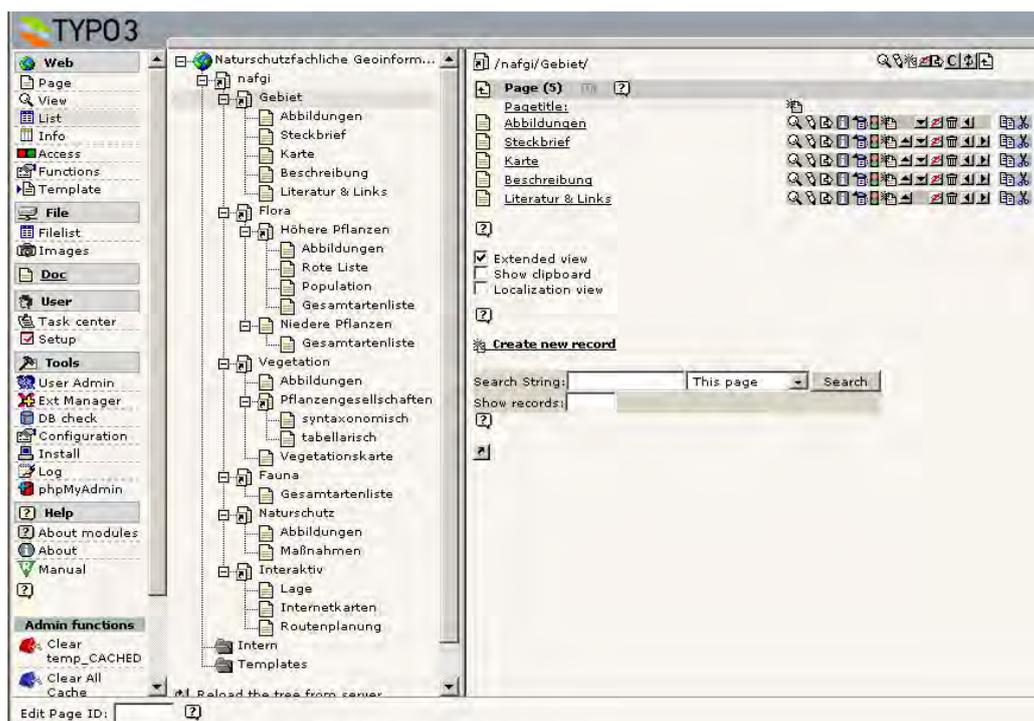


Abb. 4: Screenshot des Backends von Typo3 (links: Funktionsleiste, Mitte: Seitenbaum, rechts: Konfigurationsbereich)

eine Bildunterschrift zugeordnet, seine Größe wird festgelegt, ein Alternativtext kann

⁴ <http://www.php.net>

⁵ <http://www.mysql.com>

⁶ <http://www.imagemagick.org>

⁷ <http://www.apache.org>

angegeben werden und die Bilddatei selber wird über diese Oberfläche auf den Server hochgeladen.

Durch so genannte *Extentions* kann Typo3 um beliebige Inhaltselemente erweitert werden. Viele dieser Erweiterungen können über die Benutzeroberfläche von Typo3 aus einem Onlineverzeichnis ausgewählt und automatisch bezogen und integriert werden. Werkzeuge zur Programmierung dieser Erweiterungen stehen in jeder Typo3-Installation zur Verfügung. Beispielsweise könnte eine Extention „Pflanzendatenbank“ implementiert werden. Sie würde das Einfügen von Daten erleichtern. Über die Benutzeroberfläche könnten neue Pflanzen als Inhaltselement hinzugefügt werden. Sämtliche Metadaten wie Name, Standort, Gefährdung (Rote Liste), Foto usw. würden dann über ein Formular eingegeben, das für einige Informationen bereits Auswahllisten bereithielte. Verglichen mit der objektorientierten Programmierung würde durch den Import einer Extention eine neue Klasse geschaffen, die ein Realweltobjekt abbildet. Durch den Import der Extention werden neue Tabellen in der Datenbank angelegt, denen für jedes neue Inhaltselement „Pflanze“ ein weiteres Tupel angefügt wird.

Ebenso denkbar wäre die Entwicklung einer Extention für einen Web Map Client, wie er im vorherigen Kapitel angesprochen wurde. Für den Prototyp wurde jedoch gerade erst mit dieser Implementierung begonnen, so dass an dieser Stelle noch keine Ergebnisse vorgestellt werden können.

2.2 Seitenstruktur

Die Struktur der Oberfläche (vgl. Abb.5) wurde wie oben erwähnt an die bestehende Internetseite der NRW-Stiftung angelehnt. Sie verfügt über ein dreistufiges Navigationsmenü mit einer horizontalen Navigationsleiste (erste Ebene) und einer vertikalen Leiste, die an der linken Seite angeordnet ist. Diese Leiste beinhaltet die zweite und dritte Ebene der Navigation, die sich durch Schriftgröße und Einrückung von einander unterscheiden. Die ausgewählten Navigationselemente sind grün eingefärbt, diejenigen, die mit der Maus überfahren werden, werden zusätzlich unterstrichen.

Die Gliederung auf erster Ebene teilt die dargestellten Informationen in die fünf Gruppen allgemeine Gebietsinformationen, Flora, Vegetation, Fauna, und Naturschutzmaßnahmen und



Abb. 5: Screenshot des Prototyps

allgemeine Gebietsinformationen, Flora, Vegetation, Fauna, und Naturschutzmaßnahmen und interaktives Explorieren ein. Die jeweils erste Unterseite der dritten Ebene bietet eine Übersicht fünf Bildern mit kurzen Bildunterschriften, die durch Anklicken in einem neuen Fenster vergrößert dargestellt und mit einem kurzen Text erläutert werden. Für den Menüpunkt „gebiete“ werden (Luft)bilder der jeweiligen Gebiete gezeigt (vgl. Abb. 5), für die entsprechende Seite „flora“ werden Fotos von besonderen und bemerkenswerten Pflanzen des jeweiligen Gebiets gezeigt. Der Menüpunkt „naturschutz“ führt zu einer Fotoserie zur Dokumentation der erfolgreich durchgeführten Naturschutzmaßnahmen.

3 Ausblick

Es wurde die Notwendigkeit der Integration von GIS in ein Content Management Systemen vor dem Hintergrund der Präsentation geobotanischer Fachinformation im Internet gezeigt und eine prototypische Realisierung vorgestellt.

Im Rahmen der Implementierung des Prototypen wurde die Möglichkeit der Entwicklung eigener Extensions aus zeitlichen Gründen nur partiell untersucht. Hier besteht Optimierungspotential für die Benutzerfreundlichkeit der gesamten Anwendung. Denn die Dynamik des Systems würde dadurch nochmals erhöht werden.

Auch die Integration weiterer GIS-Funktionen wie z.B. eine räumliche Suche kann den Nutzen des Systems erhöhen und die Akzeptanz der Internetseite bzw. das Interesse des Benutzers steigern.

Der Prototyp ist über die Adresse <http://ganges.ikg.uni-bonn.de/botanikgis> oder als direkter Verweis bei den jeweiligen Gebietsbeschreibungen auf der Internetseite der NRW-Stiftung (<http://www.nrw-stiftung.de>) zu erreichen.

4 Literaturverzeichnis

- BILL, R. 2003: Eine günstige Alternative – Open Source als Basis für Internet-GIS-Lösungen in Kommunen und Landkreisen, *GeoBIT* (10/2003), Wichmann Verlag
- CAQUARD, S., 2003: *Internet, Maps and Public Participation: Contemporary Limits and Possibilities*, Maps and the Internet, Elsevier Science
- DICKMANN, F., 2002: *Web-Mapping und GIS*, Westermann Schulbuchverlag
- KÖBBEN, B., 2001: *Publishing maps on the Web, Web Cartography – Developments and Prospects*, Taylor & Francis
- KOLBE, T.H., STEINRÜCKEN, J. & PLÜMER, L., 2003: *Cooperative Public Web Maps. Proceedings of the International Cartographic Congress ICC 2003 in Durban, Südafrika*
- ROCKLEY, A., KOSTUR, P. & MANNING, S., 2002: *Managing Enterprise Content: A Unified Content Strategy*, New Riders Publishing
- WEBER, M., 2002: *Web Content Management – Studie: Aktuelle Situation und Trends im Webpublishing*, *Content Management Magazin* (8/2002), K. E. Lomey Verlag

Geoanalyse von Schwermetalluntersuchungen in einem Versuchsfeld zur Beurteilung von in-situ Sanierungsmethoden

ANDREAS FISLER¹ & MANFRED WEISENSEE²

Zusammenfassung: Die Kontamination von Böden mit Schwermetallen kann vielfältige Ursachen haben, sie reichen von konzentrierten Anreicherungen in der Umgebung von Industrieanlagen bis hin zu großflächigen moderaten Belastungen auf landwirtschaftlichen Flächen durch eine langjährige Klärschlammapplikation. Die Schwermetalle (z.B. Blei, Cadmium, Kupfer und Zink) bilden eine Gefahr für Menschen und für das Grundwasser, so dass diese Flächen gesichert oder saniert werden müssen. Als Pilotfläche eines Forschungsprojektes zur Sanierung kontaminierter Flächen mittels Pflanzen (Phytoremediation) dient in der Nähe von Nordenham (Wesermarsch) eine landwirtschaftlich nicht genutzte Fläche in unmittelbarer Umgebung einer seit über hundert Jahren produzierenden Metallhütte. Als Parzellen für den Versuchsanbau von Pflanzen wurden zwei Felder mit jeweils 120 m² gewählt. Da sich die vollständige Laboranalytik der Flächen für jeden Quadratmeter als zu langwierig erwies und für die Praxis undurchführbar erschien, wurden für die flächenhafte Analyse pro Feld zwanzig Proben statistisch zufällig ausgewählt und mit dem Kriging-Verfahren ausgewertet. Der Beitrag berichtet von der Anlegung einer Beprobung über die geostatistische Auswertung und den Vergleich der Ergebnisse aus der Geostatistik mit dem Ergebnis aus der Gesamtmatrix. Alle Ergebnisse wurden in ein GIS integriert und analysiert und sollen zukünftig durch eine mobile Komponente erweitert werden, um vor Ort weitere Daten erfassen bzw. visualisieren zu können.

1 Problemstellung

Trotz der zentralen Bedeutung der Sanierung belasteter Böden für die Umweltpolitik unterliegt eine Sanierung immer ökonomischen und ökologischen Aspekten gleichzeitig. Für exponierte Lagen im innerstädtischen Bereich sind die chemisch physikalischen Extraktionsmethoden oder die Entsorgung des belasteten Materials und Wiederauffüllung mit Boden noch immer gängige Verfahren für eine schnelle Sanierung trotz der immensen Kosten. Aber bei entsprechenden später zu erzielenden Grundstückspreisen kann die Investition teilweise durch den Verkauf oder die spätere Nutzung refinanziert werden. Für Flächen im außerstädtischen oder ländlichen Bereich sind diese Verfahren ökologisch sinnvoll aber ökonomisch nicht durchführbar, wenn nicht eine so große unmittelbare Gefahr davon ausgeht, dass zwangsläufig ein sofortiger Eingriff erfolgen muss. Eine Alternative insbesondere bei großflächig moderat belasteten Böden stellt die Sanierung mittels Pflanzen (Phytoremediation) dar.

Bei allen Altlastenverdachtsflächen ist eine gründliche Erkundung mit Beprobung notwendig, die zu einem repräsentativen Eindruck des Areals führt und geringe Kosten verursacht. Als Basis für eine Vorort-Erkundung dient die historische Begutachtung des Areals, da für die richtige Auswahl des Beprobungsverfahrens bei der Untersuchung die Art der Kontamination sowie die Tiefe und die Größenordnung der Kontamination ausschlaggebend sind. Die Anle-

¹ Dipl.-Ing. (FH) Andreas Fisler, Institut für Angewandte Photogrammetrie und Geoinformatik, Fachhochschule Oldenburg/Ostfriesland/Wilhelmshaven - Standort Oldenburg, Ofener Straße 16, 26121 Oldenburg, email: andreas.fisler@vermes.fh-oldenburg.de

² Prof. Dr.-Ing. Manfred Weisensee, Institut für Angewandte Photogrammetrie und Geoinformatik, Fachhochschule Oldenburg/Ostfriesland/Wilhelmshaven - Standort Oldenburg, Ofener Straße 16, 26121 Oldenburg, email: weisensee@fh-oldenburg.de

gung und Durchführung einer verteilten Beprobung beeinflusst das Gesamtergebnis stark. Daher soll für eine Testfläche die Schadstoffverteilung aus einem geostatistischen Verfahren einer Gesamtmatrix einer Quadratmeterweisen Analyse gegenüber gestellt werden.

1.1 Die Biologische Bodensanierung mittels Phytoextraktion

Organische und anorganische Schadstoffe werden durch das Wurzelsystem in die oberirdischen Pflanzenmasse transportiert und somit aus dem Boden extrahiert. Die Schadstoffe sammeln sich in oberirdischen Pflanzenteilen wie Spross und Blätter an und können nach der Ernte und Entsorgung der Biomasse zu einer wirklichen Sanierung von bestimmten Schadstoffen in den Boden führen. Der Vorteil der externen Entsorgung mittels Kompostierung oder thermaler Behandlung ist die kontrollierte Beseitigung der Restschlacke aus Filtern oder anderen technischen Anlagen. Meist für Schwermetalle, aber auch für andere organischen Verbindungen, ist diese Anwendung möglich. Damit ein zufriedenstellendes Ergebnis erreicht wird, gibt es bestimmte Anforderungen an den Boden und die Pflanzen:

- Bioverfügbarkeit der Schadstoffe,
- Aufnahmevermögen der Pflanze,
- Translokation der oberirdischen Pflanzenorgane,
- Schadstoffablagerung nur im durchwurzelteten Bereich,
- hohe Biomassenproduktion des Akkumulators und
- gute landwirtschaftliche Anbaumöglichkeit.

1.2 Versuchsfläche in Nordenham (Kreis Wesermarsch)

Die Versuchsfläche, auf der verschiedene Pflanzen wie Raps, Senf, Mais und Hanf auf ihre Schwermetallaufnahme untersucht werden, befindet sich im Nordwesten von Niedersachsen in Nordenham (Kreis Wesermarsch) in unmittelbarer Umgebung zu einer Metallhütte, der ehemaligen Friedrich-August-Hütte. Bis in die fünfziger Jahre befand sich auf dem Areal eine Pferdewiese, die im Anschluss nicht mehr landwirtschaftlicher oder sonstigen Nutzung unterlag. Die einzigen Pflegemaßnahmen, die durchgeführt wurden, waren das zweimalige Mähen der Fläche. Somit kann von einer gleichmäßigen Belastung mit Schwermetallen ausgehend von den ca. 600 Meter entfernten Schornsteinen ausgegangen werden. Zusätzlich kann durch das Brachliegen die Verteilung und Beurteilung der Bodenhorizonte mit Schwermetallbelastungen erfolgen, da es zu keiner Bodenmischung in den letzten Jahren kam. Die allgemeine bodenkundliche Untersuchung einer Mischprobe ergab folgendes Ergebnis: Der Boden ist stark humos mit einem Humusanteil von 4,1 % bis 8,0 % und gehört zu den schluffreichen Böden (schluffiger Ton).

Tab. 1: Analyseergebnis der Pflanzenmakronährstoffe mit Bewertung

Bodenhorizont (cm)	Kalk pH-Wert	Phosphor (mg/100 g Boden) P / P ₂ O ₅	Kalium (mg/100 g Boden) K / K ₂ O	Magnesium (mg/100 g Boden)
I (0 – 30)	5,7 (niedrig)	7 / 15 (O.K.)	18 / 22 (O.K.)	25 (sehr hoch)
II (30 – 60)	6,1	4 / 9	17 / 21	24

Die Analysen zeigen, dass der Boden in der Zusammensetzung für den Anbau von Kulturpflanzen geeignet ist. Um den Boden zu bestellen, wurde im Vorwege der Boden an zwei Stellen einer Testfläche mit jeweils 6 x 20 m bearbeitet. Vor der Aussaat erfolgte eine engmaschig Beprobung in einem Meterraster, um ggf. nach mehreren Pflanzperioden den Nachweis über die Schwermetalleextraktion im Boden nachzuweisen.

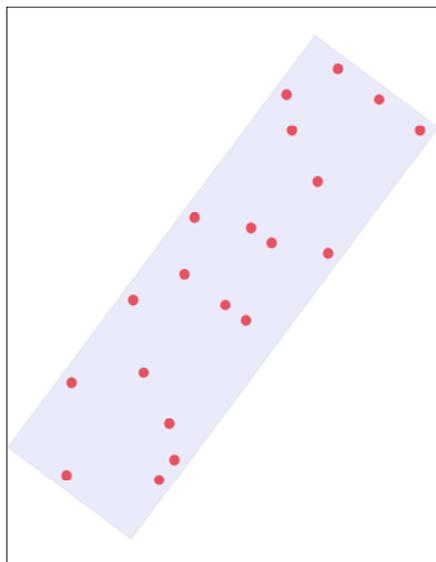
2 Probennahme

Die Erkundung von Geophänomenen an einem bestimmten Ort ist immer mit hohen Unsicherheiten verbunden, die bei einer nachfolgenden technischen Anwendung, wie der Altlastenerkundung, zu teilweise drastischen Kostenexplosionen bei der Sanierung führen (BÜCHERL, 2004). Bei der Probennahme mit einem Bohrstock, wie auch bei anderen Erfassungsaufgaben, mussten verschiedene grundlegende Fehlerquellen ausgeschlossen werden, wie

- eine nicht repräsentative Probennahme (falsche Strategie) und
- eine unsachgemäße Probennahme (falsche Lagerung).

Das angelegte Meterraster zur Beprobung sollte im kleinsten Maßstab die Variabilität der Schwermetallbelastungen für die kleinen Teilflächen nachweisen. Dabei erfolgte die Untersuchung für vier Schwermetalle (Cadmium, Blei, Zink, Kupfer) und in drei Untersuchungshorizonten (humanrelevante Schicht mit direkter Kontaktmöglichkeit):

- 0 – 10 cm
- 10 – 20 cm
- 20 – 45 cm



Für die laborchemische Untersuchung bedeutete die Umsetzung der Probenstrategie bei einer Testfeldgröße von 6 x 20 Meter, 240 Probennahmestellen in drei Horizonten mit vier Schwermetallen, ein Untersuchungsvolumen von 2880 Messergebnissen. Mit der Analytik war somit neben den Kosten, der Zeitfaktor eine entscheidende Variable, um das Gebiet zu analysieren. Da die Umsetzung schnell erfolgen sollte und die Anwendbarkeit eines Meterrasters außerhalb eines Forschungsprojekts kaum umsetzbar ist, erfolgte eine statistisch zufällige Auswahl von jeweils 20 Einzelproben in den drei Horizonten pro Testfläche, die zügig analysiert wurden. Die Zufälligkeit der Probenauswahl wurde durch einen Zufallsgenerator gewählt, damit keine Eindrücke des Probennehmers die Auswahl beeinflussen konnte.

Abb. 1: Testfeld (6 x 20 Meter) mit den statistisch ausgewählten 20 Bodenproben

3 Geoanalyse

Eine Analyse mit Raumbezug ist eine Untersuchung mit anschließender Interpretation von Daten unter Berücksichtigung der räumlichen Verteilung. Dabei ist im Allgemeinen neben der qualitativen auch die quantitative Aussage im Raum von großem Interesse.

3.1 Kriging

Klassische Ansätze der Interpolation von räumlichen Phänomenen beginnen mit der Wahl einer geeigneten Interpolationsfunktion und der Bestimmung der zugehörigen Parameterwer-

te, welche anschließend mittels einer Optimierungsstrategie verbessert werden. Das Kriging hingegen, bezeichnet eine statistische Interpolationsmethode, basierend auf numerischen Messungen von räumlich unterschiedlich verteilten Punkten (BILL & ZEHNER).

Bevor das eigentliche Kriging durchgeführt wird, hat eine explorative Datenanalyse zu erfolgen, die Hinweise auf die Datenzusammensetzung liefert. Es können in der Gesamtheit der Daten Hinweise auf atypische Werte, auf eine räumliche Autokorrelation oder auf einen richtungsabhängigen räumlichen Zusammenhang vorgefunden werden, die in der Analyse zu berücksichtigen sind.

Tab. 2: Cadmiumwerteverteilung der 20 Proben im Horizont 0 – 10 cm

<i>Minimum</i>	11,36 mg/kg
<i>25 %</i>	16,68 mg/kg
<i>Median</i>	20,11 mg/kg
<i>Mittel</i>	20,65 mg/kg
<i>75 %</i>	22,46 mg/kg
<i>Maximum</i>	35,20 mg/kg

Tab. 3: Krigingparameter für die Auswertung

<i>Korrelationsfunktion</i>	Sphärisch
<i>Sill</i>	34,4
<i>Range</i>	4,0
<i>Nugget</i>	8,1

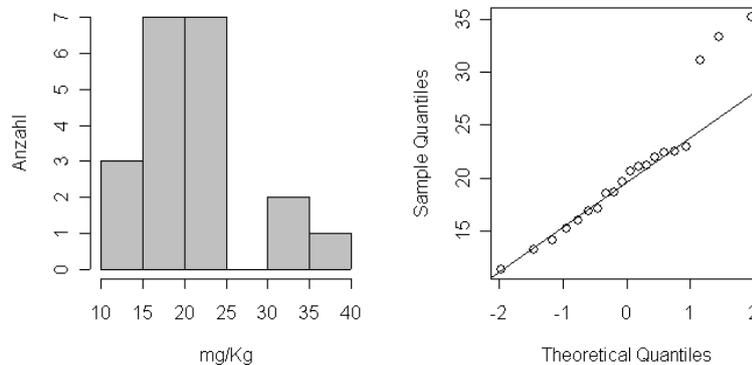


Abb. 2: [Links] Histogramm der Schwermetallverteilung / [Rechts] Wahrscheinlichkeitsgrafik

Die Einteilung des Histogramms nach Scott ist in Abbildung 2, links dargestellt. Es ergaben sich sechs gleichgroße Klassen, mit einem Startwert von 10 mg/kg Cadmium und einer Bandbreite von 5 mg/kg. Diese Einteilung zeigt, dass eine Punkthäufigkeit zwischen 15 und 25 mg/kg liegt, was sich wiederum mit der Median und Mittelwertverteilung deckt. Da die Menge der Messwerte (Anzahl 20) eher gering ausfällt, ist der Nachweis einer Normalverteilung nicht exakt erfüllt. Die Wahrscheinlichkeitsgrafik zeigt zu jedem Messwert die standardnormalverteilte Zufallsvariable. Diese Zahlentupel müssten alle auf einer Geraden liegen, falls sie es nicht auf dem Geradenabschnitt liegen, könnten sie auch Hinweise auf atypische Werte in der Stichprobe liefern. Dies ist aber im vorliegenden Fall nicht gegeben. Tabelle 3 zeigt die Parameter der Variogrammfunktion für Cadmium in der ersten Bodenschicht (CRES-SIE, 1993).

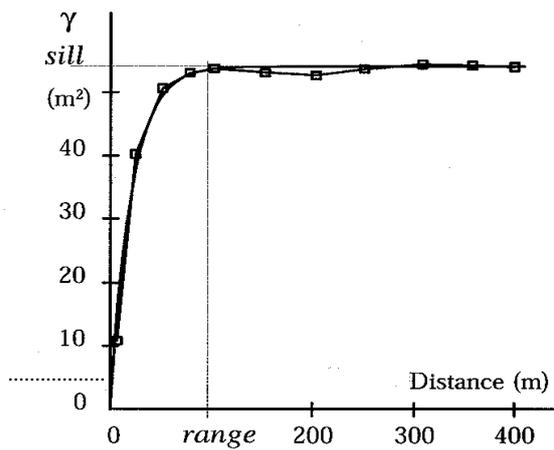
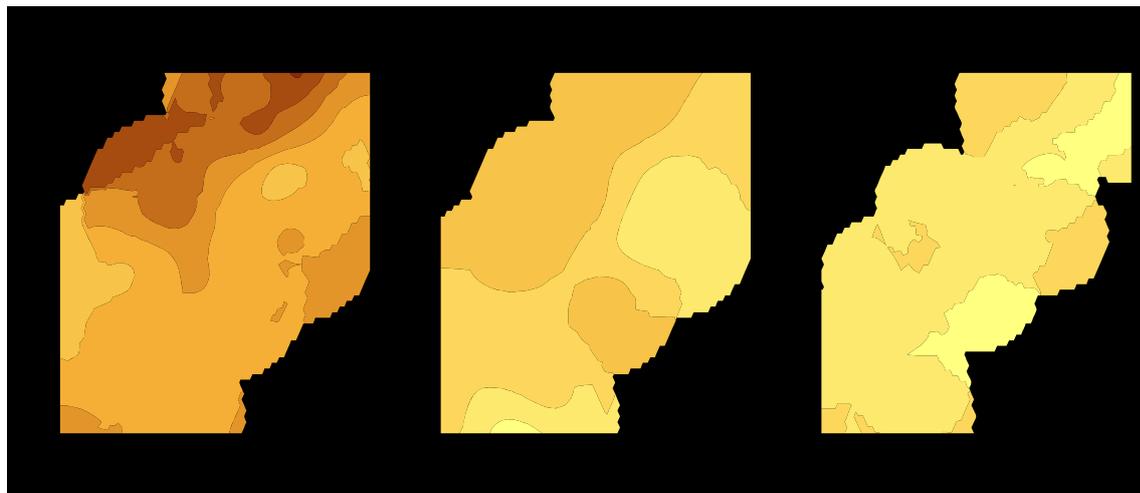


Abb. 3: Variogrammfunktion und Begriffsdefinition nach CHILÈS & DELFINER (1999) geändert

Der *Sill* beschreibt bei einer beschränkten Funktion die kleinste obere Schranke, die in direkter Verbindung mit dem *Range* also der Einflussdistanz der Funktion steht. Der Nugget-Effekt veranschaulicht die Heterogenität des räumlichen Phänomens und den Einfluss von Messungenauigkeiten bzw. Auflösungsschärfe der Untersuchungsmethoden.

Auf Basis der Parameter, die für jedes Element und Horizont individuell zu generieren sind, entsteht eine flächenhafte Auswertung im Geographischen Informationssystem (WEISENSEE & FISLER, 2003). Nur durch die Integration einer flächenhaften Visualisierung können räumliche Strukturen und Muster erkannt, interpretiert und analysiert werden.



Legende

Cd-Gehalt (mg/kg)

	0 - 4		20 - 24
	4 - 8		24 - 28
	8 - 12		28 - 32
	12 - 16		32 - 36
	16 - 20		36 - 40

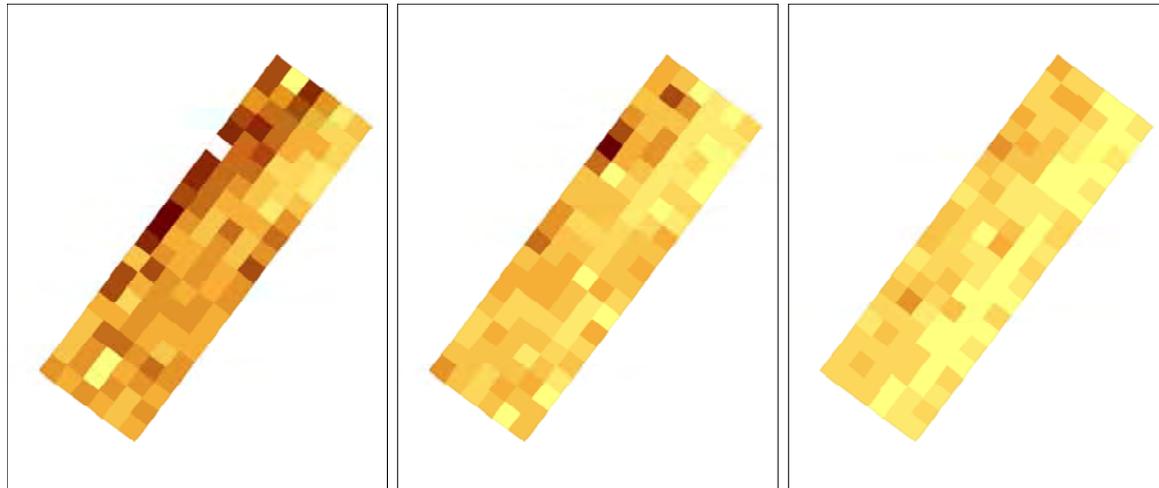
Abb. 4: Cadmiumverteilung nach dem Kriging [Links] Horizont 0 - 10 cm / [Mitte] Horizont 10 - 20 cm / [Rechts] Horizont 20 - 45 cm bei gleichbleibender Werteeinteilung

Abbildung 4, links zeigt die Verteilung von Cadmium in der ersten Schicht und eine auffällige erhöhte Konzentration von Cadmium im nördlichen Bereich der Versuchsfläche. Das wi-

derspricht der Annahme, dass es zu einer gleichmäßigen Belastung der Fläche gekommen ist. Bei der Betrachtung der weiteren Horizonte ist die kontinuierliche Abnahme der Gehalte zu erkennen, aber immer mit einer vergleichsweise hohen Konzentration im nördlichen Bereich.

3.2 Ergebnis Grid

Die Einzelmessergebnisse sind in einem Meterraster zusammengefasst und nicht interpoliert. Die Abbildung 5 zeigt ebenfalls eine erhöhte Konzentration an der nördlichen Feldgrenze. Die Konzentrationen nehmen mit der Bodentiefe ab, zeigen aber weiterhin die Heterogenität des Cadmiumgehalts.



Legende

Cd-Gehalt (mg/kg)

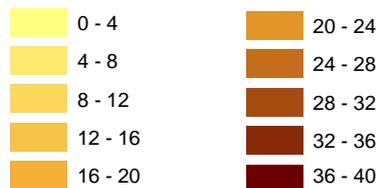


Abb. 5: Gesamtmatrix der Quadratmeteranalyse [Links] Horizont 0 - 10 cm / [Mitte] Horizont 10 – 20 cm / [Rechts] Horizont 20 - 45 cm bei gleichbleibender Werteeinteilung

Die Legende ist mit der Legende aus dem Kriging identisch, so dass ein direkter Vergleich möglich ist.

4 Ergebnisvergleich

Für die Visualisierung der Abweichungen zwischen der Interpolation und den eigentlichen Messwerten aus der chemischen Analytik wurde die Abweichung bestimmt und dargestellt. Der Bereich liegt zwischen -20 bis +20 mg/kg Cadmium.

Die Abbildung 6 mit der Häufigkeitsverteilung zeigt, dass ein großer Anteil der Abweichungen zwischen der Gesamtmatrix und den interpolierten Werten im Bereich von 0 liegt und eine Gauß'sche Glockenkurve erkennbar ist. Aber erst durch die flächenhafte Darstellung der Abweichungen sind Bereiche erkennbar in der eine höhere Abweichung vorliegt als in anderen Regionen.

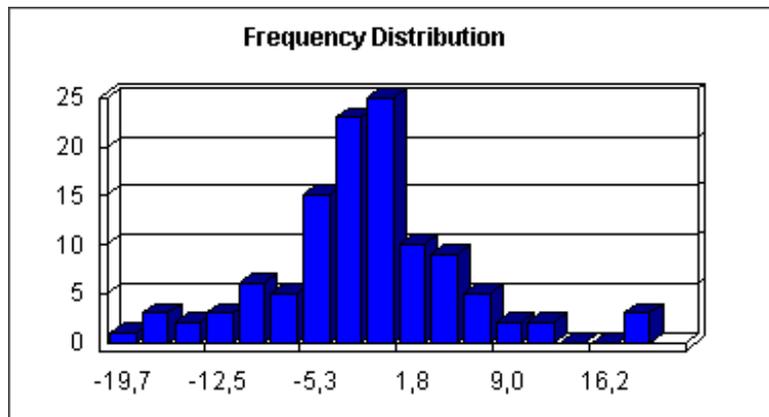
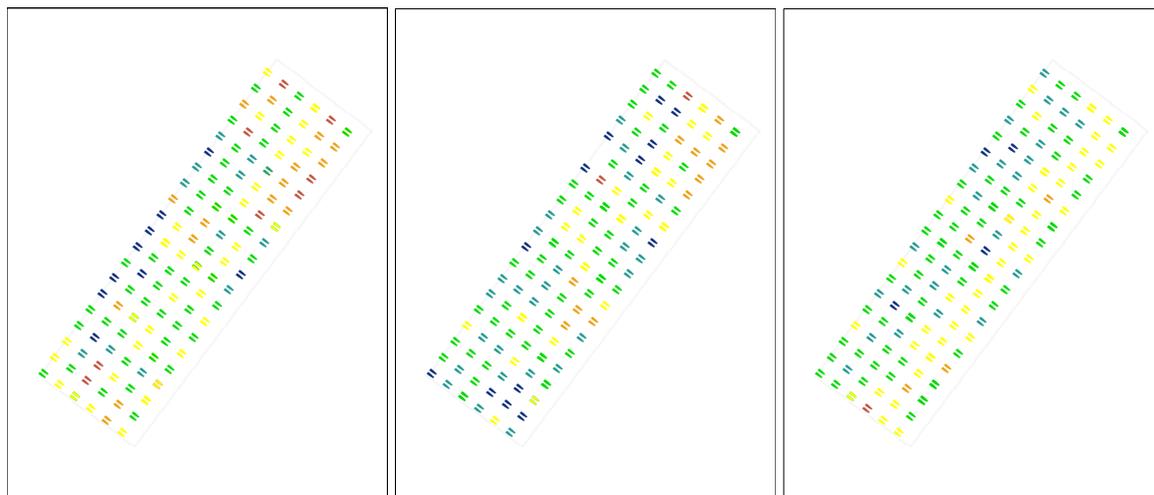


Abb. 6: Häufigkeitsverteilung der Differenz von Cadmium im Horizont 0 - 10 cm



Legende

Abweichungen in mg/kg

- | | |
|-------------|-----------|
| ■ -20 - -10 | ■ 0 - 5 |
| ■ -10 - -5 | ■ 5 - 10 |
| ■ -5 - 0 | ■ 10 - 20 |

Abb. 7: Differenzberechnung [Links] Horizont 0 - 10 cm / [Mitte] Horizont 10 - 20 cm / [Rechts] Horizont 20 - 45 cm

Im nordöstlichen Abschnitt ist eine höhere Abweichung zu erkennen, die sich auf den ersten und zweiten Bodenhorizont ausweitet. Ebenfalls ist speziell im ersten Horizont eine gewisse Modellierungsunschärfe zum Rand hin erkennbar, obwohl die Hälfte der Interpolationsstützpunkte am Rand der Testfläche liegen.

5 Ausblick

Die Gegenüberstellung der Messergebnisse zeigt die Unschärfe der Geoanalyse für das Versuchsfeld. Die Annahme, dass das Feld homogen belastet ist, kann für das Forschungsprojekt auf diesem Areal verworfen werden. Um nach mehreren Jahren an einer bestimmten Örtlichkeit die Schadstoffaufnahme in der Summe nachweisen zu können, ist es unerlässlich, jede Parzelle für sich zu erfassen. Diese Methodik ist aber nicht für die Praxis umsetzbar. Daher kann ein anderes Verfahren und Vorgehen das Interpolationsergebnis stabilisieren:

Die Untersuchung des Bodens erfolgt durch Vorgaben des Auftragsgebers bzw. durch das Budget, so dass die Messdichte gering bleibt, aber auch durch einige Detailuntersuchungen im Makromaßstab (beispielsweise 5 Messungen auf einem Quadratmeter) kann ein Hinweis auf die Homogenität bzw. Inhomogenität der Gehalte gegeben werden.

Als ein weiterer Schritt zur Stabilisierung ist ein Messverfahren zu etablieren, das dem Nutzer zerstörungsfrei, wiederholbar und kostengünstig Messergebnis liefert, die einen Bezug zur Schwermetallaufnahme in den Pflanzen widerspiegelt und indirekt auf den Schwermetall im Boden verweist (FISLER & WEISENSEE, 2004). Da auf einem Feld in der Regel dieselbe Pflanze kultiviert und mit denselben Anbau- und Pflanzenschutzmethoden gearbeitet wird, sind neben den topographischen Einflüssen an der Pflanze, die Bodenparameter und somit die Schwermetallgehalte ein entscheidender Einflussparameter. Durch Bodenproben an Messstellen mit gleichzeitiger Indexbestimmung an den Pflanzen können im gleichen Zeitrahmen weitere Indizes ohne Schwermetallanalytik bestimmt werden, so dass die klassische Auswertung über Kriging oder anderen Verfahren über die Indizes gestützt werden und zu einer höheren Sicherheit führen. Das zur Zeit im Forschungsprojekt Biologische Bodensanierung in der Entwicklung befindliche Erfassungssystem basiert auf der Reflexionsmessung an Blättern mit Hilfe eines Hyperspektralscanners in einem Bereich von 350 nm bis 1700 nm. Aus der Korrelation zwischen dem Schwermetallgehalt im Blatt und dem Spektrum ist das Ziel, stabile Indizes für den Nachweis und den Gehalt von Schwermetallen zu generieren.

6 Danksagungen

Die Arbeiten zu diesem Beitrag werden von der Volkswagen Stiftung gefördert und von der Arbeitsgemeinschaft Innovative Projekte AGIP betreut. Das Gesamtprojekt der Biologischen Bodensanierung wird einerseits von dem Emden Institut für Umwelttechnik EUTEC und dem Institut für Angewandte Photogrammetrie und Geoinformatik IAPG gemeinsam realisiert.

7 Literaturverzeichnis

- BILL, R. & ZEHNER, M. L., 2001: Lexikon der Geoinformatik, Wichmann, Heidelberg.
- BÜCHERL, K., 2004: Plus/Minus 100 % - Fehlerabschätzung bei der Altlastenerkundung, Tagungsband zum Altlastensymposium 2004, GAB/ITVA.
- CHILÈS, J.-P. AND DELFINER, P., 1999: Geostatistics. Modeling Spatial Uncertainty. Wiley series, ISBN 0-471-08315-1
- CRESSIE, N.A.C., 1993: Statistics for spatial data, Wiley series, ISBN 0-471-00255-0.
- FISLER, A. & WEISENSEE, M. 2004: Management of Geo-coded Soil Data, In: Proc. ISPRS Congress WG VII/2 Sustainable Agriculture & Eco-System Approach, Istanbul.
- WEISENSEE, M. & FISER, A., 2003: Parameter Acquisition and Visualisation of Soil Processes. ISPRS Workshop WG IV/6 Landscape Modelling and Visualization, Stuttgart.

Präzise Erfassung und Kartierung von Unkräutern mit GIS

MATTHIAS BACKES¹ & LUTZ PLÜMER²

Zusammenfassung: Im Präzisen Pflanzenbau werden Geoinformationssysteme (GIS) unter anderem dazu verwendet, unterschiedliche ertragslimitierende Faktoren präzise zu erfassen, um auf deren Verteilungsmuster adäquat reagieren zu können. Aus diesem Grund werden vor der Applikation von z.B. Herbiziden Verteilungskarten für Unkräuter erstellt. Hierzu werden Unkräuter zunächst stichprobenhaft auf Ackerflächen erfasst. Dieses Vorgehen kann zu mehrdeutigen Verteilungskarten führen. Da die Frage nach der Repräsentativität der Stichproben für die teilflächenspezifische Unkrautkontrolle ohne die genaue Kenntnis der Grundgesamtheit nicht zweifelsfrei zu beantworten ist, wird ein Verfahren vorgestellt, das es ermöglicht, einen präzisen Einblick in die Grundgesamtheit der Unkräuter auf einer Ackerfläche zu erhalten. Hierbei wurde deutlich, dass eine adäquate Unkrautkontrolle erst im Zusammenhang mit Erfassungsgenauigkeiten gelingen kann, die mit manuellen Verfahren der Datenerfassung nicht mehr zu realisieren ist.

1 Einleitung

In der Landwirtschaft spielen Unkräuter eine sehr bedeutende Rolle. Sie verursachen weltweit großen Schaden in allen landwirtschaftlichen Kulturen. Die potentiellen Ernteverluste durch den Einfluss von Unkräutern werden von OERKE & STEINER (1996) bei Kulturpflanzen aus den hiesigen Breiten, wie z.B. Weizen, Gerste oder Mais, mit über 50 Prozent beziffert. Da Herbizide (Pflanzenschutzmittel gegen Unkräuter) zur Zeit noch relativ kostengünstig sind und eine sehr hohe Effektivität besitzen, verwenden Landwirte sie in hohem Maße. Allein im Jahr 2002 wurde in der Bundesrepublik Deutschland eine Menge von ca. 14.000t herbizider Wirkstoffe abgesetzt. Nach ZWERGER et al. (2004) wurden hierzulande 80 bis 95 Prozent aller Getreide- bzw. Rapsflächen sowie 99 Prozent aller Zuckerrübenflächen mit Herbiziden behandelt. Die üblicherweise flächeneinheitlich durchgeführte Applikation von Herbiziden lässt dabei allerdings außer Acht, dass Unkräuter auf den Ackerflächen in den meisten Fällen heterogen - in Form von Nestern - verteilt sind (MARSHALL, 1989; MORTENSEN et al., 1993; NORDBO et al., 1994; CARDINA et al., 1997). Somit werden Herbizide bei diesem Vorgehen auch an solchen Stellen gespritzt, an denen gar keine Unkräuter vorkommen. Daraus ergibt sich ein großes Einsparungspotential für Herbizide, wenn nur dort gespritzt wird wo tatsächlich Unkräuter wachsen. Mit einer Methoden des Präzisen Pflanzenbaus (teilflächenspezifische Unkrautkontrolle) ist es möglich dieses Potential zu nutzen.

1.1 Präziser Pflanzenbau

Der Präzise Pflanzenbau als Kernstrategie innerhalb einer modernen, nachhaltigen Pflanzenproduktion hat die Optimierung des Betriebsmitteleinsatzes auf der Grundlage der Anwendung von teilflächenspezifischen Informationen zum Ziel. Teilflächen werden hierbei im Gegensatz zur konventionellen, flächeneinheitlichen Bewirtschaftung zu den kleinsten Bewirtschaftungseinheiten einer Ackerfläche. Die georeferenzierten Informationen über die räumli-

¹ Dr.-Ing. Matthias Backes, Institut für Kartographie und Geoinformation, Rheinische Friedrich-Wilhelms Universität Bonn, Meckenheimer Allee 172, 53115 Bonn, eMail: backes@ikg.uni-bonn.de

² Prof. Dr. rer.nat. Lutz Plümer, Institut für Kartographie und Geoinformation, Rheinische Friedrich-Wilhelms Universität Bonn, Meckenheimer Allee 172, 53115 Bonn, eMail: pluemmer@ikg.uni-bonn.de

che Verteilung verschiedener Umweltfaktoren, wie z.B. Bodenart, Nährstoffgehalt, Pflanzenkrankheiten, aber auch das Unkrautvorkommen innerhalb dieser Teilfläche, dienen dann der GPS-gesteuerten Reaktion auf diese Faktoren mit zielgerichteten Maßnahmen.

1.2 Teilflächenspezifische Unkrautkontrolle

Wie bereits erläutert, sind Unkräuter auf Ackerflächen heterogen verteilt und somit ein Schadfaktor, auf den die Landwirtschaft mit Maßnahmen des Präzisen Pflanzenbaus besonders gut reagieren kann. Neben der heterogenen Verteilung treten Unkräuter zudem meist ortstabil im Acker auf, d.h. in bestimmten Kulturarten bilden sich Leitunkräuter oft an der Stelle erneut, an der sie in der Vergangenheit bereits aufgetreten sind. Diese Ortstabilität von Unkräutern bzw. Unkrautnestern wurde unter anderem von WILSON & BRAIN (1991), WALTER (1996), GERHARDS et al. (1997) und BARROSO et al. (2004) beschrieben. Daher wäre es sinnvoll, an dieser Stelle mit Hilfe von Techniken des Präzisen Pflanzenbaus, hier im besonderen mit Maßnahmen der teilflächenspezifischen Unkrautkontrolle (vgl. Abb. 1), einzugreifen.

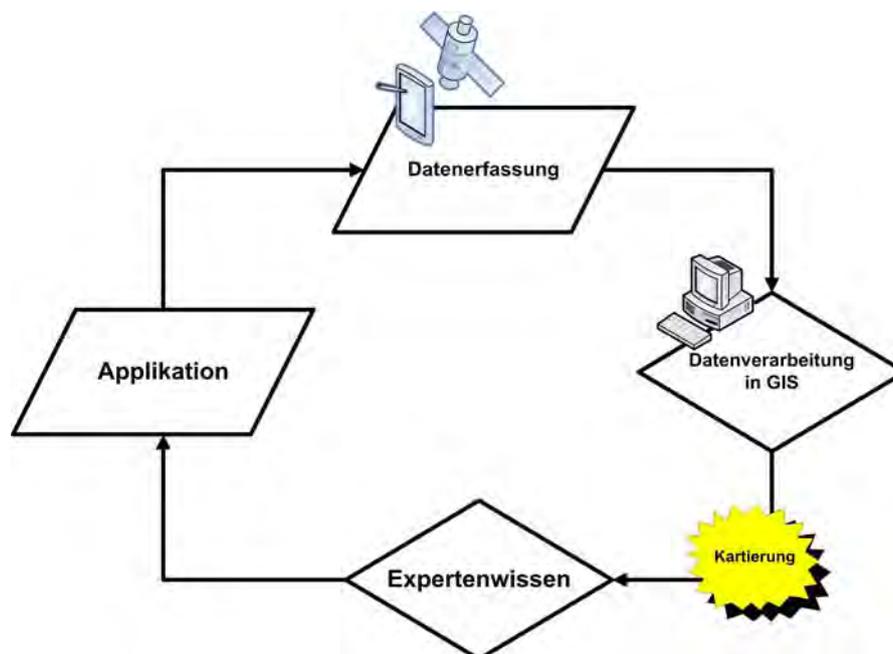


Abb. 1: Der Kreislauf teilflächenspezifischer Unkrautkontrolle basiert auf der georeferenzierten Datenerfassung von Unkräutern und der anschließenden Datenverarbeitung und -analyse in GIS. So kann eine teilflächenspezifische Applikation von Herbiziden auf der Basis von Expertenwissen vorgenommen werden.

Hierbei werden in der Regel Verfahren angewendet, die auf einem Kartierungsansatz beruhen. Aus praktischen Gründen ist man hierbei auf die Erfassung von Stichproben angewiesen, die als repräsentativ für eine Teilfläche angesehen werden. Diese Stichproben werden an den Kreuzungspunkten eines zumeist regelmäßigen Messrasters mit Hilfe des *Göttinger Zählrahmens* (BARTELS et al., 1989) genommen. Hierbei handelt es sich um einen Metallrahmen mit einer Fläche von $0,25 \text{ m}^2$ in dem alle Unkräuter nach Arten differenziert bestimmt werden. Nach der Stichprobennahme im Feld werden GIS dazu verwendet, mit Hilfe räumlicher Interpolationsverfahren flächenhafte Darstellungen der Unkrautverteilung - Unkrautverteilungskarten - zu erstellen.

Diese Unkrautverteilungskarten werden anschließend in modernen Feldspritzen dazu genutzt, Herbizide nur dort auszubringen wo die georeferenzierte Unkrautverteilungskarte einen gewissen Schwellenwert der Unkrautdichte überschritten hat. Allerdings bleibt bei diesem Vorgehen die Frage offen, ob die entnommenen Stichproben auch tatsächlich repräsentativ für die vorliegende Verunkrautungssituation waren.

Im Rahmen verschiedener Studien (BACKES & PLÜMER, 2003; COUSENS et al., 2002) wurde daher mit Hilfe von GIS untersucht welcher Einfluss theoretisch von einem veränderten Messraster zur Stichprobennahme ausgeht. Hierbei zeigte sich bereits, dass ein erheblicher Einfluss vom sogenannten Startpunkt für eine Stichprobennahme ausgeht. Auch geostatistische Untersuchungen verstärkten den Eindruck, dass die tatsächliche Verteilung der Unkräuter auf einer Ackerfläche nicht adäquat erfasst werden kann (BACKES & PLÜMER, 2004). Ein empirischer Beweis für diese Untersuchungen konnte jedoch bisher nicht geführt werden.

Aus diesem Grunde wurde ein Verfahren entwickelt, dass die hochauflösende Erfassung von Unkrautpopulationen in einer Ackerfläche zum Zwecke der Validierung gängiger Stichprobenverfahren der teilflächenspezifischen Unkrautkontrolle ermöglicht.

2 Erfassung und Kartierung

Um das Ziel einer hochauflösenden Unkrautdatenerfassung mit dem oben genannten Ziel zu erreichen, wurde in dieser Studie ein spezielles Trägerfahrzeug (WeedScanner, Abb. 2) entwickelt. Dieses Fahrzeug wird manuell über die Ackeroberfläche geführt. Dabei wird Reihenweise vorgegangen. Mit Hilfe von digitalen Camcordern (Sony TRV900E) wurden flächendeckend Videosequenzen der Ackeroberfläche aufgenommen.



Abb. 2: Der WeedScanner in einem Zuckerrübenbestand bei Rheinbach. An der Frontseite des Fahrzeugs sind 3 digitale 3Chip-CCD Camcorder befestigt, die einen kontinuierlichen Film der Ackeroberfläche erstellen.

Die Camcorder diesen Typs sind mit je 3 CCD Chips ausgestattet, die eine Größe von 1/4 Zoll haben und jeweils 380.000 Pixel aufnehmen können.

Ein möglichst breiter Überlappungsbereich (Abb. 3) zwischen den Camcorderbildern und auch zwischen zwei Überfahrten sollte dabei unter anderem gewährleisten, dass kein Unkraut außerhalb des Aufnahmebereichs liegt.

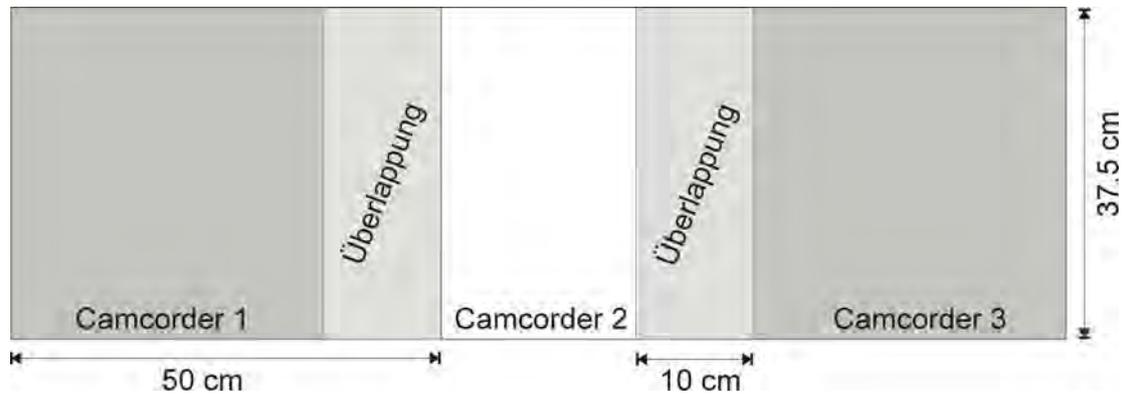


Abb. 3: Dargestellt ist die Überlappung der einzelnen Camcorderaufnahmen (hellgraue Bereiche). Ein Überlappungsbereich von 20 Prozent sollte unter anderem die Verknüpfung der Einzelbildreihen ermöglichen.

Die Videosequenzen der Ackeroberfläche müssen im Anschluss an die Überfahrten derart bearbeitet werden, dass eine Zuordnung von Geokoordinaten zu jedem Bildpixel möglich wird. Dies ist notwendig, um die exakten Geokoordinaten jedes im Bild befindlichen Unkrauts bestimmen zu können. Um dieses vorrangige Ziel zu erreichen, mussten die Videosequenzen mit einer Videobearbeitungssoftware (Adobe Premiere 6.0) in Einzelbilder transformiert werden. Jedes fünfte Einzelbild der Videosequenzen wurde dabei ausgewertet. Anschließend konnte eine Software zur Generierung von Panoramaansichten (Panavue Image Assembler 2.12) verwendet werden, um vollständige zusammenhängende Szenen jedes gefilmten Ackerstreifens zu erstellen. Dieser *stiching* Prozess konnte nicht vollständig automatisch durchgeführt werden, da die Ähnlichkeiten in den Einzelbildern zu einzelnen Fehlverknüpfungen von Bildern führten. Eine manuelle Nachbearbeitung war daher in vielen Fällen notwendig. Die resultierenden, langen Bilderreihen wurden dann in der Software Farmland-Builder (DÖRSCHLAG et al., 2003) ausgewertet, sodass hochauflösende Unkrautverteilungskarten entstanden (Vgl. Abb. 4). Die Zuordnung von Realwelt-Koordinaten zu den Bildpixeln konnte auf der Grundlage von Referenzpunkten durchgeführt werden, die mittels DGPS bestimmt wurden. Der FarmlandBuilder ermöglicht dann die georeferenzierte Markierung jedes in den Bildern sichtbaren Unkräuter.

3 Ergebnisse

In Abb. 4 sind die Verteilungsmuster ausgewählter Unkrautarten auf einer Versuchsfläche dieser Studie dargestellt. Die meist heterogene Verteilung der Unkräuter ist deutlich zu erkennen.

Um diese Karten im Hinblick auf die Genauigkeit der stichprobenhaften Unkrauterfassungen für die teilflächenspezifische Unkrautkontrolle untersuchen zu können, wurde im Rahmen dieser Studie eine speziell an diese Anforderungen angepasste GI-Software (Sampling Simu-

lator) entwickelt (BACKES et al., 2005). Mit dieser Software ist es möglich, unterschiedliche Vorgehensweisen der Datenerfassung auf der Grundlage der hochauflösenden Unkrautverteilungskarte (Abb. 4) zu simulieren.

Neben der Untersuchung des Einflusses der Zählrahmengröße auf die Genauigkeit der Unkrautverteilungskarten können auch unterschiedliche Messrasterabstände eines regelmäßigen Messrasters variiert und analysiert sowie Zufallsstichproben unterschiedlichen Umfangs simuliert werden. Aus den simulierten Ergebnissen können zudem jeweils Unkrautverteilungskarten erzeugt werden, die alle in dieser Arbeit aufgezeigten methodischen Probleme systematisch visualisierbar machen (vgl. Abb. 5). Es konnte gezeigt werden, dass die Fläche des Zählrahmens signifikanten Einfluss auf die Resultate einer Stichprobennahme und damit auch die Darstellung in einer flächenhaften, interpolierten Unkrautverteilungskarte hat. Gleiches gilt für die Auflösung des Messrasters.

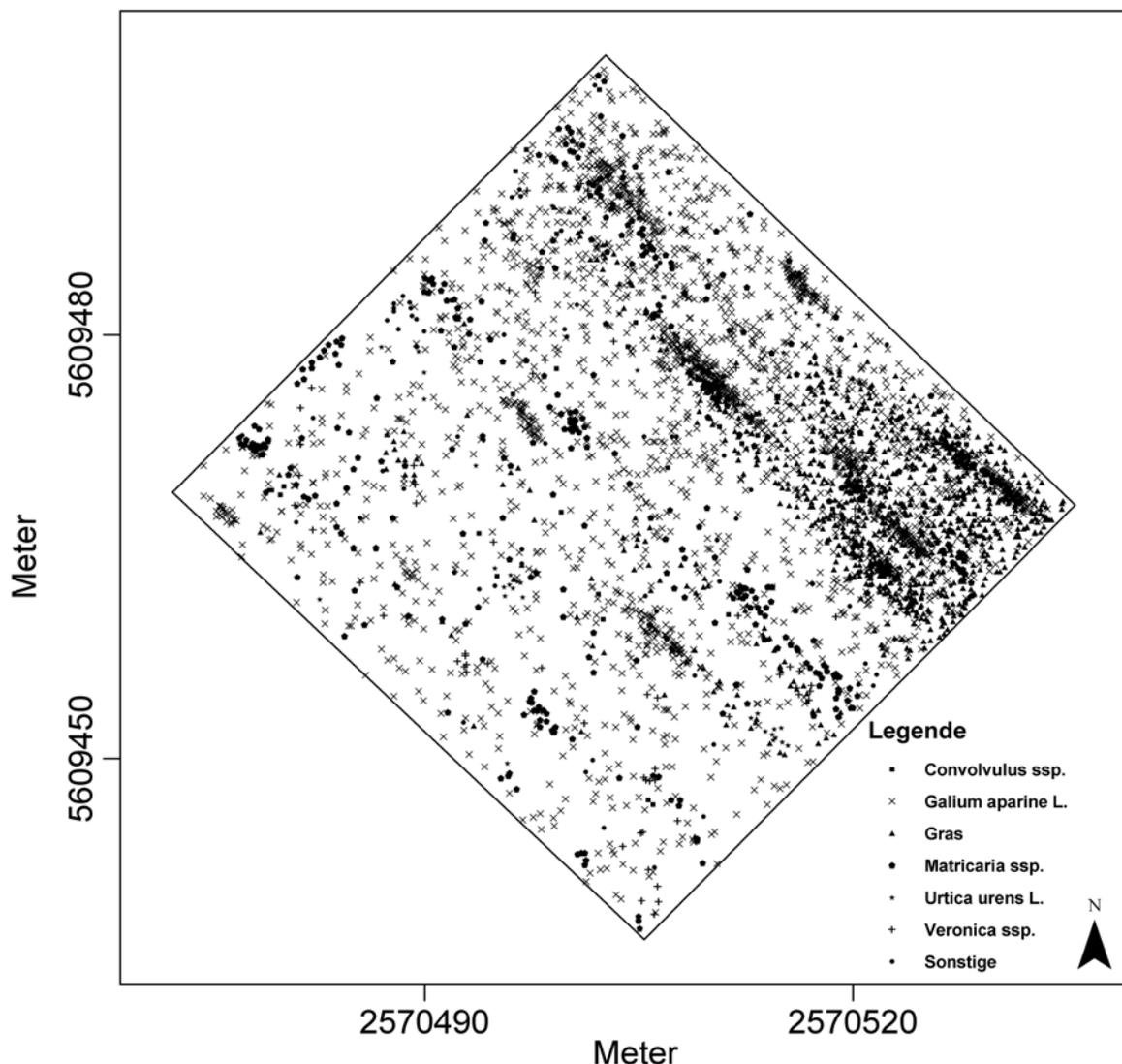


Abb. 4: Räumliche Verteilung ausgewählter Unkräuter in einem Ackerschlag bei Rheinbach ermittelt mit der WeedScanner Technik und dem FarmlandBuilder.

Je nachdem mit welcher räumlichen Auflösung die Datenerfassung durchgeführt wurde entstanden deutlich unterscheidbare Karten. Besonders deutlich wurden die Probleme der stichprobenhaften Datenerfassung mit einem Zählrahmen allerdings bei der Simulation einer Ver-

schiebung des gesamten Messrasters um wenige Meter (Abb. 5). Je nachdem wie sich die Position des Messrasters veränderte, entstanden selbst bei sehr feinen Messrastern (im Vergleich mit in der Praxis üblichen Einstellungen von 7x7 m und mehr) noch signifikant unterschiedliche Unkrautverteilungskarten.

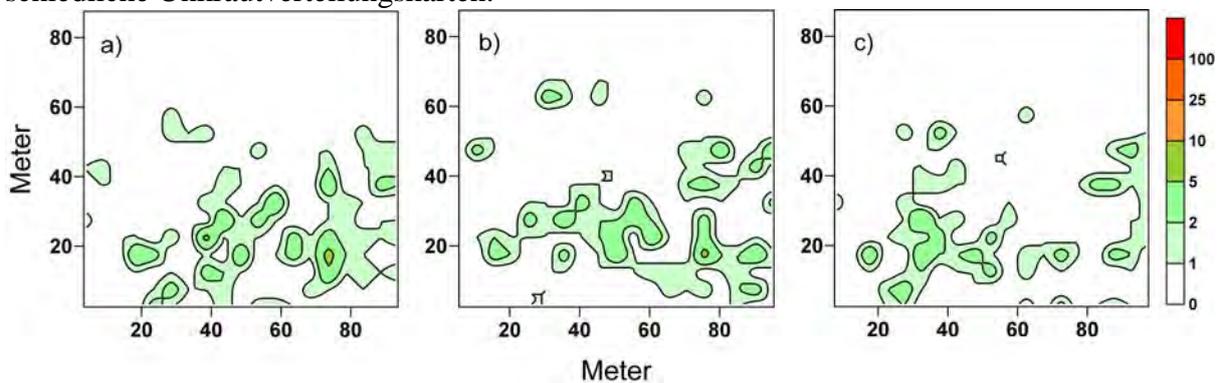


Abb. 4: Bei der Verschiebung des gesamten Meßrasters (in diesem Beispiel jeweils um 1,5 Meter nach rechts) entstanden selbst bei einem feinen Meßraster von 5x5 m noch unterschiedliche Unkrautverteilungskarten a), b), c). Farblich dargestellt ist die Unkrautdichte in Pfl. m⁻².

Erst bei der Wahl von Messrastern die unterhalb der Grenze von 3x3 m (nicht dargestellt) lagen und Zählflächen von 1 m² entstanden Unkrautverteilungskarten, die unabhängig von einer Messrasterverschiebung blieben.

4 Diskussion

In dieser Studie wurden basierend auf einer neuen Methodik hochauflösende Unkrautverteilungskarten generiert. Diese Karten konnten dazu verwendet werden mit einer GI-Software Untersuchungen zur Repräsentativität der in der Praxis verwendeten Stichprobenverfahren zu überprüfen. Dabei hat sich gezeigt, dass es zu signifikanten Änderungen in der Kartierung kommt, wenn die Zählfläche oder die Messrasterauflösung verändert werden. Auch wurde ersichtlich, dass die Stichproben oberhalb einer Messrasterauflösung von 3x3 m nicht invariant gegenüber dem Ort der Datenerfassung sind. Dies hat bedeutenden Einfluss auf die Pflanzenschutzentscheidungen in der Praxis. Insbesondere für die teilflächenspezifische Unkrautkontrolle bedeutet dies, dass eine praxistaugliche und zugleich adäquate Unkrautkartierung nicht ohne weiteres möglich ist. Diese Studie hat aufzeigen können, dass dieses vorrangige Ziel der teilflächenspezifischen Unkrautkontrolle erst bei Stichprobenverfahren erreicht werden kann, die auf dem Wege einer manuellen Datenerfassung nicht realisierbar sind. Die erforderlichen online-Verfahren, die solche Genauigkeiten ermöglichen würden, sind bisher jedoch erst an der Schwelle zur Praxistauglichkeit (OEBEL et al., 2004) und werden voraussichtlich erst in einigen Jahren für eine breite Anwenderschicht verfügbar sein.

5 Ausblick

Die Ergebnisse, die im Rahmen dieser Studie vorgestellt wurden, zwingen die zukünftige Entwicklungen im Bereich der teilflächenspezifischen Unkrautkontrolle zu einem Paradigmenwechsel: Der Aufwand für eine adäquate Datenerfassung mit manuellen Mitteln ist unverhältnismäßig groß und wenig erfolgversprechend. Daher werden nur online-Verfahren - also solche Verfahren bei denen entweder ein Sensor direkt den Zustand der Ackeroberfläche überprüft und Unkräuter detektieren kann oder bildanalytische Verfahren, die Stichproben

vollautomatisch in hinreichend feiner Auflösung erfassen und auswerten können - eine Chance haben sich in der landwirtschaftlichen Praxis zu behaupten.

6 Danksagung

Die hier vorgestellte Studie ist Teil des DFG-Graduiertenkollegs 722 „Information Techniques for Precision Crop Protection“ an der landwirtschaftlichen Fakultät der Rheinischen Friedrich-Wilhelms Universität Bonn. Besonderer Dank gilt im Zusammenhang mit den Softwareprojekten ‚Sampling Simulator‘ und ‚FarmlandBuilder‘ Daniel Schumacher und Dirk Dörschlag.

7 Literaturhinweise

- BACKES, M. & PLÜMER, L.: On the adequacy of GIS-generated weed maps for Precision Farming, In: VIRRANTAU, K., H. TVEITE (Ed.) Proceedings of the 9th Scandinavian Research Conference on Geographical Information Sciences (ScanGIS), Espoo, Finnland, 261-268, 2003.
- BACKES, M. & PLÜMER, L.: Comparative studies on the generation of weed maps applying different interpolation methods, Journal of Plant Diseases and Protection, Special Issue XIX : 371-381, 2004.
- BACKES, M., SCHUMACHER, D. & PLÜMER, L.: The sampling problem in weed control. Are currently applied sampling strategies adequate for site-specific weed control?, Precision Agriculture '05, Ed. John Stafford, Wageningen Academic Publishers, 155 - 161, 2005.
- BARROSO, J., FERNÁNDEZ-QUINTANILLA, C., RUIZ, D., HERNAIZ, P. & REW, L.J.: Spatial stability of *Avena sterilis ssp. ludoviciana* populations under annual applications of low rates of imazamethabenz, Weed Research, 44 : 178-186, 2004.
- BARTELS, J., WAHMHOF, W. & HEITFUB, R.: So kann der Praktiker Schadenschwellen feststellen - Hinweise zur praktischen Anwendung von Schadenschwellen für Unkräuter im Getreide, DLG-Mitteilungen, 5 : 270-274, 1983.
- CARDINA, J., JOHNSON, G.A. & SPARROW, D.H.: The nature and consequence of weed spatial distribution, Weed Science, 45 : S. 364-373, 1997.
- COUSENS, R.D., BROWN, R.W., MCBRATNEY, A.B., WHELEAN, B. & MOERKERK, M.: Sampling Strategy is important for producing weed maps: a case study using kriging, Weed Science, 50 : 542-546, 2002.
- DÖRSCHLAG, D., BACKES, M. & PLÜMER, L.: An application to create digital ground truth maps of arable fields, In: Proceedings of the International Conference on Agricultural Science and Technology (ICAST), Houston, USA, 2003.
- GERHARDS, R., WYSE-PESTER, D.Y., MORTENSEN, D.A. & JOHNSON, G.: Characterizing spatial stability of weed populations using interpolated maps, Weed Science, 45 : 108-119, 1997.
- OEBEL, H., GERHARDS, R., BECKERS, G., DICKE, D., SÖKEFELD, M., LOCK, R., NABOUT, A. & THERBURG, R.D.: Teilschlagspezifische Unkrautbekämpfung durch raumbezogene Bildverarbeitung im Offline (und Online)-Verfahren (TURBO) - erste Erfahrungen aus der Praxis, Journal of Plant Diseases and Protection, Special Issue XIX : 459-465, 2004.
- OERKE, E-C. & STEINER, U.: Ertragsverluste und Pflanzenschutz - Die Anbausituation für die wirtschaftlich wichtigsten Kulturpflanzen, In: Schriftenreihe der Deutschen Phytomedizinischen Gesellschaft, Band 6, Eugen Ulmer GmbH & Co., Stuttgart, 1996.

- MARSHALL, E.J.P.: Distribution patterns of plants associated with arable field edges, *Journal of Applied Ecology*, **26**(1) : S. 247-257, 1989.
- MORTENSEN, D.A., JOHNSON, G.A. & YOUNG, L.J.: Weed Distribution in Agricultural Fields. In: Robert, P.C. et al. *Proceedings: Soil Specific Crop Management: a workshop on research and development issues*, Minneapolis, USA, S. 113-124, 1993.
- NORDBO, E., CHRISTENSEN, S., KRISTENSEN, K. & WALTER, M.: Patch spraying of weed in cereal crops, In: *Aspects of Applied Biology - Arable farming under CAP reform*, 40 : S. 325-334, 1994.
- WALTER, A.M.: Temporal and spatial stability of weeds, In: *Proceedings of the 2nd International Weed Control Congress*, Copenhagen, 125-130, 1996.
- WILSON B.J. & BRAIN, P.: Long-term stability of distribution of *Aleopecurus myosuroides* HUDS. within cereal fields, *Weed Research*, 31 : 367-373, 1991.
- ZWERGER, P., MALKOMES, H.P., NORDMEYER, H., SÖCHTING, H.P. & VERSCHWELLE, A.: Weed control: presence and future - the German view, *Journal of Plant Diseases and Protection*, Special Issue XIX : S. 27-38, 2004.

Tectonic induced growth of Lake Beseka (Main Ethiopian Rift)

GOERNER, A.¹, JOLIE, E.¹ & GLOAGUEN, R.¹

Zusammenfassung: Lake Beseka liegt im tektonisch aktiven Äthiopischen Grabenbruch. Seit 1973 vergrößerte sich die Wasserfläche von etwa 11,1 km² auf 39,5 km² im Jahr 2002, so dass die Infrastruktur durch kostspielige Maßnahmen vor der Überflutung geschützt werden muss. Dieser Beitrag diskutiert zwei Theorien zu den Ursachen des drastischen Seespiegelanstieges: Die Bewässerung auf der Abadir Plantage süd-östlich des Sees sowie die Aktivierung der heißen Quellen am südwestlichen Seeufer durch neuzeitliche tektonische Aktivität. Für die Analyse des Gebietes wurden multitemporale Fernerkundungsdaten und meteorologische Aufzeichnungen mit in situ Messungen hydrochemischer Parameter und der Wassertiefe kombiniert. Das Seewachstum konnte anhand eines bathymetrischen Modells quantifiziert werden. Darüber hinaus wurden Störungen unter Verwendung digitaler Geländemodelle lokalisiert. Die Ergebnisse lassen vermuten, dass rezente tektonische Aktivität maßgebenden Einfluss auf die Morphologie und die Grundwasserfließwege hat, und somit die Vergrößerung von Lake Beseka auslöste.

Geological situation and setting of Lake Beseka

The East African Rift System (EARS) is cutting through the Ethiopian highlands (Fig. 1). For about 30 million years the African continent has been torn apart gradually resulting in a rift running some 6000 km from the Jordan River to Mozambique. This process involves impressive geologic phenomena, such as intense volcanic and seismic activity and excessive faulting.

The Ethiopian part of the EARS is divided into four subsystems: the Lake Turkana Rift, the Chew Bahir Rift, the Main Ethiopian Rift (MER) and the Afar Depression. The mid-Miocene to recent MER has a north to northeast (N30-45°) regional trend (Fig. 1a). During the past 2 Ma the main structural and volcanic activity has localised in narrow (~20 km-wide) zones of magmatism and faulting, with little apparent activity along the Mid-Miocene border fault systems (EBINGER & CASEY, 2001). Within these en échelon 'magmatic segments' we observe an intimate relationship between the generation of faults and the localisation of magmatism (KURZ et al., submitted, KERANEN et al., 2004). These highly faulted magmatic segments are characterised by an increase of the segmentation frequency, and a decrease of fault spacing towards the rift centre (GLOAGUEN et al., 2004; GLOAGUEN et al., submitted). At the surface, brittle deformation occurs in en echelon zones throughout the breadth of the MER, including the accordingly aligned felsic shield complexes and chains of basaltic cones. Abundant but low magnitude seismicity has been recorded during the EAGLE (Ethiopia-Afar Geoscientific Lithospheric Experiment) project (KEIR et al., 2005). The northern MER (nMER) is one of few sites worldwide in transition between continental and oceanic rifting (EBINGER & CASEY, 2001). Thus eruptive centres and faults occur together in many areas. Those normal faults also form the preferred pathways for hydrothermal

¹ Institut für Geologie, TU Bergakademie Freiberg, Bernhard-von-Cotta-Str. 2, 09699 Freiberg, e-mail: anna_goerner@web.de

fluids. The rift and the induced topography have a huge impact on the microclimate, the drainage systems and the local ecosystems.

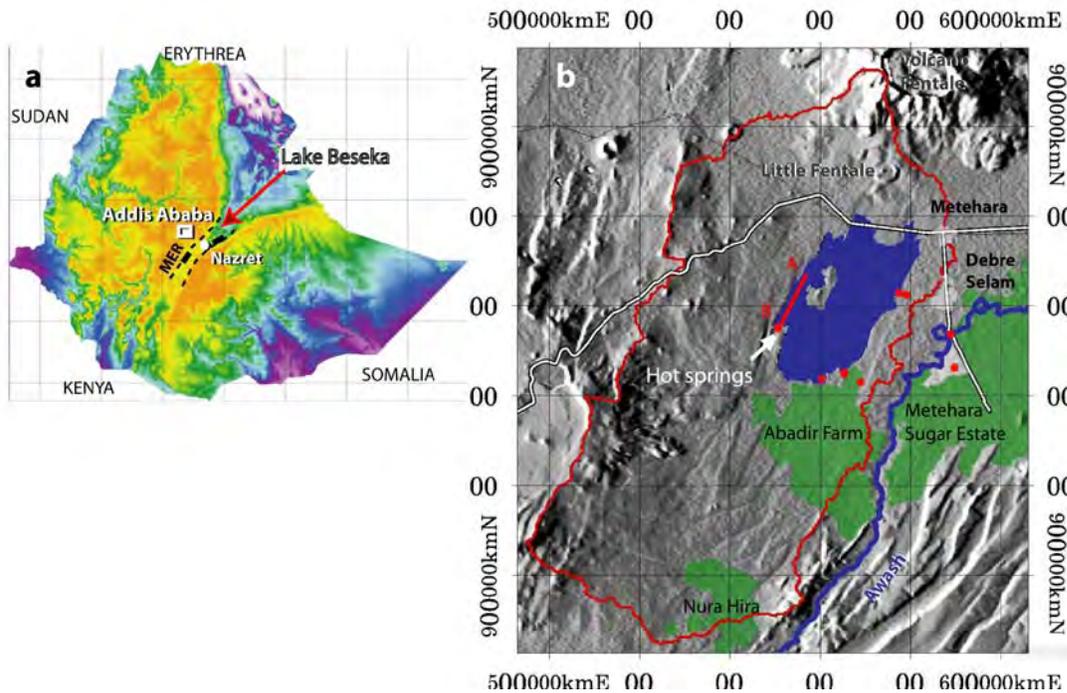


Fig. 1: (a) Localisation of Lake Beseka within the MER. (b) Setting of the study area mapped on a shaded relief SRTM-DEM. The watershed is printed in dark red. AB is an in-situ temperature-conductivity profile (see Fig. 5).

Lake Beseka is located south of the Volcano Fentale in the MER (Fig. 1), at about 955 m above sea level. Zones of increased seismicity (KEIR et al. 2005) generated a deepening basin at the site of the present Lake Beseka. The endorheic lake is situated in a region characterized by normal faults trending N10-20 (Fig. 1b), which also form the shoreline of Beseka, and by the presence of numerous hot springs (MAMO & GETANEH, 2003).

The rapid expansion of the lake has severe implications: A major highway and a railroad – Ethiopia’s only access to the harbour in Djibouti - run along lake Beseka’s northern shore. Though the road has been elevated recently (AYENEW, 2004), it is still threatened by inundation. The growing lake has already flooded parts of a sugar plantation south of Beseka. An embankment has been built to prevent further damage to the crops. A pumping station situated on the northwestern shore is planned to conduct lake water into the river Awash (MWR, 1999), a major Ethiopian river. The Ethiopian authorities inaugurated this water level control centre in the beginning of 2004, although it didn’t seem to work during a field check in October 2004. Since the lake water is very alkaline (pH = 9.5) and saline (electrical conductivity: 6.3 mS/cm), mixing the lake water with river water is therefore likely to affect the hydrochemistry of the river and the ecosystems downstream.

The Abadir Farm – a sugar cane plantation south of Beseka– is mainly placed within the lake’s catchment area. Both the Abadir Farm and the Metehara Sugar Estate east of the water divide rely on the nearby Awash River for watering purposes. According to TESSEMA (1998) the Koka dam was constructed 152 km upstream of the project area in 1960, ensuring a steady flow of the river Awash. As a result, the irrigation project became operational in 1964 (TESSEMA, 1998) and

most previous studies tend to agree, that this marked the beginning of the lakes abnormal expansion (i.e. HALCROW et al., 1979; AYENEW, 2004). The influence of neotectonic activity has barely been taken into account; the basin morphology has not been quantified in previous approaches (TESSEMA, 1898; MWR, 1998, ENGIDA & RUSSOM, 2004).

Climate in outlines

According to the FAO (2005) Ethiopia's tropical monsoon climate is subjected to wide topographic-induced variations. Areas with elevations below 1500 m (including the MER) are subject to arid to semi-arid conditions. The mean annual potential evapotranspiration logged at Metehara, a small town adjacent to Lake Beseka, (1966-2000) is about 1870 mm while annual rainfall averages out at 553 mm. The mean annual temperature recorded in Metehara is approximately 25°C. With average temperatures of 30°C, June is the hottest month whereas the annual minimum of 19°C is measured in December. Rainfall does also have a distinct seasonal component (LAMB et al., 2000). Between March and May a short period of rainfall occurs, known as the 'little rain season'. In the main rainy season from June to October the Atlantic moisture systems brings heavy monsoonal rainfall to the region. The dry season between November and February is only occasionally interrupted by tropical depressions coming from the Indian Ocean (LAMB et al., 2000). According to SELESHI & ZANKE (2004) there is no trend in the annual rainfall total, the seasonal rainfall total or rainy days over central, northern and northwestern Ethiopia in the period 1965 – 2002. This is also true for the precipitation records at Metehara. A meteorological database covering the last 39 years, collected at two different nearby stations has been taken into account in order to study any climatic influence on the lake level and drainage system.

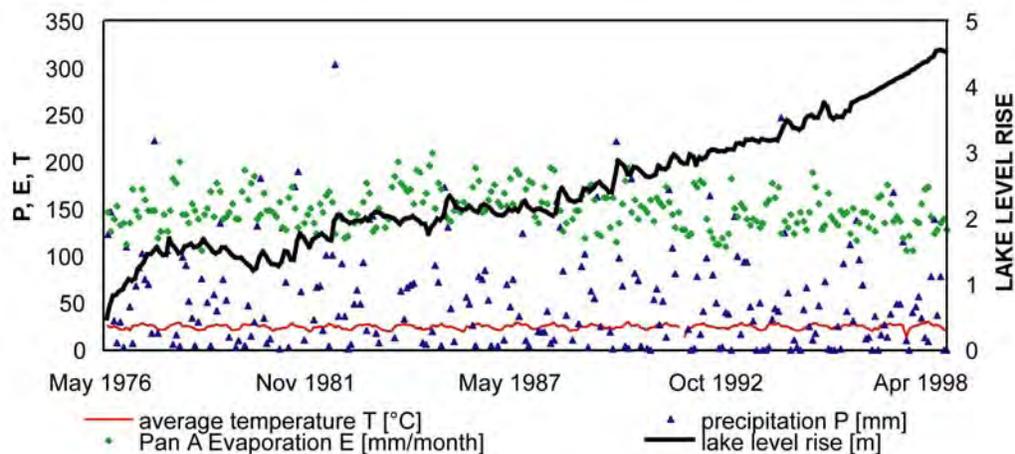


Fig. 2: Temperature, precipitation, potential evaporation and lake level rise recorded at Metehara

Obviously the sudden rise of lake Beseka is not related to regional or local meteorological change (Fig. 2).

Wind speed (+10m) ranges between 0.6-3.4 km/h (night) and 3.8-6.8 km/h (day), with a general wind direction (+10 m) of 45°, rarely 225°. The study area is affected by air masses loaded with dust and daily sandstorms crossing Lake Beseka southwestwards.

Methods and results

We use a combined remote sensing/in situ measurements approach to analyse the basin system. Multi-source and multi-date data allow us to quantify the lake growth and several parameters such as temperature and turbidity, and locate the main active faults. Hydrochemical parameters such as conductivity and pH measurements have been collected during a field season in fall 2004. Using echo sounder data and stereoscopic data from air photos acquired before flooding we have generated a Digital Elevation Model of the floor of Lake Beseka in order to model the water volume increase. The lake's watershed has been calculated (JENSON & DOMINGUE, 1988) based upon SRTM (Space Shuttle Radar Topography Mission) data (90 m resolution). Figure 1b illustrates, that the shape of the catchment is also affected by the regional fault localisation and trend.

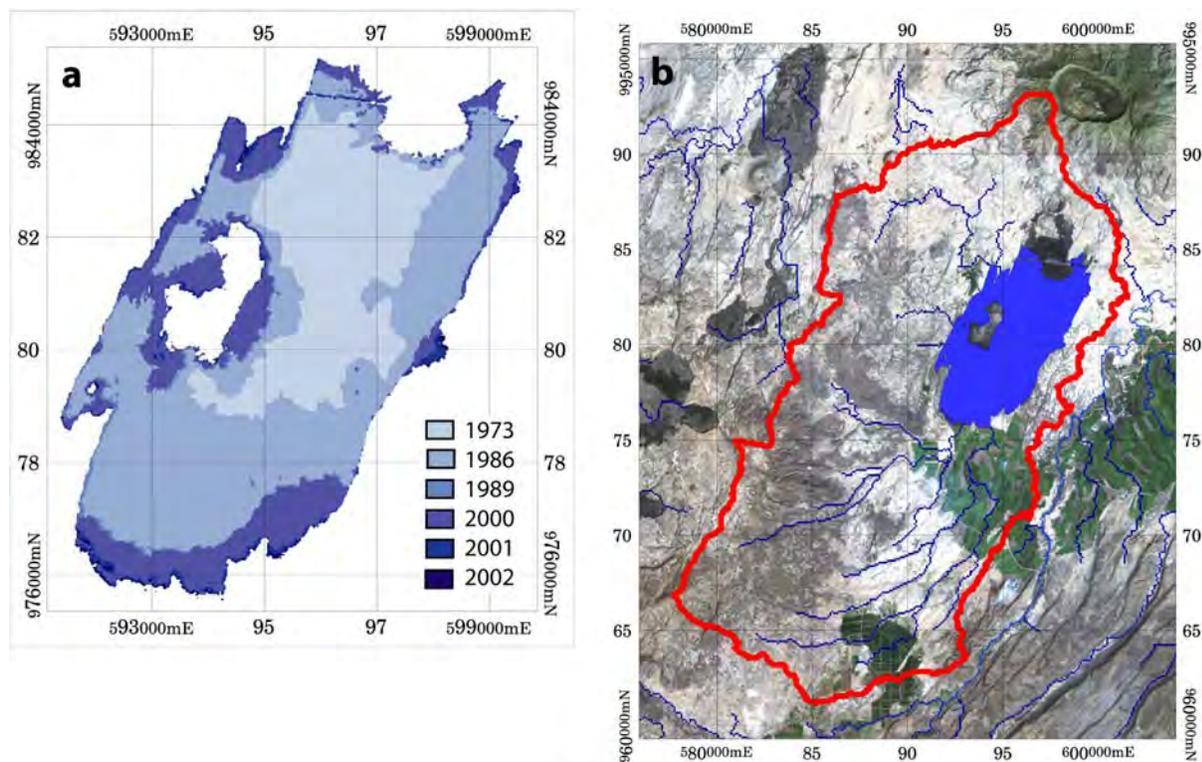


Fig. 3: (a) extend of Lake Beseka's expansion recorded from Landsat scenes, (b) drainage system

Our data show that lake Beseka has neither a permanent inflow nor an outflow on the surface and has no surface connection with the neighbouring River Awash. Figure 3b solely displays the preferential pathways for surface runoff from the catchment during rainfall events. Other inflow components are precipitation on the lake and groundwater discharge. During a field trip in

September/October 2004 the outflow of hot springs located at the southwestern shore of Beseka was estimated to 10 l/s.

Landsat (180-054,168-054: 1973, 1986, 1989, 2000, 2001, 2002) and ASTER scenes (2000, 2001) have been investigated in order to address temporal variations. These images have all been taken in the dry season. As the littoral is difficult to attribute to either water or land, two methods have been applied on those images to measure the surface areas at different times a) drawing polygons according to experience and visual differentiation of land and water covered areas; b) using supervised classification to extract the water surfaces in a reproducible manner (GÖRNER et al., 2005). Both techniques produce comparable outcomes, and were used for further analysis (e.g. Fig. 4b). However, due a similar spectral signature of a basalt flow at the northern shore and the regions of shallow water, the latter method turned always out to yield smaller surface areas. This time series shows that Beseka's surface area roughly quadrupled from 1973 (11 km²) to 2002 (41 km²) and that the alignment of faults does control the lake's expansion.

Bathymetric data of the lake floor have been collected using the Eagle Echolot Strata 128 and a GPS hand set. From these 3500 points a DEM of the current lake floor has been created by means of discrete smooth interpolation (MALLETT, 2002). The striking similarity in shape between the DEM-derived lake surfaces and the areas obtained from satellite scenes evidences the accuracy of the bathymetric DEM. Previous and present day volume as well as their appropriate surface areas have been calculated using the bathymetric DEM and a record of water level heights supplied by the Ethiopian Meteorological Service Agency. The different stages of the lake growth were chosen to match the acquisition dates of the available satellite images. Assuming that the impact of sediment deposition and erosion within this rather short time span is negligible, a comparison between those calculated areas and the surface areas measured from satellite scenes indicates that the lake might have deepened within the past three decades (Fig. 4 b).

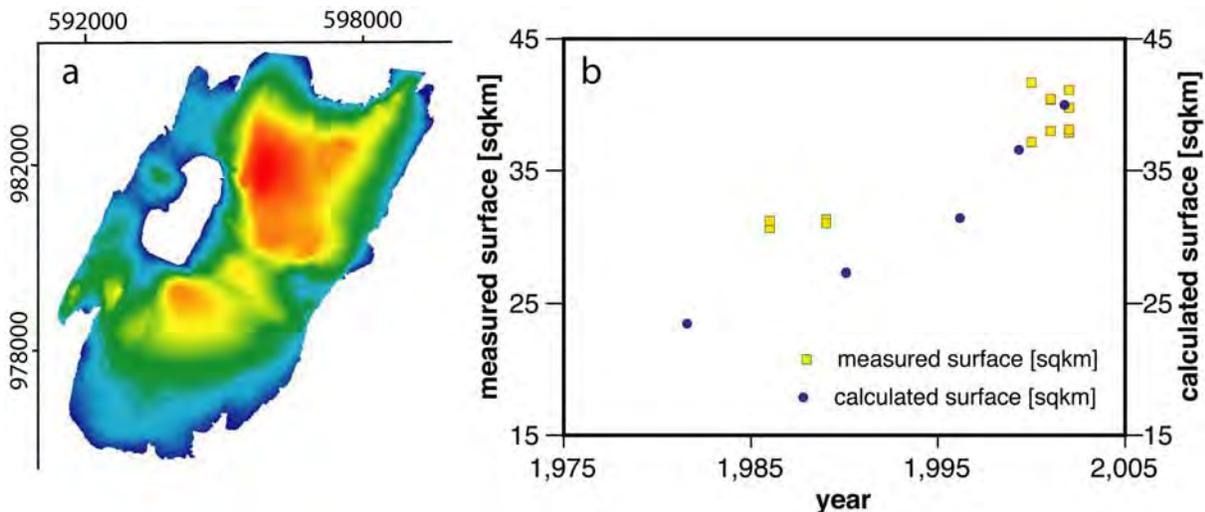


Fig. 4: (a) DEM of the lake floor. red: 12 m, dark blue: 0 m. (b) comparison of calculated and measured surfaces

For measuring the lake's surface temperature from Landsat 5 data, spectral radiances were converted into satellite brightness temperature using a formula similar to the Planck equation with two free parameters:

$$T_B = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L} + 1\right)} \quad (1)$$

where L is the at satellite radiance for a temperature, T_B , integrated over the TM band-6, and K_1 and K_2 are two free parameters with the values of $K_1 = 4.127 \text{ mWcm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$, $K_2 = 1274.7 \text{ K}$.

L has been calculated as follows:

$$L = \text{gain} \cdot \text{DN} \cdot \text{bias} \quad (2)$$

gain... $0.00563 \mu\text{m}^{-1}$, band specific, provided in header file

bias... $0.124 \text{ mWcm}^{-2}\text{sr}^{-1}$, band specific, provided in header file

Such temperature measurements (Fig. 5a) show no influence from the plantations (irrigation with relatively cold water, $T=28^\circ\text{C}$) and an increase towards the southwestern shore where the hot springs are located. Temperature is substantially decreasing toward the eastern shore. The superficial temperature distribution is not correlated with water depth, since the shallow southern parts exhibit the same temperature as the deepest areas in the centre of the lake. In order to check the surface temperature's seasonality more scenes captured during the rainy season and the dry season have to be analysed.

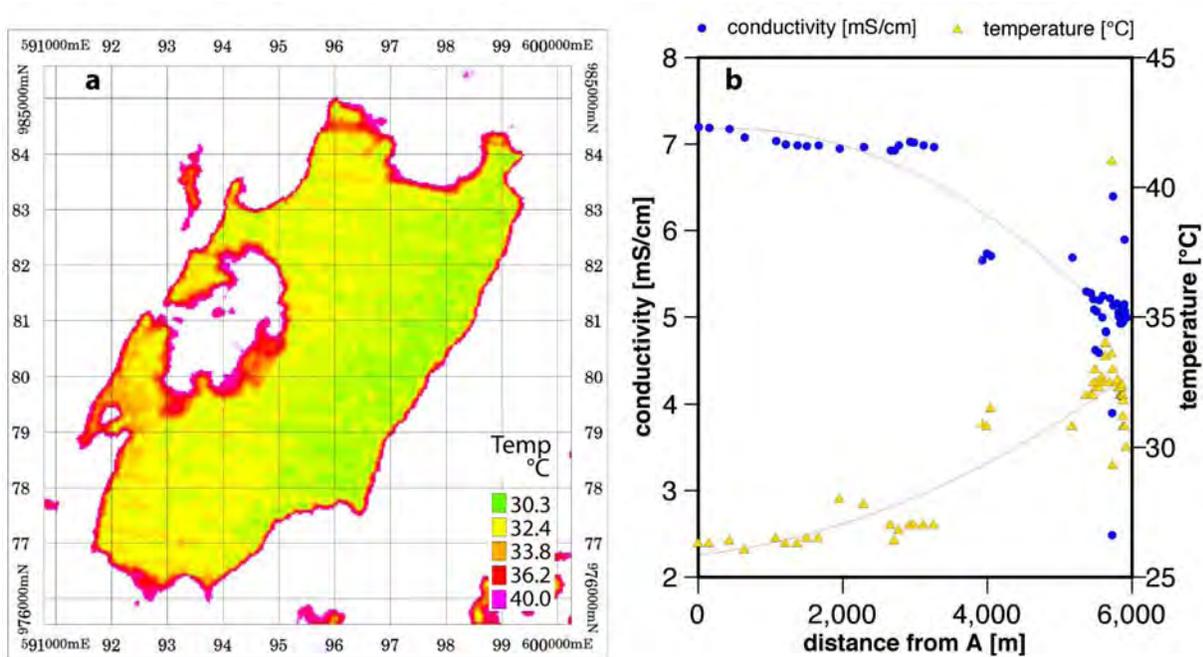


Fig. 5: (a) temperature distribution on the lake surface obtained from Landsat TM (1989). (b) in-situ profile taken at the western shore (see Fig. 1, AB).

Furthermore, a northwest profile in in-situ measurements close to the western shore (Fig. 1b+5b) shows a sharp decline in electrical conductivity and simultaneously an increase of temperature towards the hot springs.

The hot springs represent the inflow, which influences the physical properties of the lake water the most. This fits the coarse potentiometric groundwater maps of TESSEMA (1998) and ENGIDA & RUSSOM (2004) that indicate a groundwater flow into Lake Beseka from the east as well.

Hydrochemical modelling also supports this result. After evaporation has been simulated (PARKHURST & APPELO, 1999) on the water samples collected at the hot springs, they resembled the average lake water in composition.

Conclusion

Our data show, that meteorological variations and irrigation cannot explain the water level increase. The analysis of remote sensing data proved to be essential to address the temporal fluctuations of the lake's surface area and the spatial distribution of its temperature as well as for the characterisation of the catchment. According to all our results, the lake is strongly associated to the structure of the rift. Fault analysis, seismicity, 3D-models indicate a deepening of the basin. The watershed, the drainage system and the hot springs are influenced as well. We propose that recent tectonic activity has modified the shallow structure of the basin, modified the hydrological system and thus triggered the growth of Lake Beseka.

References

- AYENEW, T., 2004: Environmental implications of changes in the levels of lakes in the Ethiopian Rift since 1970. *Reg. Environ. Change*, Springer-Verlag, 192-204.
- AYENEW, T., 1998: The hydrogeological system of the Lake District basin. Central Main Ethiopian Rift. PhD thesis, Free University of Amsterdam, The Netherlands, 259.
- BEKELE, S., 2001: Investigation of water resources aimed at multi-objective development with respect to limited data situation: The case of the Abaya-Chamo basin, Ethiopia. *Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik, Wasserbauliche Mitteilungen*, 19. Dresden.
- CASEY, M., GLOAGUEN, R. & EBINGER, C., 2005: Extension by dyke intrusion and faulting in Ethiopian Rift Segment. submitted 15/04 to *Geol. Soc. London Spec. Pub.*
- EBINGER, C.J. & CASEY, M., 2001: Continental breakup in magmatic provinces: An Ethiopian example. *Geology*, 29, 527–530.
- ENGIDA, Z.A. & RUSSOM, G.E., 2004: Determination for the Cause of Rising Water levels in Lake Beseka and design of remedial measure.
- GÖRNER, A., JOLIE, E. & GLOAGUEN, R., 2005: Tectonic induced growth of Lake Beseka (Main Ethiopian Rift)?. *EGU Conference, Vienna (EGU05-A-00957)*
- HALCROW & PARTNERS, 1979: Master plan for the development of the surface water resources in the Awash basin, vol. 6. Ministry of Water Resources, Addis Ababa, Ethiopia.
- JENSON, S.K. & DOMINGUE, J.O., 1988: Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 54, No. 11, 1593-1600.
- KEIR, D., EBINGER, C., STUART, G., DALY, E. & AYELE, A., 2005: Strain accommodation by

- magmatism and faulting as rifting proceeds to breakup: Seismicity of the northern Ethiopian rift. submitted to J. Geophys. Res.
- KERANEN, K., KLEMPERER, S., GLOAGUEN, R. & EAGLE Working Group, 2004: Imaging a proto- ridge axis in the Main Ethiopian rift. *Geology*, 39, 949-952.
- KURZ, T., GLOAGUEN, R., EBINGER, C., CASEY, M. & ABEBE, B., 2005: Deformation distribution and type in the Main Ethiopian Rift (MER); a remote sensing study, submitted 03/05 to J. Afr. Earth Sc.
- LAMB, A. L. et al., 2000: A 9000-year oxygen and carbon isotope record of hydrological change in a small Ethiopian crater lake. *The Holocene*, Hodder Arnold, 167-177.
- MALLET, J.-L., 2002: *Geomodelling*. Oxford University Press.
- MAMO, T. & GETANEH, E., 2003: The geology and surface hydrothermal alteration mapping of Fentale geothermal prospect, intern report of the Geological Survey of Ethiopia, Hydrogeology, Engineering Geology and Geothermal Department, 29 p.
- MWR, 1998: Study of Lake Beseka (Inception Report, Vol. 1). Ministry of Water Resources, Addis Ababa, Ethiopia.
- MWR, 1999: Study of Lake Beseka (Main Report, Vol. 1). Ministry of Water Resources, Addis Ababa, Ethiopia, 203.
- PARKHURST, D.L. & APPELO, C.A.J., 1999: User's guide to PHREEQC (Version 2)—A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 99-4259, 310 p.
- SELESHI, Y. & ZANKE, U., 2004: Recent changes in rainfall and rainy days in Ethiopia. *Int. J. Climatology* 24: 973-983.
- TESSEMA, Z., 1998: Hydrochemical and water balance approach in the study of high water level rise of Lake Beseka. MSc. Thesis, University of Birmingham, UK, 90.
- FAO – land and water development division:
<http://www.fao.org/ag/agl/aglw/aquastat/countries/ethiopia/index.stm> (version 2005)

Geo-ecology of the Lake Urema / Central Mozambique

BEATE BÖHME¹, FRANZISKA STEINBRUCH², RICHARD GLOAGUEN³,
BRODER MERKEL⁴ & HERMANN HEILMEIER⁵

Summary: Lake Urema is one of the most important ecological features of the Gorongosa National Park, located in the East African Rift (Central Mozambique). The understanding of the geo-ecology of the lake is particularly important for the conservation of its floodplain habitats. There were recent concerns that Lake Urema has changed during the last years. We applied a multi-temporal and multi-disciplinary approach to investigate the dynamics and control mechanisms of the lake. Principal methods comprised remote sensing analyses of time series of Landsat and ASTER data, geomorphological interpretations of SRTM data as well as field investigations such as analyses of water quality, sediment composition and vegetation mapping.

The waters of Lake Urema have a low mineralization with an average pH value of 7.4. Two types of sediments were distinguished. The first type, which is spatially dominant, has a pure clay texture which is dominated by kaolinite and smectite. The second type with a sandy texture is dominated by quartz, muscovite and plagioclase.

The results of the supervised classifications for the satellite images from 1979 to 2000 did not indicate a trend for the variations in lake size. The area of Lake Urema ranged from 17.4 km² (09/1995) to 25.1 km² (08/1979). A rainfall anomaly was responsible for the outstanding lake size in May 1997. Our investigations show that alluvial fans limit Urema basin from all sides and make Lake Urema a kind of “reservoir lake”.

1 Introduction

Lake Urema and its adjacent floodplains is located in Sofala Province / Central Mozambique (cf. Fig. 1). It is part of the Gorongosa National Park (5370 km², SWECO, 2004b) which is situated in the Urema Rift, at the southern end of the East African Rift System (EARS). To the west, the Bárúè Midlands, consisting of Precambrian granitic and migmatitic gneisses, rise to an altitude of 300 to 800 m a.s.l. Gorongosa Mountain, an isolated intrusive complex of micropegmatite and granite reaches up to 1863 m a.s.l. (GoGoGo peak) within the Midlands (EDIÇÃO DOS SERVIÇOS DE GEOLOGIA E MINAS, 1968). To the east of the Rift Valley, the Cheringoma Plateau (300 m a.s.l.) is built up by a sequence of Cretaceous to Pleistocene sandstones and limestones. The rift floor is covered with unconsolidated pleistocene to recent alluvial deposits.

¹Beate Böhme, Scheffelstraße 60, 09120 Chemnitz, e-mail: beate.boehme@student.tu-freiberg.de

²Franziska Steinbruch, Centro de Informação Geográfica, Universidade Católica de Moçambique, Rua Marquês do Soveral, 960, C. Postal 821, Beira, Moçambique, e-mail: gis.ucm@teledata.mz

³Prof. Dr. Richard Gloaguen, Institut für Geologie, Juniorprofessur für Fernerkundung, Technische Universität Bergakademie Freiberg, Bernhard von-Cotta-Strasse 2, 09599 Freiberg, e-mail: Richard.Gloaguen@geo.tu-freiberg.de

⁴Prof. Dr. Broder Merkel, Institut für Geologie, Lehrstuhl für Hydrogeologie, Technische Universität Bergakademie Freiberg, Gustav-Zeuner-Str. 12, 09599 Freiberg, e-mail: Broder.Merkel@geo.tu-freiberg.de

⁵PD Dr. Hermann Heilmeyer, Interdisziplinäres Ökologisches Zentrum, AG Biologie / Ökologie, Technische Universität Bergakademie Freiberg, Leipziger Str. 29, 09599 Freiberg, e-mail: Hermann.Heilmeyer@ioez.tu-freiberg.de

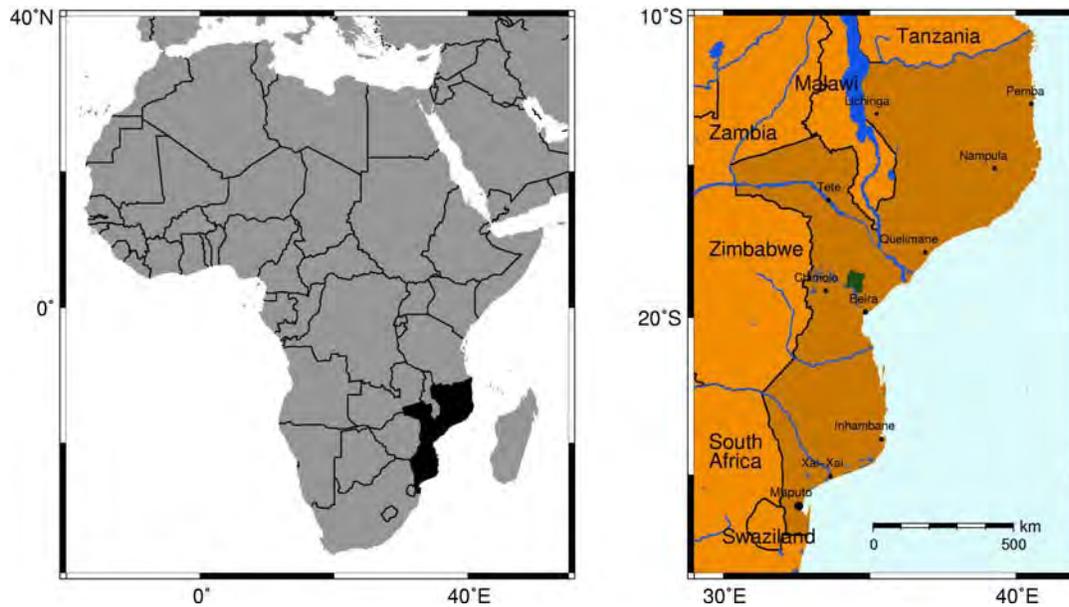


Fig. 1: Location of Gorongosa National Park (green in right figure) in Central Mozambique, Southeastern Africa.

Central Mozambique is influenced by the monsoon circulation and the impact of several El Niño/Southern Oscillation (ENSO) events, such as in 1982-83, 1986-87, 1991-92 and 1994-95 which lead to collateral droughts in Mozambique (EASTMAN et al., 1996). In 1997, an excess rainfall anomaly was reported (NOAA, 2004). A cold ENSO event in February 2000 triggered heavy floods in Mozambique (UCAR, 2004).

After Köppen Climate Classification System the study area is assigned to Wet-Dry Tropical Savanna Climates (Aw) with a moist, warm season from November to April and a cool, dry period from May to October (COBA). The climate station in Chitengo, situated in the Urema Rift, has an annual precipitation of about 900 mm (ARAC, 2004). An annual water deficit of 600-800 mm is given by global climate estimators (OWEN, 2004). In contrast, Gorongosa Mountain receives the largest annual precipitation (up to 2000 mm) due to orographic rainfalls (TINLEY, 1977). Between these two precipitation extremes are the Bárue Midlands and Cheringoma Plateau with 800-1200 mm and 1000-1400 mm respectively (OWEN, 2004).

The lake and its surrounding floodplains receive water from the rift escarpments to the east and to the west as well as from the floor of the Rift Valley (cf. Fig. 2). Vunduzi River, which originates in Gorongosa Mountain, is an important tributary during the dry season (TINLEY, 1977). The Urema River is the only outflow of Lake Urema and is draining into the Pungoe River.

This wetland ecosystem is an important, if not even the most important ecological feature in Gorongosa National Park, which was called the “jewel in the crown of Mozambique’s National Parks” prior to the civil war in Mozambique (1976-1992). Until then, Urema floodplains inhabited – at least periodically - a variety of wildlife comprising hippo, buffalo, elephant, wildebeest, zebra, waterbuck, impala, oribi, sable and eland (TINLEY, 1977). The population of hippopotami in Gorongosa National Park was decimated from about 2972 animals in 1968 to less than 50 animals counted in 2003 (SWECO, 2004b).

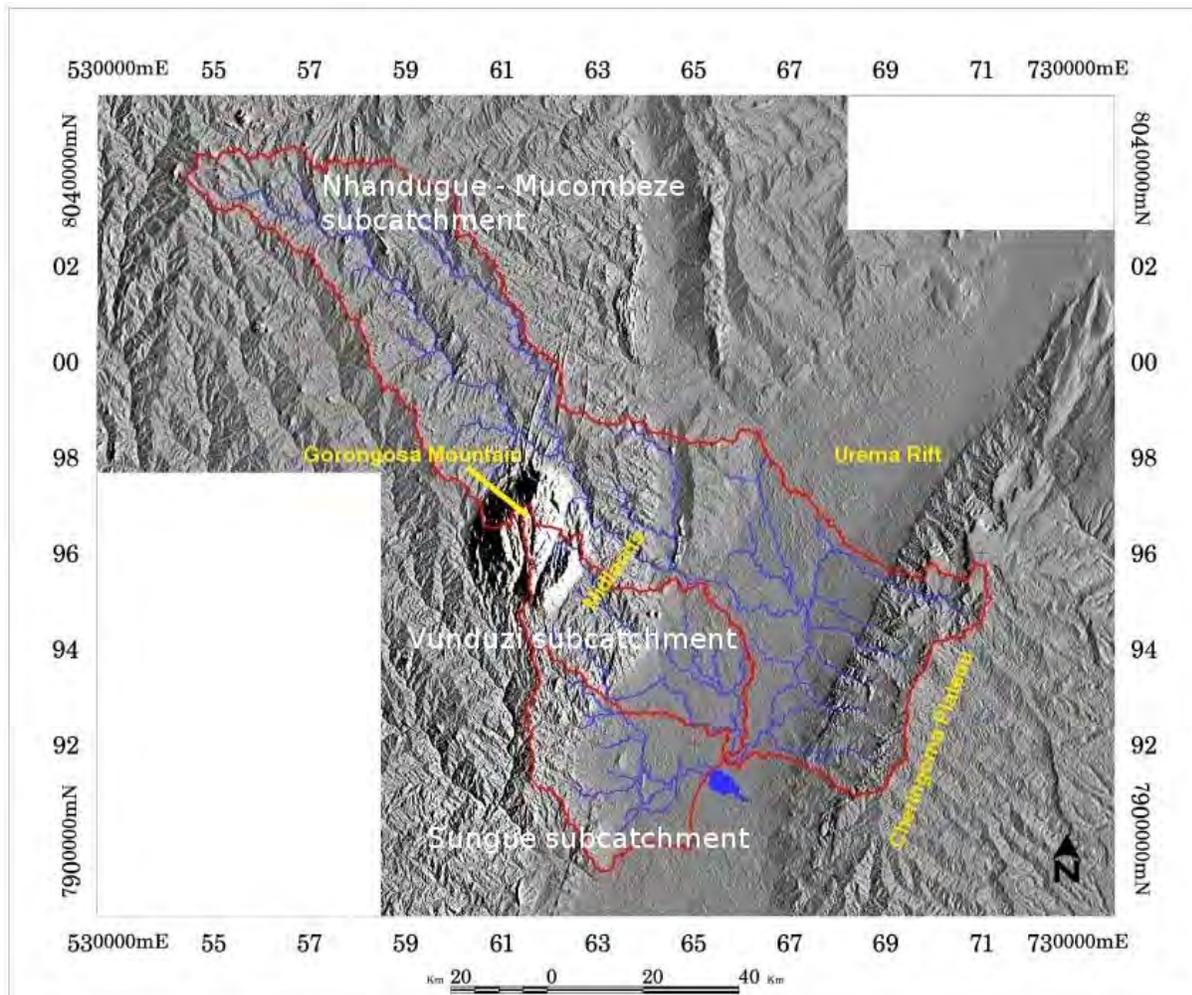


Fig. 2: Catchment of Lake Urema with subcatchments and drainage system as derived from SRTM data, sun elevation angle 30°, sun azimuth angle 90°.

There is a recent concern in the local park staff community that the extent of Lake Urema has decreased over the last decades. The consecutive drying out of its floodplain grasslands would then lead to bush encroachment in the floodplain grasslands with all its consequences for the ecosystem, e.g. a shift from grassland species towards savanna woodland species (TINLEY, 1977). BURLISON et al. (1977) attempted without success to solve the question whether a drying up of the area of Gorongosa National Park occurred. Another related concern deals with the possible sediment accumulation which would trigger the siltation of the lake. Reasons for such a development can be diverse: impacts of climate, neo-tectonical movements, morphology (MERCIER et al., 2002) and anthropogenic causes. The latter include land use changes in the catchment area (deforestation, flood regulation), and the near eradication of hippopotamus as a consequence of the civil war. Hippopotami play an important role in the maintenance of water flow through the creation of channel networks (TINLEY, 1977, MCCARTHY & ELLERY, 1998).

Since the comprehensive study of TINLEY in 1977, SWECO (2004a) dealt with the hydrological regime of the Pungoe River basin and OWEN (2004) of the Gorongosa Ecosystem. Nonetheless the hydrological regime of Lake Urema is still not fully understood.

We used an interdisciplinary and integrated approach to (a) figure out what is regulating the lake's hydrological regime (groundwater, surface water, morphology, tectonics), (b) to quantify the lake's size variations over the last 20 years and (c) to determine potential reasons for the assumed changes in the lake's system. Due to the poor knowledge on the lake's actual state, the first step was to characterize the hydrochemistry, the sedimentation and the vegetation during a field investigation in dry season 2004.

2 Methods

We measured water temperature, pH, electrical conductivity and redox potential at a nominal depth of about 20 cm. Additionally, secchi disk transparency and concentration of nitrate, ammonium, phosphate and sulphate were determined. Water samples for the laboratory analyses via ion-chromatography were taken in October 2004.

In order to describe the sedimentation pattern at Lake Urema we took five sediment samples to a depth of 0.3 m. The sampling was restricted to shallow sites at the southwestern shoreline as only a simple Polyacryl-core for manual coring was available. The grainsize distribution of the samples as well as their mineralogical composition were determined. For the latter, XRD (X-ray diffractometry) was utilized separately for the silt-clay fraction (less than 63 μm) and the sand fraction (63 to 2000 μm).

For ground control of the satellite image processings, the littoral vegetation was described along five vegetation transects. They represent that part of the lake which is most likely affected by lake level fluctuations.

Eleven satellite scenes from different sensor types were acquired for the period between 1979 and 2000 (Landsat MSS, TM, ETM+ and ASTER). They were used to describe the intra- and inter-annual extent of Lake Urema and the surrounding floodplain grasslands. Image analyses were conducted using PCI Geomatica V9.1.x. Preprocessing comprised geometrical and atmospheric correction (RICHTER, 2005). Gaps in the spectral coverage due to missing or not assignable bands limited the image interpretation. To distinguish open waters from floodplain grassland and surrounding savanna we used a Maximum Likelihood Classification with null classes and additional processes, such as PCA, NDVI and Tasseled-Cap-Transformation. Tasseled-Cap-Transformation proved to be a suitable instrument for the intra-annual comparison of vitality and vigor of the floodplain grasslands and therefore for the evaluation of areas under shifting water supply. We used ASTER SWIR and TIR and Landsat TIR for the estimation of the concentration of TSM (Total Suspended Matter).

A digital elevation model (SRTM = Shuttle Radar Topography Mission, USGS) with a horizontal resolution of 90 m x 90 m and a vertical resolution of 1 m was utilized for the description and interpretation of the morphology of the lake and its surroundings. We generated a DEM from ASTER data from October 2000. Although of a good relative quality, the ASTER DEM was too erroneous in the flat terrain of the rift valley floor for precise absolute height measurements (cf. Fig. 3). We extracted the drainage network and the catchment area of Lake Urema (JENSON & DOMINGUE, 1988) and selected river profiles.

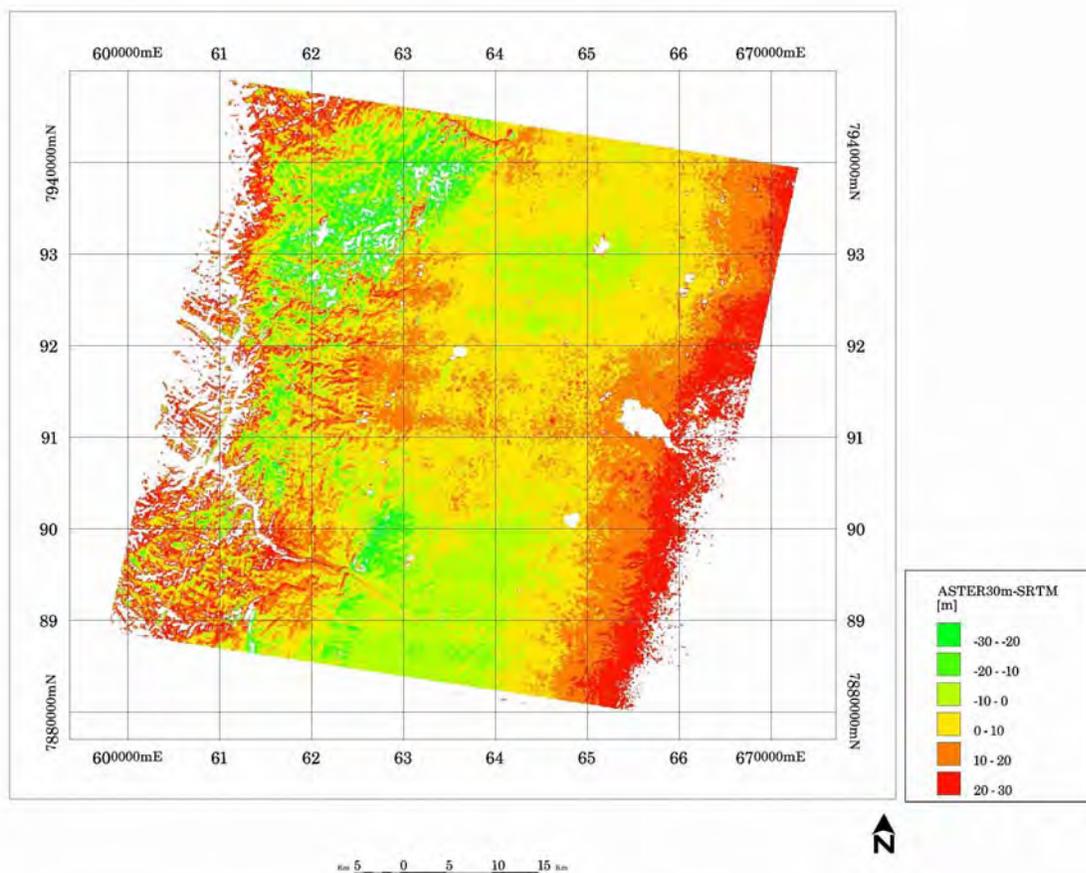


Fig. 3: Difference between DEM from ASTER 10/2000 (30 m x 30 m resolution) and SRTM data.

3 Results

3.1 Influences of tectonics

Analysis of earthquakes data from the Harvard Seismology CMT catalog (CMT, 2004) shows that earth tremors occur repeatedly in the rift and attests the tectonic activity (cf. Fig. 4). The Centroid Moment Tensor (CMT) focal mechanisms indicate an E-W extension of the Rift. In the vicinity of the lake four shallow earthquakes occurred in the 1980s. It is not known how far the seismicity has an impact on the lake and its catchment area, e.g. through changes in the flow regime.

3.2 Morphology from DEM and bathymetric measurements

The analysis of the digital elevation model demonstrated that the extent of Lake Urema is delimited by alluvial fans built up by rivers coming from the adjacent rift escarpments (cf. Fig. 5). Especially the Pungoe River in which Urema River drains, accumulated an extensive fan of about 47 km length which fills nearly completely the whole width of the valley floor. Only a small outlet of 500 m width and a depth of about 5 m is left serving as a bottleneck for the drainage from Lake Urema.

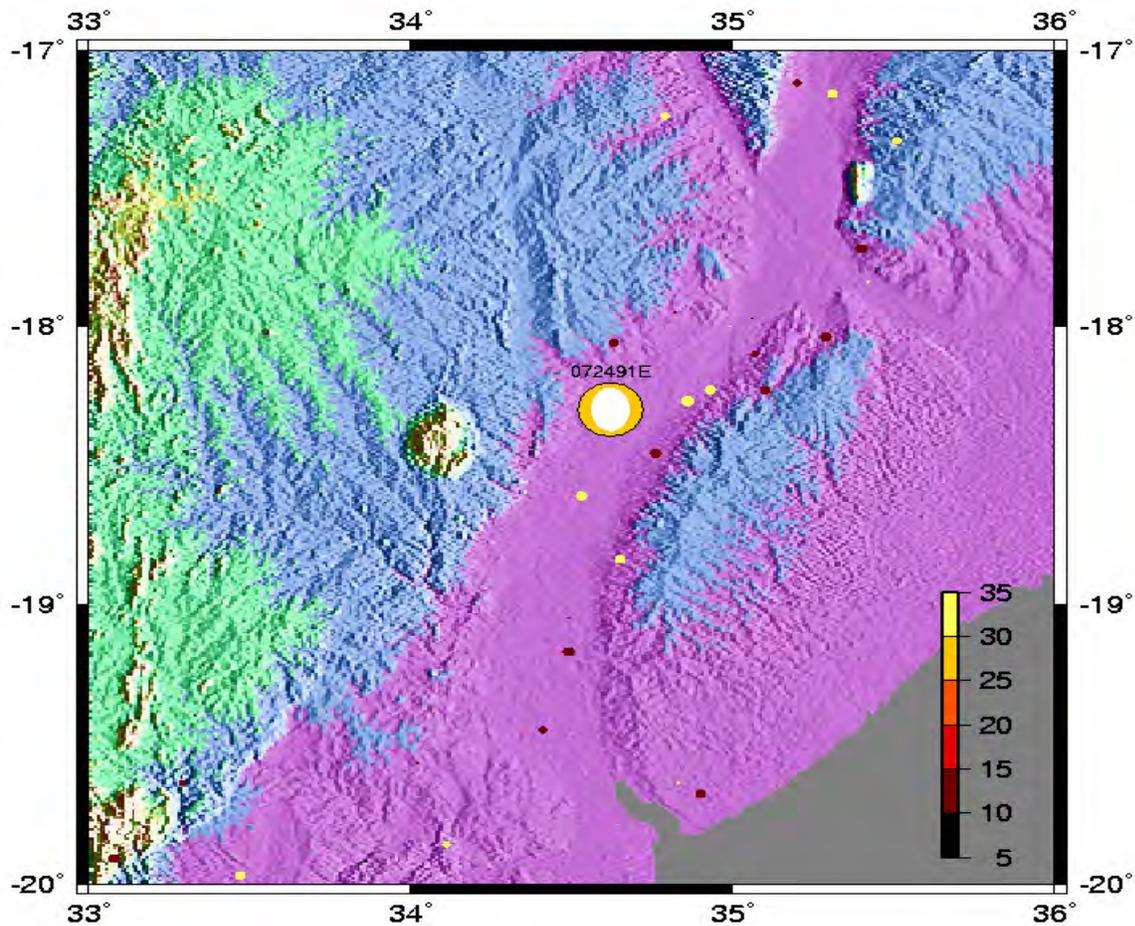


Fig. 4: Seismic activity in Urema Rift between 1973 and 2004, magnitude of earthquakes expressed by diameter of points, depth by point colour.

At least two major streams which enter the Urema Rift from the adjacent mountains have a clear drop in slope in their stream profiles as they enter the rift. We assume these knickpoints to be generated by the construction of the alluvial fans.

As there was no satellite image available for the dry season 2004, we measured the lake's contour using a GPS during the field work in October 2004. The resulting contour line was then compared with those extracted from the satellite images of the previous years. Consequently, it could be assumed that the lake's extent was similar to that of the 1990s-2000. Four depth profiles in the central part of the lake and in the narrowing lake arm were measured via sonar giving an average depth of 1.64 ± 0.13 m. Therewith, the water volume of Lake Urema in August-October 2004 can be estimated with $30.3 \cdot 10^6$ m³.

3.3 Changes over the last 20 years

Image processing (e.g classifications, NDVI) on the satellite data from 1979 to 2000 did not indicate any trend in the variation of the lake size. The average area of Lake Urema ranges from 17.4 km² in September 1995 to 25.1 km² in August 1979 (average size 20.5 ± 2.8 km²) (cf. Fig. 6).

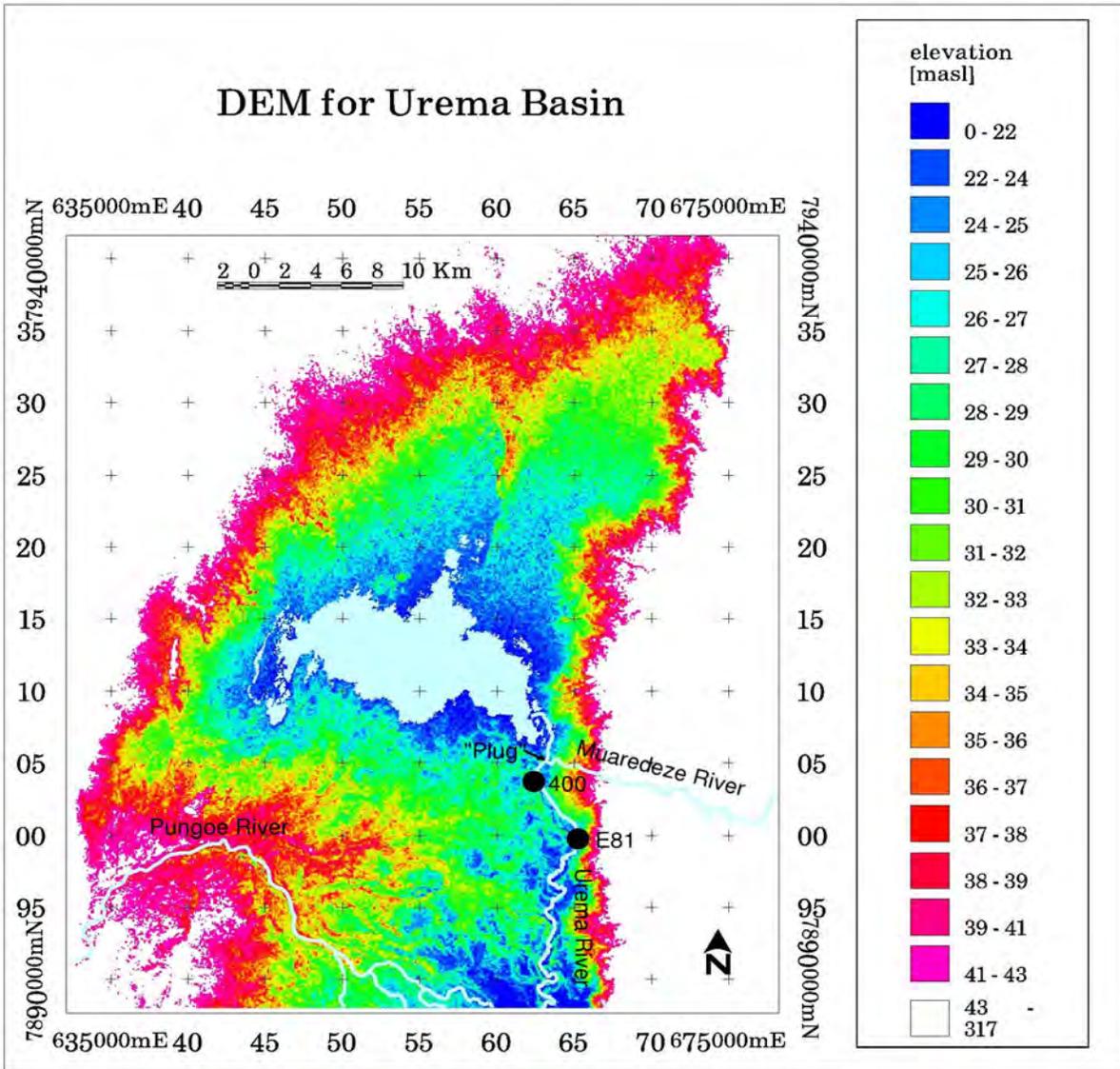


Fig. 5: Detail of Urema basin from SRTM data, with lake's extension of 05/1997.

The lake sizes from the Landsat TM scene from May 1997 as well as the lake size from the topographical map from 1960 (1:50 000) were excluded as outliers to avoid over- or underestimation of the lake extent: The lake size on the topographical map measured only 7.9 km² and is not trustworthy, whereas in 1997 the flooded area measured 104.1 km² and is associated to a temporary climatic event (see later for explanation). The intra-annual variations of the lake size in 1994, 1995 and 2000 are less than one square-kilometer.

Using the SRTM data and the extension of the lake in May 1997 we calculated the difference between the water volume of Lake Urema under normal conditions (such as in October 2000) and during extreme flooding in May 1997 to reach $248,9 \cdot 10^6 \text{ m}^3$. The annual precipitation in the catchment area accounts for $7258,3 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{y}$ (raw data from SWECO, 2004a). The difference in the lake's extent between October 2000 and May 1997 equals 49 percent of the mean annual runoff and 3% of the mean annual precipitation in the catchment area.

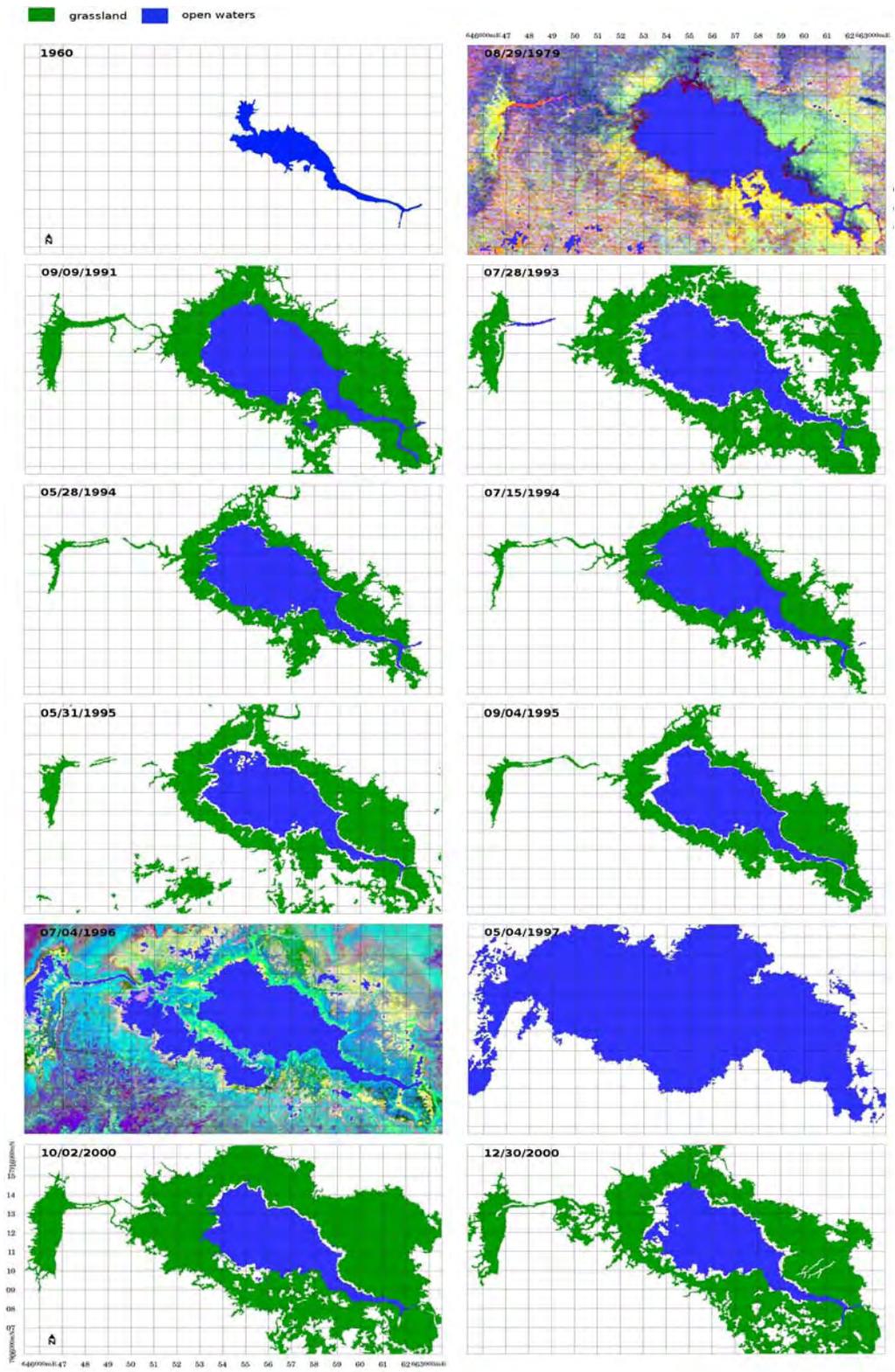


Fig. 6: Extent of Lake Urema and its adjacent floodplain grasslands from supervised classification and topographical maps.

3.4 Ecological responses of the lake and its floodplain between wet and dry season

We also used supervised classifications to map a stripe located between open water and floodplain grassland. This area represents parts where the lake is very shallow (swamps) and littoral vegetation migrates.

Tasseled-Cap-Transformations allow to interpret the spectral signatures of satellite imagery as Brightness, Greenness and Wetness (cf. Fig. 7). This information was used to track the ecological responses of the floodplain grasslands within a year. Four radiometric profiles were laid through the floodplain around Lake Urema and through the floodplain of one of its tributaries, the Sungue River.

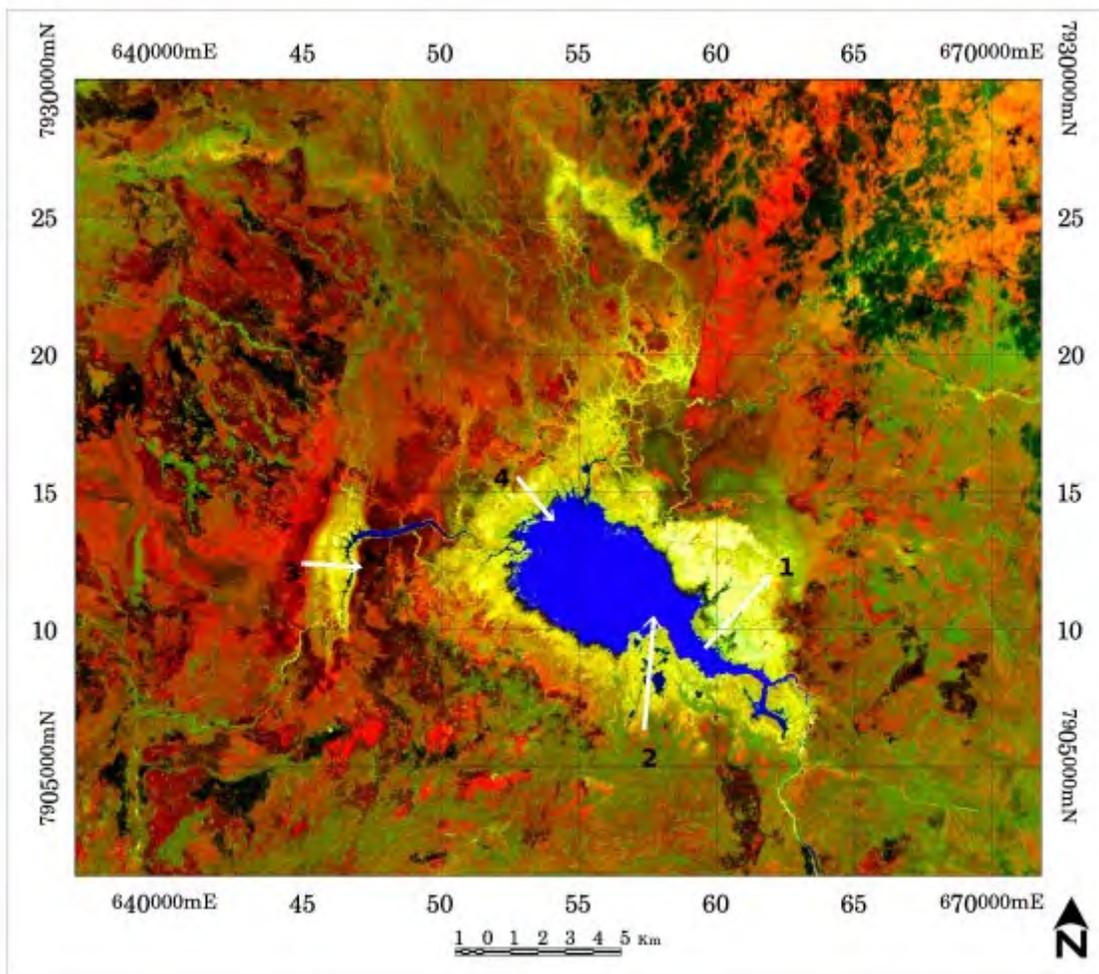


Fig. 7: Location of radiometric profiles in tasseled-cap-transformed images, background image from Landsat TM 05/28/1994, Brightness (red), Greenness (green) and Wetness (blue).

We observed that with the dry season proceeding, the greenness values decreased and the brightness increased (cf. Fig. 8). The inward progression of the shoreline of Lake Urema was clearly detectable by the sharp rise in the wetness profile. The zone, which then dries out is characterized by an increasing greenness-component, although with lower values than for the

adjacent sites before the dry season.

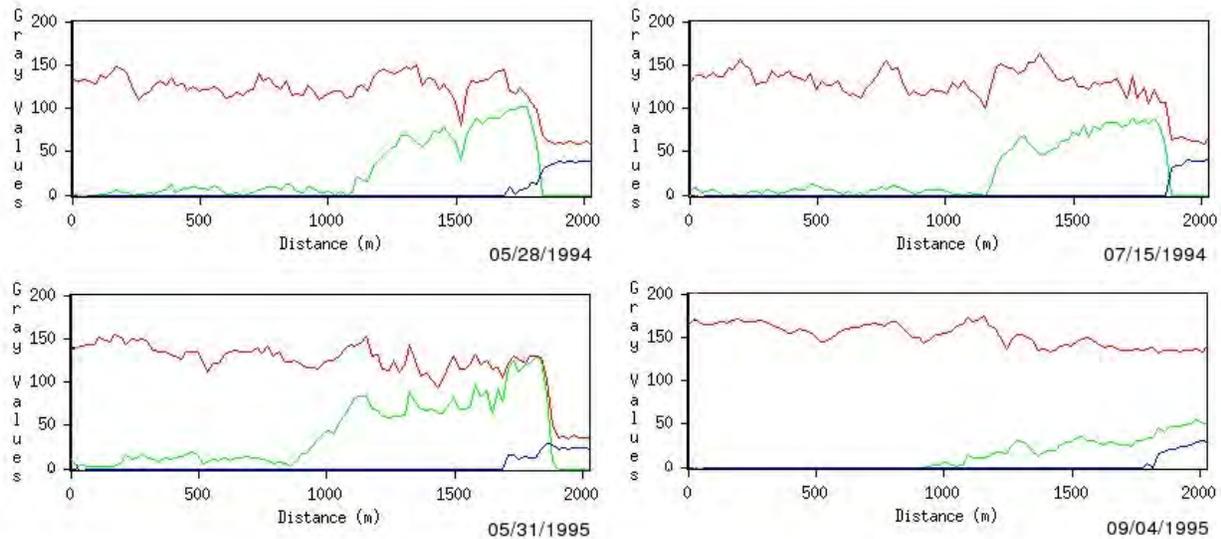


Fig. 8: Radiometric profile 1 through floodplain grassland of Lake Urema (1994 and 1995), Brightness (red)-Greenness (green)-Wetness (blue), lake is on right side of each image.

3.5 Quantitative and qualitative hydrology

Between September 4th and October 28th, 2004 the lake level height fell by 32 cm. We attempted to estimate the water balance of Lake Urema for that time. It is assumed that the fluctuation of the lake level height over the time is related to the change of the lake's water volume.

$$dV/dt = (R+P+G_i)-(D+E+G_o) \text{ Equation 1 (MERCIER, 2002)}$$

where:

- V = lake's volume
- t = period of change of lake's water volume
- R = rate of surface runoff
- P = rate of precipitation from the surface of the lake
- G_i = rate of incoming groundwater seepage
- D = discharge rate
- E = evaporation rate at the surface of the lake
- G_o = rate of outgoing groundwater seepage

Measurements of precipitation P were realized by the Administração Regional de Águas Centro, Beira, on the rift floor, approximately 18 km southwest of the lake. Rainfall events were noted only twice in the period from September to October (0.8 mm and 1.6 mm). There was no discharge D observed at Urema River; the water stagnated.

No information about in- and outcoming groundwater seepage were available. Therefore this parameter had to be discarded for the calculation of the water balance. For the estimation of the evaporation E from the lake surface, historical data from two pan A measurement stations in the Rift Valley at 18 km distance from the lake (1956/57-1969/70) and 10 km downstream at Urema

River (1958/59-1969/70) (COBA) were averaged. A discharge of 1.65 m³ in the Vunduzi River, a perennial tributary to Lake Urema originating in Gorongosa Mountain, was measured at about 60 km distance from the lake. After temporal interpolation of all water inputs and water losses, the lake level height should have raised by 0.14 m in the period from September to October. This indicates that a non negligible but yet to quantify amount of water is buffered in the system.

The pH of the surface water samples varied locally between 5.9 and 9.1 with the lowest values in areas with little water circulation or stagnant conditions such as in bays or close to the littoral. The majority of the measurements indicated slightly alkaline pH values. The electrical conductivity in Vunduzi River (32 µS/cm) was comparable to that of rainwater from Beira town (30 µS/cm) which is about 160 km away from the sampling site at Vunduzi River. The lake's average electrical conductivity was 144 µS/cm what is still very low. These values are in agreement with the measured low concentrations in major an- and cations. Sodium was the dominant cation, while hydrogen carbonate was the dominant negatively charged species. Macronutrients such as nitrate, ammonia, phosphate and sulphate were mostly below the detection limit. Measurements of redox potential indicated predominantly oxidizing to partly oxidizing conditions (on average 397 mV_h).

A striking characteristic of Lake Urema is its low secchi disk transparency which was on average 0.44 m. The lowest visibility was measured at the inflow region of the lake and in its central part while the water was more transparent in the outflow region.

3.6 Sediment analyses

According to local fishermen, the largest part of the lake basin is covered with very fine-grained sediments. We verified this assumption with five sediment cores. Three cores were dominated by a pure clay texture (grain size < 0.002 mm) or showed a layer of medium sandy clay over a layer of pure clay. The other two cores, located at the narrowing part of the lake, consisted of pure sand (dominant grain size 0.2-0.63 mm). The organic rich top layer was determined as gyttja, a coprogenous subhydric sediment containing inorganic precipitates, minerogenic matter and particulate organic matter (WETZEL, 2001).

4 Discussion and conclusion

The study showed that the interannual fluctuations of the lake extent – except of anomalous flood events – is rather small with a standard deviation of 2.8 km compared to an average extent of 20.5 km². The intra-annual variation was surprisingly small with less than 1 km². The sudden rise in lake level height and extent of Lake Urema in 1997 is probably linked with three tropical storms, which contributed to abundant rains over southeastern Africa during the 1996/97 wet season (NOAA, 2004).

Using the SRTM and ASTER DEM we showed that the design of the drainage system of Lake Urema is morphologically controlled. Lake Urema can be classified as a reservoir lake which – per definition (WETZEL, 2001) – owe their existence to an impounding structure, in this case the alluvial fans. Flooded river valleys are characterized by a narrow, elongated form and a shore line development (ratio of length of shoreline to length of circumference of a circle with the same area as the lake) clearly bigger than 2 (WETZEL, 2001). For Lake Urema this parameter is 3.1. As illustrated during an anomalous flood event in May 1997, these fans are both a morphological

barrier for the extension of the lake and a natural dam, controlling its outflow. At that time the lake's extent was five times bigger than on average (104.1 km² vs. 20.5 km²) and totally bounded by the fans structures.

The physical and chemical parameters of Lake Urema show a low mineralization of the lake waters preferentially indicating both the influence of low mineralized groundwaters (gneiss, granite, sandstones dominating in the catchment area) and/or the supply of surface waters in contact with unsoluble underground. The low concentration of dissolved minerals implies that the lake waters are not enriched by evaporation and must have a very short retention time although no water flow at Urema River was detected during the period of investigation.

The widespread distribution of clayey sediments over large parts of the lake and the evidence of sandy sediments in the narrowing part of the lake towards its outflow suggest a temporally and spatially constrained pattern of transport and deposition. The deposition configuration and types as well as the incised lake floor (showed by bathymetric profiles) concur with the hypothesis that the axial part of the lake is characterized by a more energetic flow and the lateral areas by quiescent conditions. The functioning of Lake Urema as a sediment trap is proved by the increasing transparency towards the lakes outflow as proven in situ using the secchi disk method.

The transects through the tasseled-cap-transformed images together with the results from the supervised classifications witnessed the response of the wetland ecosystem to proceeding drying of the floodplain grasslands towards the height of the dry season and therefore proved to be a valuable monitoring instrument.

The evaluation of time series over 20 years demonstrated that a disappearance of Lake Urema has not to be feared under current conditions. All the results from this integrated study showed, that the lake's extension and dynamics are controlled by morphological barriers buffering the drainage and in turn influence the whole surrounding ecosystem.

5 Outlook

Further work will focus on

- 1) the contribution of groundwater to the lake's water balance. Groundwater level measurements, chemical analyses as well as the use of stable isotopes ¹⁸O and ²H can help to separate the groundwater component from the surface water component and to correlate groundwater level fluctuations to variations in lake level height.
- 2) extensive analyses of lake waters both temporally and spatially. Especially the nutrient cycling in this lake with its high productive adjacent floodplain grasslands could be subject of further investigations. Water quality control, e.g. with respect to secchi disk transparency, suspended sediment, turbidity and surface chlorophyll, could be realized with the use of satellite imagery (e.g. NELLIS et al., 1998)
- 3) the improvement of the data base about the main climatological and hydrological parameters in the catchment area. The establishment of a lake level gauge would be helpful for further monitoring. Flow measurements at the major inflows and at the outflow of the lake are recommended.
- 4) turbidity measurements in the inflows during the year. We suppose that there is a

considerable difference between sediment load in dry season and wet season.

- 5) the distribution of sediment deposition. Extensive bathymetric measurements will provide precious information about whether a siltation of Lake Urema has to be feared.
- 6) time series of high resolution imagery/aerial photography. The role of hippopotami as ecosystem engineers in Gorongosa National Park, prior to their nearly eradication in the course of the civil war, was clearly detectable on historical (1972) aerial photographs. Up to date aerial photographs would additionally allow to extract high resolution DEM which could be compared with those extracted from historical aerial photographs. It could be verified whether morphological changes in the floodplain area and in the catchment area of Lake Urema occur, e.g. through seismic activity

6 Acknowledgement

The conductance of the field and laboratory work of this MSc. thesis was enabled by a cooperation of the Centro de Informação Geográfica, Universidade Católica de Moçambique (CIG UCM), Beira, Mozambique, the Technische Universität Bergakademie Freiberg, Germany and the Ministry of Tourism in its responsibility for the Gorongosa National Park in Sofala Province, Mozambique. The work in Mozambique was financially supported by the Deutscher Akademischer Austauschdienst e.V. (DAAD). Technical equipment as well as climate and hydrological data were provided by the Administração Regional de Águas Centro (ARAC). Satellite images were made available by CIG UCM. The organisation of logistics in Gorongosa National Park was supported by the parks administration.

7 References

- ADMINISTRAÇÃO REGIONAL DE ÁGUAS CENTRO (ARAC), 2004: spreadsheets with precipitation data of Chitengo.
- BURLISON, J., CARTER, J. & WILLIAMS, T., 1977: Report to the Ministry of Agriculture on an investigation into some of the Ecological problems of Gorongosa National Park. Centro de Ecologia, Instituto de Investigação Científica de Moçambique, Universidade Eduardo Mondlane, Maputo.
- COBA & PROFABRIL, undated: Esquema Geral da Bacia do Rio Pungoe. VI, Lisboa.
- EASTMAN, R.J., ANYAMBA, A. & RAMACHANDRAN, M., 1996: The Spatial Manifestation of ENSO Warm Phase Events in Southern Africa. - IDRISI GIS 96, Salzburger Geographische Materialien, 25.
- EDIÇÃO DOS SERVIÇOS DE GEOLOGIA E MINAS DA PROVINCIA DE MOÇAMBIQUE, LOURENÇO MARQUES, 1968: Carta Geológica, Escala 1 : 250 000, Folha (SUL-E-36)/Q, Grau Quadrado 1834, Vila Paiva de Andrada – Inhaminga, Portugal Província de Moçambique.
- EDIÇÃO DOS SERVIÇOS DE GEOLOGIA E MINAS DA PROVINCIA DE MOÇAMBIQUE, LOURENÇO MARQUES, 1968: Carta Geológica, Escala 1 : 250 000, Folha (SUL-E-36)/X, Grau Quadrado 1934, Beira – Vila Machado, Portugal Província de Moçambique.
- JENSON, S.K. & DOMINGUE, J.O., 1988: Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis. - Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 54 (11): pp. 1593-1600.
- MCCARTHY, T.S. & ELLERY, W.N., 1998: The Okavango Delta. - Trans. Roy. Soc. S. Afr., 53(2),

pp. 157-182.

- MERCIER, F., CAZENAVE, A. & MAHEU, C., 2002: Interannual lake level fluctuations (1993-1999) in Africa from ToPex/Poseidon: connections with ocean-atmosphere interactions over the Indian Ocean. - *Global and Planetary Changes* 32: pp. 141-163.
- NELLIS, M.D., HARRINGTON, J.A., & WU, J., 1998: Remote Sensing of temporal and spatial variations in pool size, suspended sediment, turbidity, and Secchi depth in Tuttle Creek Reservoir, Kansas: 1993. - *Geomorphology* 21: pp. 281-293.
- OWEN, R., 2004: The Millenium Ecosystem Assessment (MA). GM SAFMA Hydrogeology condition and trend report. Mineral Resources Centre, University of Zimbabwe.
- RICHTER, R., 2005: Atmospheric / Topographic Correction for Satellite Imagery (ATCOR-2/3 User Guide, Version 6.1). DLR – German Aerospace Center, Wessling.
- SWECO & ASSOCIATES, 2004a: Development of the Pungwe River Basin Joint Integrated Water Resouces Management Strategy – Monograph Report. Annex I Sector Study on: Surface Water Resources of the Pungwe River Basin. By order of: Government of the Republic of Mozambique, Government of the Republic of Zimbabwe, Swedish International Development Cooperation Agency (Sida).
- SWECO & ASSOCIATES, 2004b: Development of the Pungwe River Basin Joint Integrated Water Resouces Management Strategy – Monograph Report. Annex X Sector study on: Conservation Areas, Wildlife and Tourism. By order of: Government of the Republic of Mozambique, Government of the Republic of Zimbabwe, Swedish International Development Cooperation Agency (Sida).
- TINLEY, K.L., 1977: Framework of the Gorongosa Ecosystem. Ph.D. Thesis, Faculty of Science, University of Pretoria, South Africa.
- WETZEL, R.G., 2001: *Limnology: Lake and River Ecosystems*. 3rd edition, 1006 pp., Academic Press, San Diego.
- Internet sources:
- CMT, 2004: www.seismology.harvard.edu/CMTsearch.html
- NOAA, 2004: www.cpc.ncep.noaa.gov/products/assessments/assess_97/africa.html
- UCAR, 2004: www.isse.ucar.edu/un/mozambique.html

Erzeugung simulierter Bilddaten für die photogrammetrische Blockausgleichung am Beispiel von JBlock-Builder (JBB)

MICHAEL HOHM¹

Zusammenfassung: Mit dem Software-Programm JBlock-Builder werden Beobachtungsdaten für die Bündelblockausgleichung simuliert. Diese Daten bestehen vor allem aus Bildkoordinaten einer Flächenkamera. Die Daten werden nach Vorgabe einer Aufnahmeconfiguration und eines Fehlerbudgets von JBlock-Builder generiert. Das Programm ermöglicht den Test von Bündelblockausgleichungspaketen unter objektivierten Bedingungen. Das Software-Programm entstand im Rahmen einer Diplomarbeit an der Fachhochschule Neubrandenburg.

1 Einführung

Die rechnergestützte Aufnahmeplanung gewinnt immer mehr an Gewicht bei der Vorbereitung von größeren photogrammetrischen Projekten. Eine Simulation kann bei der Findung maximaler Wirtschaftlichkeit und Zuverlässigkeit hilfreich sein, indem verschiedene Standortkombinationen mit variierenden Kameraparametern getestet werden (KRAUS 1996, LUHMANN 2000).

Ein nicht zu übersehender Aspekt simulierter Bilddaten ist die kostengünstige, wenn nicht sogar kostenfreie Beschaffung von Datensätzen – beispielsweise für die Verwendung von Ausgleichungstests verschiedener Ausgleichungspakete. Mit der Simulation können ohne real durchgeführte Kampagnen Testdatensätze unterschiedlicher Konfigurationen erzeugt werden. Die Kenntnis über die definierte Aufnahmegeometrie erlaubt es möglicherweise sogar, Ergebnisse unterschiedlicher Ausgleichungen direkt miteinander zu vergleichen.

2 Simulation eines Bildverbandes (Block)

2.1 Objektmodell

Mit dem Ziel, die Bündelblockausgleichung zu optimieren, resultiert das in Abb. 1 dargestellte Simulationsmodell nach LUHMANN (2000).

Im Vergleich zu LUHMANN'S (2001) Modell soll hier ein Ansatz vorgestellt werden, bei dem im Objektmodell nicht nur die Objektkoordinaten und Geometriedaten enthalten sind, sondern auch gleich die komplette Kamerakonfiguration.

Zum Austausch der Informationen wird das einfache CAD-Format *VRML97* verwendet, das sowohl Geometrie- als auch Kameradaten aufnehmen kann und zu dem sehr leicht handhabbar ist.

¹ Dipl.-Ing. (FH) Michael Hohm, Reitbahnweg 81, 17034 Neubrandenburg, Kontakt: m.hohm@nbfoto.de – <http://jbb.nbfoto.de>

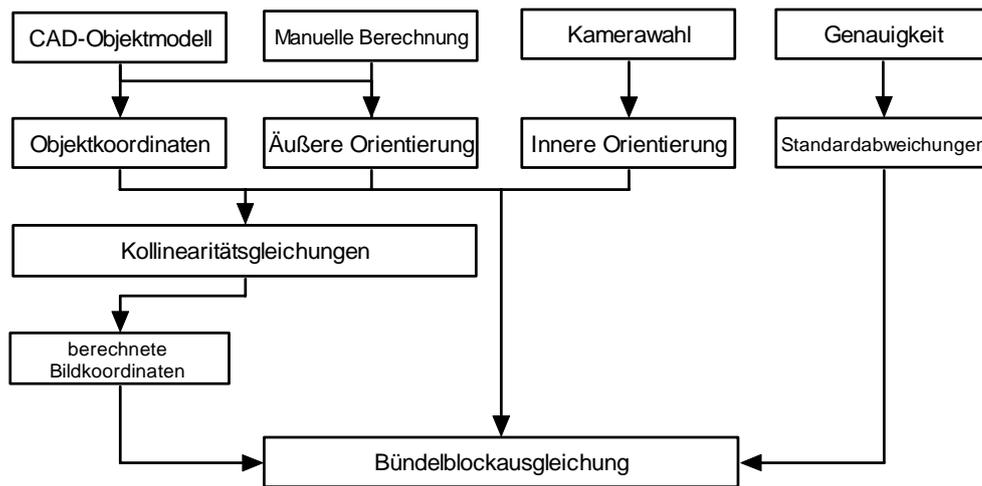


Abb. 1: Simulationsmodell

2.2 Kameramodell

Ein standardmäßiges Kameramodell, so wie es für die Simulation verwendet wird, umfasst die folgenden Parameter:

- Kamerakonstante: c'
- Hauptpunktlage: x_0', y_0'
- Verzeichnung: dr' bzw. anteilig dx', dy' (A_n, B_n, C_n)
- bildvariante Parameter: $\Delta x_i, \Delta y_i, \Delta c_i$

Die Beziehung zwischen den vorgegebenen Objektkoordinaten und den zu simulierenden Bildkoordinaten wird durch die Kollinearitätsgleichungen hergestellt.

Die Bildkoordinaten werden um die gesamten, globalen Verzeichnungsparameter (dx', dy') erweitert. Beim Einsatz von bildvarianten Parametern werden pro Bild drei weitere Parameter hinzugezogen ($\Delta x_i, \Delta y_i, \Delta c_i$), welche die Änderung des Bildhauptpunktes und der Kamera-konstanten während der Aufnahme beschreiben (TECKLENBURG & LUHMANN 2001).

$$x' = (x'_0 + \Delta x'_i) - (c + \Delta c_i) \cdot \frac{r_{11} \cdot (X - X_0) + r_{12} \cdot (Y - Y_0) + r_{13} \cdot (Z - Z_0)}{r_{31} \cdot (X - X_0) + r_{32} \cdot (Y - Y_0) + r_{33} \cdot (Z - Z_0)} + dx'$$

$$y' = (y'_0 + \Delta y'_i) - (c + \Delta c_i) \cdot \frac{r_{21} \cdot (X - X_0) + r_{22} \cdot (Y - Y_0) + r_{23} \cdot (Z - Z_0)}{r_{31} \cdot (X - X_0) + r_{32} \cdot (Y - Y_0) + r_{33} \cdot (Z - Z_0)} + dy'$$

i : Anzahl der Bilder

Mit dem dargestellten mathematischen Zusammenhang lassen sich zentralperspektivische Bilddaten einer Flächenkamera erzeugen.

3 Fehlermodell

Die Lagegenauigkeit eines Bildpunktes in der Abbildungsebene wird durch die Objektivverzeichnung beeinflusst. Typische Verzeichnungskurven von Messobjektiven weisen sowohl positive, als auch negative Verzeichnungswerte auf (Abb. 2).

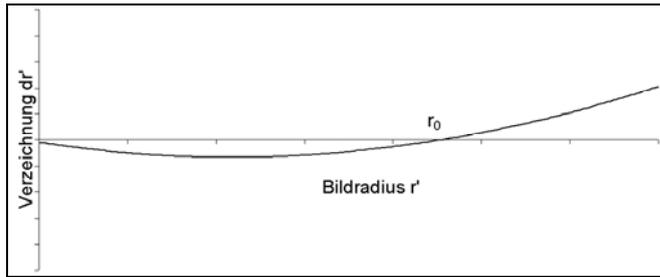


Abb. 2: Typische Verzeichnungskurve eines Objektivs

Im Diagramm ist der Verlauf der Verzeichnung dr' eines Messobjektives in Abhängigkeit vom Bildradius r' abgetragen. Man kann erkennen, dass die Verzeichnung bei etwa zwei Drittel des Radius den Nullabstand der radialen Objektivverzeichnung r_0 erreicht.

3.1.1 Radialsymmetrische Verzeichnung

Ursache für die Verschiebung der Bildpunkte entlang konzentrischer Kreise um den Bildhauptpunkt ist die unterschiedliche Vergrößerung der Linse in den Randbereichen. Jedes Objektiv besitzt seine eigene Charakteristik, die sich mit hinreichender Genauigkeit durch ein Polynom ungerader Potenzen des Bildradius beschreiben lässt:

$$\Delta r'_{rad} = A_1 \cdot r'^3 + A_2 \cdot r'^5 + A_3 \cdot r'^7 + \dots$$

Zur Vermeidung von numerischen Abhängigkeiten mit dem Bildmaßstab bzw. der Kamera-konstanten wird folgender, bereits umgeformten Ansatz vorgeschlagen (LUHMANN 2000):

$$\Delta r'_{rad} = A_1 \cdot r'^3 + A_2 \cdot r'^5 + A_3 \cdot r'^7 - r' \cdot (A_1 \cdot r_0^2 + A_2 \cdot r_0^4 + A_3 \cdot r_0^6)$$

Die Korrektur für die Bildkoordinaten ergibt sich anteilig nach:

$$\Delta x'_{rad} = x' \cdot \frac{\Delta r'_{rad}}{r'}$$

$$\Delta y'_{rad} = y' \cdot \frac{\Delta r'_{rad}}{r'}$$

3.1.2 Radial-asymmetrische und tangentielle Verzeichnung

Die radial-asymmetrische und tangentielle Verzeichnung wird vor allem durch die Dezentrierung der Linsen im Objektiv verursacht. Der Anteil an der Gesamtverzeichnung eines hochwertigen Objektivs ist deutlich geringer. Vernachlässigbar ist dies jedoch bei höheren Anforderungen nicht. Eine Formulierung dieser Anteile ist mit den zwei zusätzlichen Parametern B_1 und B_2 möglich:

$$\Delta x'_{tan} = B_1 \cdot (r'^2 + 2x'^2) + 2B_2 \cdot x' \cdot y'$$

$$\Delta y'_{tan} = B_2 \cdot (r'^2 + 2y'^2) + 2B_1 \cdot x' \cdot y'$$

3.1.3 Affinität und Scherung

Bei digitalen Aufnahmesystemen treten prinzipiell Unterschiede in Länge und Breite der im Bildspeicher abgelegten Bildelemente auf, die sich durch einen Affinitätsfaktor berücksichtigen lassen (LUHMANN 2000). Beide Effekte lassen sich wie folgt berücksichtigen:

$$\Delta x'_{aff} = C_1 \cdot x' + C_2 \cdot y'$$

$$\Delta y'_{aff} = 0$$

Der Wert in y -Richtung ist gleich Null, da sich die Affinität bei Film - auch bei digitalisiertem Film - erfahrungsgemäß nur in einer Richtung auswirkt.

3.1.4 Sonstige Fehlerquellen

Eine einfache Anpassung des Modells an eine Genauigkeitsobergrenze und an das mitunter auftretende Problem falsch zugeordneter Punktnummern kann durch Simulation von:

- Messunsicherheiten: Anbringen zufälliger Fehlerwerte einer bestimmten Größenordnung
- Punktverwechslung: zufälliges Vertauschen bestimmter Punktepaare nach gegebenem Erfahrungswert

erreicht werden.

3.2 Sichtbarkeitsproblematik

Neben der simplen Abbildung ist eine Methode heranzuziehen, die entscheidet, ob ein bestimmter Objektpunkt gerade durch die Oberfläche eines anderen Objekts verdeckt wird.

3.2.1 Strahlverfolgung und Verdeckung

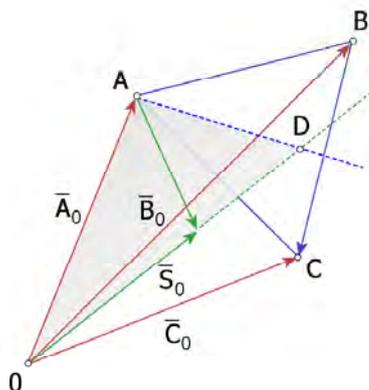


Abb. 3: RTI - parametrisch

Im einfachsten Fall soll der Schnittpunkt zwischen dem Richtungsvektor vom Kamerastandpunkt zum Objektpunkt und einer Dreiecksfläche bestimmt werden. Im Bereich der Computergrafik ist dieses häufig behandelte Problem unter dem Namen *Ray-Triangle Intersection Test* (RTI) wieder zu finden. Anhand einer einfachen Darstellung (Abb. 3) wird die Grundidee zur Lösung des Problems gezeigt.

Um festzustellen, ob der Durchstoßpunkt D des Vektors \vec{S}_0 innerhalb des Dreiecks ABC liegt, untersucht man den Schnitt der Vektoren $(\vec{S}_0 - \vec{A}_0)$ und $(\vec{C}_0 - \vec{B}_0)$. Aus der Beziehung der beiden Geradengleichungen :

$$\vec{A}_0 + t_1(\vec{S}_0 - \vec{A}_0) = \vec{B}_0 + t_2(\vec{C}_0 - \vec{B}_0)$$

erhält man die Geradenparameter t_1 und t_2 .

Aus geometrischen Gründen, die in der Abbildung ersichtlich sind, schneidet der Strahl \vec{S}_0 die Ebene ABC innerhalb der Dreieckseckpunkte, wenn $t_1 \geq 1$ und $0 \leq t_2 \leq 1$ gilt.

Für den Sichtbarkeitstest wird allerdings ein effizienterer Algorithmus von MÖLLER & TROMBORE (2004) verwendet; dieser liefert gleichzeitig die Koordinaten des Durchstoßpunktes.

3.2.2 Sichtfeld

Wegen des festen Öffnungswinkels der Kamera ist es aus rechentechnischer Sicht sinnvoll, nur jene Punkte des Objektmodells auf Verdeckungen zu überprüfen, die auch nur im Blickfeld der Kamera liegen, da der Sichtbarkeitstest mit zunehmender Flächenanzahl sehr rechenaufwendig ausfallen kann.

Der Öffnungswinkel bzw. das Blickvolumen der Kamera wird durch die Brennweite und die Größe der Apertur bestimmt. Mit Hilfe der Kollinearitätsgleichungen lassen sich die dreidimensionalen Objektpunkte in die Bildebene transformieren. Des Weiteren sind alle Punkte zu eliminieren, die außerhalb der Detektorfläche liegen.

Ein leicht zu übersehendes Problem der Kollinearitätsgleichungen besteht darin, dass auch Punkte abgebildet werden, die physikalisch hinter der Kamera liegen. Zur Kontrolle, ob ein Punkt tatsächlich vor oder hinter der Kamera liegt, wird das so genannte „z-clipping“ eingeschaltet.

3.2.3 Z-Clipping

Mit *z-clipping* ist das Ausschneiden von nicht sichtbaren Bereichen bzw. Punkten ab einem bestimmten Winkel gegenüber der Blickrichtung gemeint.

Es wird der Winkel (τ) zwischen dem Richtungsvektor vom Standpunkt des Betrachters zum Objektpunkt (P) und dem Vektor der Blickrichtung ($View$) berechnet. Alle Punkte, die außerhalb eines bestimmten Betrachtungswinkels liegen, werden ausgeschnitten bzw. ignoriert.

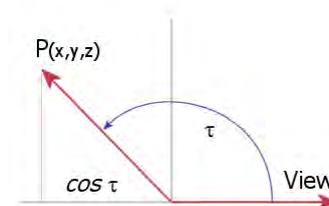


Abb. 4: Z-Clipping

Dieses Prinzip lässt sich mit Hilfe des Skalarprodukts realisieren:

$$View \bullet P = |View| \cdot |P| \cdot \cos \tau$$

wobei:

$View$: Blickrichtungsvektor der Kamera

P : Richtungsvektor vom Projektionszentrum zum Objektpunkt

τ : der Winkel zwischen den Vektoren $View$ und P

Damit lassen sich auch andere Winkel als 90 Grad für das Ausschneiden der Punkte einstellen.

4 Erzeugen eines Datensatzes mit JBlock-Builder

4.1 Voraussetzungen:

- Java Laufzeitumgebung (*Sun² JRE 1.4.2* oder höher)
- VRML97-Datei (auch VRML 2.0):
 - keine geometrischen „Primitiven“ (VRML-spezifische, höhere Grundobjekte), sondern:
 - nur „triangles“ (Aufbau der Geometrie nur aus Dreiecken)
 - möglichst keine verschachtelten „transform“-Knoten (Auswirkungen aufgrund der Einfachheit des Parsers z. T. unbekannt)
 - mindestens ein geometrischer Körper
 - mindestens ein Kameraknoten



```
#VRML V2.0 utf8          /*shortened for presentation*/
DEF Camera01 Viewpoint {
  fieldOfView 0.717558
  position 16.1854 2.31147 -15.9809
  orientation -0.018062402 -0.9988851 0.043616004 -2.35714
  description "Camera08"
}
...
DEF Box01 Transform {
  translation 0.475355 0.769688 -0.110119
  rotation 0.0 0.0 1.0 0.0
  scale 0.48 0.616 0.567
  children [
    Shape {
      ...
      geometry DEF Box01-FACES IndexedFaceSet {
        ...
        coord DEF Box01-COORD Coordinate {
          point [
            -7.87402 0.0 5.90551,
            7.87402 0.0 5.90551,
            -7.87402 0.0 -5.90551,
            7.87402 0.0 -5.90551,
            ...
          ]
        }
        coordIndex [
          0, 2, 3, -1,
          3, 1, 0, -1,
          4, 5, 7, -1,
          7, 6, 4, -1,
          ...
        ]
      }
    ]
  ]
}
```

Abb. 5: Objektmodell (3D-Ansicht und VRML Code-Fragment)

² Sun Microsystems Inc.

4.2 Anwendung

4.2.1 Übertragen der Geometriedaten und Interpretation des Modells

Wird beispielsweise eine Szene wie abgebildet erstellt, so werden beim Importieren die Eckpunkte als Objektpunkte interpretiert und aus den *Viewpoint*-Knoten werden vollständige Orientierungen modelliert. Die Flächen des Würfels werden für die Sichtbarkeitsberechnungen herangezogen.

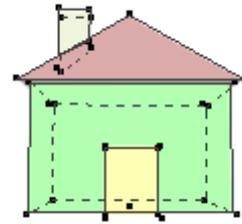


Abb. 6: Schematische Darstellung der frontalen Aufnahme

Die innere Orientierung einer Kamera ist durch das Austauschformat *VRML97* nur bedingt übertragbar. *VRML97* definiert nur den Öffnungswinkel (*fieldOfView*) der Kamera im *Viewpoint*-Knoten.

Zur Lösung wird die Größe des Aufnahmesensors extern übertragen - z.B. durch die Gestalt des Dateinamens: „*sim_flug01(240x240mm).wrl*“. Wobei die Angabe *240x240* die Größe des Sensors in *mm* bezeichnet. Die Größe wird beim Anlegen eines neuen Blocks in *JBlock-Builder* abgefragt.

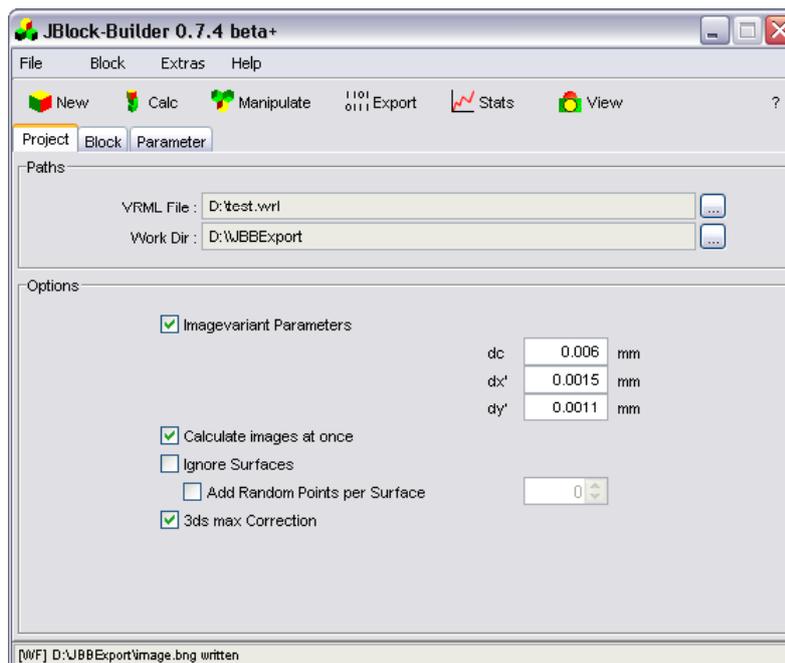


Abb. 7: JBB Fenster - Bildvariante Parameter vor dem Erzeugen eines neuen Block einstellen

Zu beachten ist, dass die Einstellungen der „*Imagevariant Parameters*“ nur beim Anlegen eines neuen Blocks berücksichtigt werden. Mit der Funktion „*Ignore Surfaces*“ besteht die Möglichkeit, die rechenintensive Strahlverfolgung auszuschalten. Dies macht insbesondere dann Sinn, wenn von der Aufnahmegeometrie her bekannt ist, dass keine Verdeckungen vorhanden sind.

Um die Anzahl der Verknüpfungspunkte zu erhöhen, können zufällige Punkte in den Dreiecksebenen hinzugefügt werden („*Add Random Points...*“). Diese Option ist allerdings mit

Bedacht anzuwenden, da die zu berechnenden Bildpunkte ein Vielfaches der gesamten Dreiecksflächen ausmachen. Wenn die Option „*Build Images at once*“ (Bilder sofort nach Blockerzeugung berechnen) nicht gesetzt ist, muss von Hand die Funktion „*Calc*“ aufgerufen werden, um die Bilddaten zu berechnen.

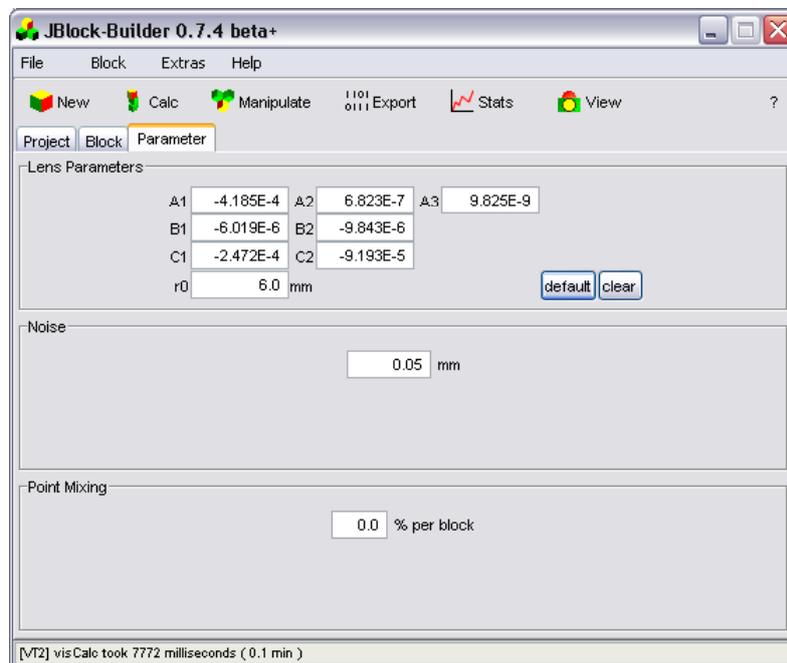


Abb. 8: Einstellungen für die Fehlereinflüsse

Im Abschnitt „*Parameter*“ werden die Koeffizienten der Verzeichnungspolynome eingetragen. „*Noise*“ entspricht einem maximalen Grundrauschen (allg. Messunsicherheit), das auf alle Bildkoordinaten angewendet wird. Zur Simulation von Punktverwechslung kann bei „*Point Mixing*“ ein prozentualer Wert eingetragen werden



Abb. 9: JBB Export Fenster

Das Anbringen der gesamten eingegebenen Parameter geschieht durch Auslösen der Funktion „*Manipulate*“. Dieser Vorgang kann mehrmals mit unterschiedlichen Einstellungen wiederholt werden.

Im „*JBB Export*“ Fenster sind ein oder mehrere Ausgabeformate auszuwählen, um die Daten in das Arbeitsverzeichnis zu exportieren.

4.2.2 Ergebnis

Nachfolgend ist auszugsweise die Ausgabedatei (im Format „*BINGO*“) für das obige Beispiel (Abb. 5) angezeigt. Zu erkennen sind die gemessenen Bildkoordinaten der Objektpunkte 1000-1035 in den Bildern 100 und 101 mit der jeweiligen Kamerakonfiguration 1.

```

* This file was generated by JBlock-Builder v0.7.4 beta+
* Fri Jun 17 11:11:49 CEST 2005
* Format Bingo
100
1001      -12.0636      -11.6633
1003       12.7665      -11.6630
1005      -11.7187       6.0561
1007       12.4016       6.0554
1017      -13.9839     -10.8132
1021      -13.8108      -3.1492
1032       0.2724      14.4039
1034      -13.6420       6.5398
1035       14.3412       6.5388
   -99       0.0000       0.0000
101
1000      -13.4553     -9.8794
1001       2.0566     -11.7538
1003      15.2539     -10.0437
1004     -13.2440       3.6351

```

Abb. 10: im BINGO Format erzeugte Bilddaten (Auszug)

4.3 Über JBB

Das Programm erlaubt die vielseitige Erzeugung von Bilddatensätzen einer virtuellen Konfiguration, die mittels *VRML97* eingelesen wird. Aus dem Datensatz wird ein Blockmodell erzeugt und die Bilddaten errechnet. Es können simuliert werden:

- Objektivfehler durch Verzeichnungsparameter
- Messunsicherheiten durch Unschärfeparameter
- Veränderung des Sensorsystems durch bildvariante Parameter

Für die Ausgabe der Bilddatensätze werden die folgenden Dateiformate unterstützt:

- *ALBANY*
- *BINGO*
- *BLUH*
- *PAT-B*
- *PAT-M*

Es besteht die Möglichkeit, die Blockkonfiguration innerhalb des Programms zu visualisieren. Dies ist aber bisher nur unter der erweiterten Java3D-Umgebung möglich.

JBB ist ein möglicher Ansatz zur Simulation von Bilddaten und befindet sich im Entwicklungsstadium. Ebenso erhebt *JBB* keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

Der Software ist *open source* und die Weiterentwicklung durch interessierte Programmierer erwünscht. Der Quellcode wird demnächst auf der Website des Autors veröffentlicht.

5 Literaturverzeichnis

- HOHM, M., 2004: Erzeugung simulierter Bilddaten für die photogrammetrische Blockausgleichung – Diplomarbeit. Fachhochschule Neubrandenburg.
- KRAUS, K., 1996: Photogrammetrie. Bd. 2 - Verfeinerte Methoden und Anwendungen. - 3. Aufl. - Bonn : Dümmler.
- LUHMANN, T., 2000: Nahbereichsphotogrammetrie : Grundlagen, Methoden und Anwendungen. Heidelberg : Wichmann.

MÖLLER, T. & TRUMBORE, B, 2004: Fast, Minimum Storage Ray-Triangle Intersection

<http://www.acm.org/jgt/papers/MollerTrumbore97>

KONNO, S., 2003: CyberX3D User's Guide.

TECKLENBURG, W. & LUHMANN, T., 2001: Kameramodellierung mit bildvarianten Parametern und Finiten Elementen. Publikationen der DGPF, Band 9.

VRML97, 1997 - The Virtual Reality Modelling Language: International Standard ISO/IEC 14772-1:1997.

Qualitätsstandards für photogrammetrische Produkte und deren Umsetzung

CHRISTOPH DÖRSTEL ¹, REINER SCHWEBEL ²

Zusammenfassung: In den Normen werden Begriffe der digitalen Photogrammetrie definiert, allgemeine Anforderungen an die Produkte und Systeme dargelegt und projektspezifische Eigenschaften und Parameter festgelegt. Großer Wert wird auf die praktische Anwendbarkeit der Normen gelegt und dem Anwender demnach eine flexible Festlegung spezieller Qualitätsanforderungen eingeräumt. Dabei können auch schon vorhandene Vorschriften der Norm miteinander kombiniert werden. Die Normenreihe bietet eine sichere Plattform zur Festlegung & Kontrolle von Produkteigenschaften und wird so den wachsenden Ansprüchen an Qualität gerecht.

Die Normenreihe DIN 18740, erarbeitet vom DIN Arbeitsausschuss 03.02 „Photogrammetrie und Fernerkundung“, definiert Qualitätsstandards für bildorientierte photogrammetrische Produkte. Nach der Veröffentlichung der Normen, „Anforderungen an Bildflug und analoges Luftbild“, „Anforderungen an das gescannte Luftbild“ und „Anforderungen an das Orthophoto“ werden zur Zeit Qualitätsstandards für digitale Luftbildkameras und damit erzeugte Bilder (18740-4 „Anforderungen an das digitale Luftbild“) erarbeitet. Die Anforderungen dazu werden im Folgenden erläutert.

1 Einleitung

Mit dem Übergang von der Analytischen zur digitalen Photogrammetrie haben digitale Bildprodukte eine zentrale Stellung erhalten. Dabei ist das digitale Ausgangsbild – abgeleitet durch Scannen aus dem analogen Photo oder direkt aufgenommen mit einer digitalen Kamera – maßgeblich für die Qualität der daraus abgeleiteten Produkte.

Die Festlegung von Qualitätskriterien und deren Absicherung ist eine zentrale Aufgabe der Normung. Deshalb hat sich der DIN Arbeitsausschuss „Photogrammetrie und Fernerkundung“ die Aufgabe gestellt, Qualitätsstandards für bildorientierte photogrammetrische Produkte der Luftbildphotogrammetrie zu entwickeln und die Umsetzung der Normen in die Praxis zu unterstützen.

Der Arbeitsausschuss vereint derzeit 13 Fachleute aus den Bereichen Forschung und Lehre, Wirtschaft und öffentlicher Dienst. Mit dieser Zusammensetzung wird der unterschiedlichen Interessenlage Rechnung getragen. Diese Zusammensetzung ermöglicht darüber hinaus den bei der Qualitätsnormung besonders wichtigen Konsens der interessierten Kreise.

2 Normenfamilie für photogrammetrische Produkte

Die Normenfamilie DIN 18740 „Photogrammetrische Produkte“ umfasst zurzeit die folgenden Teile:

- 18740-1 „Anforderungen an Bildflug und analoge Luftbilder“ (veröffentlicht 11/2001)
- 18740-2 „Anforderungen an das gescannte Luftbild“ (veröffentlicht 2/2005)
- 18740-3 „Anforderungen an das Orthophoto“ (veröffentlicht 10/2003)

und die in Vorbereitung befindliche Norm

18740-4 „Anforderungen an das digitale Luftbild“.

Die Normen enthalten sowohl Qualitätsaussagen zu den produzierenden Geräten (Kameras, Scanner) als auch den damit erzeugten Produkten. Die Normen selbst sind nach folgendem Schema aufgebaut:

Vorwort

- 1 Anwendungsbereich
- 2 Normative Verweisungen
- 3 Begriffe
- 4 Allgemeine Anforderungen
- 5 Prüfung

Anhang mit Formblatt zur Projektspezifizierung

Stichwortverzeichnis

In dem jeweiligen Abschnitt 3 werden wichtige Begriffe der digitalen Photogrammetrie definiert, die nicht in der Normenreihen DIN 18716 „Photogrammetrie und Fernerkundung“ zu finden sind. Die grundlegenden Anforderungen sind im Abschnitt 4 festgelegt und betreffen produzierende Systeme, Verfahren, die erzeugten Produkte und deren Dokumentation. Die projektspezifischen Anforderungen an das jeweilige Produkt sind als Formblatt im Anhang zusammengestellt und beinhalten Parameter und Eigenschaften des individuellen Projektes. Mit diesen Spezifikationen wird den Anwendern der Normen, also sowohl den Auftraggebern als auch den dienstleistenden Unternehmen der notwendige Spielraum in der Projektgestaltung gelassen und gleichzeitig die Gewissheit gegeben, alle für die Produktfestlegung notwendigen Parameter erfasst zu haben. Die Normenreihe bietet damit den Auftragnehmern und Auftraggebern eine neutrale und technisch fundierte Plattform zur Festlegung von Produkteigenschaften und deren Kontrolle und trägt somit wesentlich zur Qualitätssicherung bei.

3 Gesichtspunkte zu den einzelnen Normen

3.1 Bildflug und analoges Luftbild

Die 2001 veröffentlichte Norm (DIN, 2001) trägt der Tatsache Rechnung, dass auch heute noch der weitaus größte Teil der Luftbildaufnahmen mit analogen Reihenschlitzkameras durchgeführt wird. Im Hinblick auf die Probleme am Markt, auf die oftmals unvollständigen und unrealistischen Ausschreibungen und Angebote bei Bildflügen war eine Norm zur Qualitätssicherung von Bildflugprodukten überfällig. Zudem hängt die Qualität von Luftbildern entscheidend von der Qualität des analogen Bildes ab – was nicht im Bild enthalten ist, kann auch nicht herausgeholt werden.

Die Norm oder Auszüge aus ihr werden in der Praxis erfolgreich eingesetzt. Hier wird oftmals von der Möglichkeit Gebrauch gemacht, Teile der Normen zu kombinieren oder durch Anpassungen im „Formblatt zur Projektspezifizierung“ die Ausschreibungsunterlagen zu ergänzen.

3.2 Das digitale Orthophoto

Digitale Orthophotos werden heute in unterschiedlichen Fachgebieten und mit verschiedenen Ansprüchen eingesetzt. Bei topographisch orientierten Anwendungen spielt die geometrische Genauigkeit eine wesentliche Rolle, bei fernerkundlichen Anwendungen steht zum Beispiel die Bodenauflösung im Vordergrund. Der im Jahr 2003 veröffentlichten Norm „Anforderungen an das Orthophoto“ (DIN, 2003) liegt deshalb ein parametergesteuerter Ansatz zur Qualitätssicherung zu Grunde. Damit kann die Qualität von Orthophotos, Orthophotomosaiken und Orthophotokarten systematisch geplant und kontrolliert werden.

Ausgehend von den grundlegenden Parametern der Bodenauflösung und der geforderten Lagegenauigkeit des Orthophotos werden der Typ des Höhenmodells und Eigenschaften der Orthophotoprodukte festgelegt. Daraus lassen sich die Anforderungen an die Ausgangsdaten (Bild, Höhenmodell, Orientierung), die Verarbeitungsprozesse, die Ausgabe und die Prüfung der Geometrie und Radiometrie ableiten.

Die Wirksamkeit der vorgesehenen Prüfverfahren wurde durch Wiggenhagen und Wissmann (WIGGENHAGEN, 2003) eindrucksvoll nachgewiesen. Die projektspezifischen Festlegungen finden ihren Niederschlag in dem Formblatt „Spezifikation von Orthophotos“.

3.3 Das gescannte Luftbild

Das gescannte Luftbild hat im Produktionsprozess noch nicht an Bedeutung verloren und wird erwartungsgemäß auch während der nächsten Jahre noch weiterhin ein Hauptprodukt der Photogrammetrie sein (NEUMAN, 2004). Dafür sprechen zum einen die Verkaufszahlen neuer Scanner, die zwar deutlich abgeflacht aber immer noch signifikant sind, zum anderen aber auch die mit zunehmender Verfügbarkeit digitaler Kameras einhergehenden Erwartungen nach kurzen Lieferzeiten.

Die im Februar 2005 veröffentlichte Norm 18740-2 (DIN, 2005) gibt dem Nutzer ein passendes Werkzeug in die Hand die vertraglichen Rahmenbedingungen einer Ausschreibung oder eines Angebotes klar und eindeutig zu definieren. Die Norm gibt nicht nur Hilfestellung bei der Definition eines qualitativ hochwertigen Endproduktes, dem gescannten Bild, es hilft auch den eingesetzten Scanner bezüglich seiner geometrischen und radiometrischen Leistungsfähigkeit einzuordnen, um so die Erwartungshaltung an das zu liefernde Produkt realistisch zu gestalten (NEUMAN, 2005).

Neben der Klassifizierung des Scanners wurde besonderer Wert auf die Nachvollziehbarkeit der Leistungsfähigkeit gelegt. Nach der Norm ist hierzu als Instrument der Nachweis der geometrischen Kalibrierung sowie der radiometrischen Dynamik des Scanners vorgesehen. Durch Spezifikation des Scanprojektes nach DIN ist dieser Nachweis eine optionale Vereinbarung zwischen Auftraggeber und Auftragnehmer.

3.4 Anforderungen an das digitale Luftbild

Die Fertigstellung der Norm „Anforderungen an das digitale Luftbild“, DIN 18740-4 ist derzeitiger Fokus des Arbeitskreises. Der grundlegende Aufbau der Norm mit einer Evaluierung der bestehenden Technik und daraus abgeleitet den Anforderungen an:

- digitale Luftbildmesskameras
- Bildflüge

- digitale Luftbilder

wurde bereits auf der DGPF-Jahrestagung 2004 (DÖRSTEL, 2004) vorgestellt.

Der derzeitige Entwurf berücksichtigt die im Markt befindlichen zeilenbasierten und flächenbasierten Aufnahmesysteme. So wird hier auf den Unterschied des Bildwanderungsausgleiches eingegangen. Bei den flächenbasierten Kamerasystemen wird die Bildwanderung durch die TDI Technik (Time Delayed Integration) oder FMC (Forward Motion Kompensation) des gesamten Sensors ausgeglichen. Bei der Zeilenkamera wird Bewegungsunschärfe durch kurze Auslesezeiten kompensiert. Hier ist zu beachten, dass bei weniger guten Belichtungsverhältnissen die Belichtungszeit erhöht werden muss und damit die Fluggeschwindigkeit zu reduzieren ist, um die maximale Bildwanderung zu minimieren.

In diesem Entwurf wird besonderer Wert auf eine praxisgerechte Überprüfung der Kamerakalibrierung gelegt. Die Kalibrierung ist vom Kamerahersteller durch Zertifikat nachzuweisen und der Nutzer muss in die Lage versetzt werden, diese sporadisch überprüfen zu können. Damit ist dem Umstand Rechnung getragen, dass die Kalibrierung großformatiger digitaler Kameras in der Praxis aus 2 Teilschritten besteht.

Das ist zum einen die Herstellung der inneren Orientierung eines Kamerakopfes. Diese erfolgt im Allgemeinen durch eine Kollimatorkalibrierung und bestimmt die Verzeichnungsfunktion der Optik sowie die Bildhauptpunktlage. In einem 2. Schritt wird dann bei Mehrkamerasystemen die relative Lage der Kameraköpfe zueinander bestimmt oder beim Zeilensystem das Inertiale Messsystem (IMU) zur Bildebene in Beziehung gebracht. Zur Überprüfung der Kamerakalibrierung (Validierung) sieht der Entwurf 2 Möglichkeiten vor. Das ist zum einen die erneute Kalibrierung durch den Hersteller, oder aber eine Überprüfung der resultierenden Messgenauigkeit des Kamerasystems durch Vergleich von 2 Testfeldbefliegungen. Hierbei wird die Genauigkeit über dem gleichen Referenztestfeld direkt nach Auslieferung der Kamera (Referenzflug) mit einem erneuten Testflug (Validierungsflug) verglichen und dem Auftraggeber auf Verlangen anstatt eines Kalibrierprotokolls vorgelegt.

Die Einführung einer solchen Richtlinie ist sicherlich länderspezifisch. In USA zum Beispiel wird derzeit durch das USGS eine Vorgehensweise bevorzugt, die für behördliche Aufträge den Nachweis der Genauigkeit durch Überprüfung im Endprodukt vorsieht. In diesem Fall werden durch den Kamerabetreiber nach einer Testfeldbefliegung Orthophotos berechnet. Dazu liefert der Testfeldbetreiber, für das Stennis Testfeld ist dies die NASA, eine minimale Anzahl an Passpunkten und überprüft die bereitgestellten Orthophotos bezüglich Lagegenauigkeit und radiometrischen Eigenschaften.

Ähnliche Testfelder sind theoretisch auch in Deutschland vorhanden, wie etwa das durch die Universität Stuttgart betriebene Testfeld in Vaihingen an der Enz. Für die Überprüfung der Genauigkeiten sind jedoch ebenfalls die von den Kameraherstellern oder Firmen betriebenen Testfelder geeignet.

4 Zusammenfassung und Ausblick

In dem vorliegenden Dokument wird eine Reihe neuer, moderner Normen und Norm-Entwürfe, die für das Zeitalter der digitalen Photogrammetrie entwickelt wurden, vorgestellt. Hierbei wird durch Beschreibung der Besonderheiten das neue Normenwerk vertieft. So ist es dem DIN Arbeitsausschuss 03.02 während der letzten Jahre gelungen, das bestehende Nor-

menwerk zur Photogrammetrie und Fernerkundung an den neuen Bedürfnissen der Praxis auszurichten und die aktuellen technischen Entwicklungen mit neuen Normen zu begleiten.

Die weitere Arbeit des DIN Arbeitsausschusses wird sich schwerpunktmäßig mit der Offenlegung und finalen Verabschiedung der Norm „Anforderungen an das digitale Luftbild“ befassen sowie der neuen Normung von photogrammetrischen Teilprodukten widmen, die heute weitgehend aus „Software-Black-Box-Systemen“ abgeleitet werden. In Zukunft, so wird derzeit zusätzlich überlegt, soll das bestehende Normenwerk auf internationaler Ebene verstärkt bekannt gemacht und etabliert werden.

5 Literaturverzeichnis

- DIN, 2001: DIN 18740-1 Photogrammetrische Produkte – Teil 1: Anforderungen an Bildflug und analoges Luftbild - Beuth-Verlag, Berlin
- DIN, 2003: DIN 18740-3 Photogrammetrische Produkte – Teil 3: Anforderungen an das Orthophoto - Beuth-Verlag, Berlin
- DIN, 2005: DIN 18740-2 Photogrammetrische Produkte – Teil 2: Anforderungen an das gescannte Luftbild - Beuth-Verlag, Berlin
- DÖRSTEL, C., REULKE, R. & SCHWEBEL, R., 2004: Berücksichtigung digitaler Kameras im neuen Normentwurf E DIN 18740-4, DGPF Jahrestagung 2004, Halle.
- NEUMANN, K., 2005: Scannen von Luftbildern nach DIN 18740-2, DGPF Jahrestagung 2005, Rostock, noch zu veröffentlichen.
- NEUMANN, K. & SCHWEBEL, R., 2004: Normentwurf für gescannte Luftbilder, DGPF Jahrestagung 2005, Rostock
- WIGGENHAGEN, M. & WISSMANN, U., 2003: Untersuchungen zur Prüfung digitaler photogrammetrischer Produkte nach DIN 18740, DGPF Jahrestagung 2003, Bochum

Neues von ISO/TC 211 und vom Open Geospatial Consortium

WOLFGANG KRESSE¹

Abstract: This report summarizes the activities in International Standardization for photogrammetry and remote sensing between the annual DGPF-meetings in 2004 and 2005. The ISO/TC 211 as the official standardization body being responsible for geographic information made progress towards a completion of its suite of standards for imagery. The second Committee Draft of ISO 19130 "Sensor data models for imagery and gridded data" passed and is now likely to reach the final stages towards an International Standard.

The Open Geospatial Consortium focuses its discussion on the Sensor Web Enablement. A major part is the Sensor Model Language that is presently harmonized with the other OGC standards. GeoTIFF received an extension that fits the needs for the high resolution satellite images. That extension covers the "Rational Polynomial Coefficients" broadly used for georeferencing those images.

1 Einleitung

Über den Status der internationalen Normung und Standardisierung bezüglich Photogrammetrie und Fernerkundung wurde in der DGPF regelmäßig berichtet. Der hier vorgelegte Beitrag ist als Fortsetzung jener Berichte der vergangenen Jahre zu verstehen. Es wird dem Leser auffallen, dass im Vergleich zum letzten Jahr viele kleine Schritte gemacht, aber keine grundsätzlich neuen Projekte begonnen wurden. Die derzeitige Situation ist geradezu typisch für die langwierigen Anstrengungen bei der Erarbeitung von Normen und Standards.

Die offiziellen Normen werden von der ISO herausgegeben. Die Zuständigkeit für Geoinformatik einschließlich Photogrammetrie und Fernerkundung liegt beim ISO/TC 211. Daneben spielt das OGC eine herausragende Rolle, weil hier die wichtigsten Industriestandards für Geoinformatik herausgegeben werden. Bei GeoTIFF, einem der vielen in Gebrauch befindlichen Datenformate, ist eine Neuerung erwähnenswert.

2 Aktivität des ISO/TC 211

Viele Normen des ISO/TC 211 sind fertig und veröffentlicht. Sie beziehen sich vor allem auf Grundlegendes und Geoinformationssysteme. Heute ist das Interesse an den noch in Arbeit befindlichen Normungsprojekten für Bilddaten gestiegen. Diese Projekte sind innerhalb des ISO/TC 211 in der Working Group 6 (WG 6) mit dem Titel „Imagery“ zusammengefasst. Innerhalb der WG 6 werden zurzeit die folgenden Projekte behandelt. Die geplanten Zeiten der Fertigstellung und Veröffentlichung sind mit IS (International Standards) vermerkt.

ISO 19101-2 „Imagery reference model“, IS: Mai 2006

ISO 19115-2 „Metadata-Part 2: Metadata for imagery and gridded data“, IS: Oktober 2007

ISO 19123 „Coverage“, IS: Oktober 2005

ISO 19129 „Imagery, gridded and coverage data framework“, gelöscht

¹ Prof. Dr. Wolfgang Kresse, Fachhochschule Neubrandenburg, Postfach 110121, 17041 Neubrandenburg, Tel. 0395/5693-355, Fax 0395/5693-399, kresse@fh-nb.de

ISO 19130 „Sensor data models for imagery and gridded data“, IS: Mai 2007
ISO 19119 “Services”, Erweiterung für Bilddaten, Fertigstellungstermin offen
New Work Item Proposal „Calibration and Validation“
New Work Item Proposal “Encoding”

Die ISO 19101-2 war ursprünglich als Erweiterung zu der ISO 19101 gedacht. Da die ISO 19101-2 entworfen wurde, nachdem viele Erfahrungen mit der Modellierung von Geodaten in den anderen Normen der ISO 19100-Serie gesammelt worden waren, entstand ein Dokument, das deutlich besser strukturiert ist als die ältere Norm ISO 19101. Die Leitung der WG 6 hält es inzwischen für sinnvoller, das baldige Ende des verbindlichen fünfjährigen Aktualisierungszyklusses der ISO 19101 abzuwarten, um dann beide Referenzmodell-Normen zu einer zu verschmelzen. Es sollen dann noch konsequenter als bisher die Regeln zur Modellierung von verteilten Rechnersystemen (RM-ODP) in die Norm einfließen.

Die ISO 19115-2 ist als Ergänzung zu der ISO 19115 gedacht, und zwar für die Metadaten von Bild- und Rasterdaten. Die wichtigste Erfahrungsquelle für die neuen Metadatenelemente ist der Fernerkundungsstandard des FGDC (Federal Geographic Data Committee, USA). Ergänzende Vorschläge kamen aus Frankreich und Deutschland.

Seit dem Beginn der Arbeiten an der ISO 19115-2 wurde die Frage aufgeworfen, warum die für die Georeferenzierung erforderlichen Daten in einer eigenständigen Norm, nämlich der ISO 19130, behandelt und nicht als ein weiterer Typ von Metadaten in der ISO 19115-2 genormt würden. Das ISO/TC 211 hat sich entschieden, aus inhaltlichen Gründen die Eigenständigkeit der ISO 19130 zu belassen. Ein wesentlicher Teil der ISO 19130 sind die geometrischen Sensormodelle, auf die die „Metadaten der Georeferenzierung“ zu beziehen sind.

Die ISO 19130 wurde im Mai 2005 bei fünfzehn Ja- und zwei Neinstimmen als 2. Committee Draft bestätigt. Die beanstandeten Schwächen rühren vor allem von der fehlenden Expertise des Projektteams bezüglich SAR und InSAR. Auf diesem Feld hatten alle Bemühungen zur Motivation der Mitarbeit von Experten keinen Erfolg. Selbst die vielfältigen Kontakte zur ISPRS halfen nicht weiter. Wenn nicht noch im „letzten Augenblick“ Hilfe kommt, wird das Radar-Kapitel aus der Norm gestrichen.

Die verbleibenden Kommentare werden auf einem „Editing-Meeting“ im September 2005 beraten, so dass danach wahrscheinlich der Weg zum DIS (Draft International Standard) frei ist.

Die ISO 19119 wird erweitert, weil einige Services, die für Bilddaten und für Coverages erforderlich sind, bisher nicht enthalten sind.

Seit etwa zwei Jahren sind die beiden NWIPs (New Work Item Proposal) im Gespräch, die Kalibrierung und Validierung sowie allgemeine Regeln für Bilddatenformate normen sollen. Beide Projekte wurden erneut zurückgestellt. Im ersten Fall ist nach den Vorarbeiten der ISPRS (MORAIN et al., 2004) keine Weiterentwicklung zu vermerken. Offenbar ist das Themengebiet nicht weit genug entwickelt, so dass die Normung noch zu früh käme. Im zweiten Fall besteht eine andere Situation. In anderen ISO-Gremien, allen voran im ISO/IEC JTC1/SC 24 „Computer graphics and image processing“, wurden Bilddatenformate auf vielfältige Weise genormt, so dass für die Geoinformatik die Aufgabe entstanden ist, sich den bereits fertigen Normen anderer Fachgebiete anzupassen.

3 Aktivität des Open Geospatial Consortium (OGC)

Das Open Geospatial Consortium (OGC) hat die Themen der Photogrammetrie und Fernerkundung in dem großen Entwicklungskomplex „Sensor Web Enablement“ (SWE) angesiedelt. Dieser interessant klingende Name kann mit „Nutzung des Internets für die Übertragung von Sensordaten“ übersetzt werden. Das Konzept ist sehr allgemein angelegt und umfasst grundsätzlich alle Arten von Sensoren.

Neben den Sensoren der Photogrammetrie und Fernerkundung wird eine Vielzahl anderer Sensortypen angesprochen. Als Beispiele seien Wetterstationen, meereskundliche Messgeräte, Bauwerksüberwachungsgeräte und militärische Systeme genannt. Daher spielen die in-situ Sensoren, die ortsgebundene Messwerte liefern, im Sensor Web Enablement eine wichtige Rolle.

Die Aufgaben des Sensor Web Enablement lassen sich wie folgt charakterisieren:

- Internetweite Suche und Auswahl von geeigneten Sensoren für eine bestimmte Aufgabe (discover sensors).
- Zugriff auf die Messwerte und Beobachtungsdaten der Sensoren (access sensor observations).
- Auslesen der Daten in maschinenlesbaren und menschlich lesbaren Datenformaten (obtain sensor information).
- Übertragung von Mess- und Beobachtungsaufgaben an einzelne Sensoren (task sensors).
- Anforderung von automatisch ausgelösten Nachrichten beim Eintreten von vorher definierten Zuständen (receive alerts).

Die Einzelheiten des Sensor Web Enablement sind in einer Reihe von Standards festgeschrieben, die sich noch alle in der Entwicklungsphase befinden. Dieses charakterisiert deutlich die Vielschichtigkeit des Vorhabens.

Ein wichtiger Teil des SWE ist die Sensor Model Language (SensorML). Diese XML-basierte Beschreibungssprache für Fernerkundungs- und Wetterbeobachtungsaufgaben war ursprünglich eine Entwicklung im Auftrag der NASA. Seit das OGC diese Sprache als Basis für das SWE ausgewählt hat, wurde die SensorML erweitert und mit den anderen Standards des SWE harmonisiert. Die Harmonisierung der SensorML mit der ISO 19130 wird diskutiert, ist aber noch nicht realisiert.

Der OGC-Bericht „Observations and Measurements“ liefert eine umfassende XML-basierte Beschreibung für Beobachtungs- und Messdaten von Sensoren. Diese Festsetzungen sind eine Voraussetzung für einen reibungslosen Datenaustausch über Internet. Eng damit verknüpft ist ein OGC Recommendation Paper zum Thema „Units of Measure Use and Definition“.

Zum Betrieb des SWE hat das OGC eine Reihe von Diensten (services) definiert. Die wichtigsten sind

Sensor Collection Service
Sensor Planning Service
Web Notification Service

Der Sensor Collection Service bildet das Zwischenglied zwischen einem Sensor oder einer Gruppe von Sensoren und einem Datenarchiv (repository) und erlaubt eine näherungsweise Echtzeitspeicherung der beobachteten oder gemessenen Daten.

Der Sensor Planning Service ist ein Planungswerkzeug zur Entwicklung komplizierter Mess- und Beobachtungsaufgaben. Vor dem Einsatz der Sensoren können mit diesem Dienst das Antwort-Zeit-Verhalten, die Datenraten und andere für den späteren Einsatz wichtige Randbedingungen simuliert werden.

Der Web Notification Service erzeugt automatische Mitteilungen über Netz unter bestimmten Bedingungen. Dieser Dienst soll vor allem eine Selbststeuerung von asynchronen Sensorbeobachtungen ermöglichen.

4 GeoTIFF

GeoTIFF ist ein weit verbreitetes Datenformat zur Speicherung der Georeferenzierung von Orthophotos und Satellitenbildern. Seit etwa zehn Jahren gab es keine Änderungen dieses Datenformats. Jetzt macht die stark gestiegene Nutzung von hochauflösten Satellitenbildern eine Erweiterung von GeoTIFF erforderlich. Die Satellitenbilder werden nicht nur als Orthophotos abgegeben sondern auch in der Originalgeometrie, in der Regel ergänzt mit den Parametern, die die Georeferenzierung beschreiben.

Das Standardverfahren ist die Entzerrung mit gebrochen rationalen Polynomen. Die zugehörigen Parameter heißen „Rational Polynomial Coefficient“ (RPC). Für die vollständige Georeferenzierung einer Szene sind 4x20 RPCs und einige ergänzende Parameter erforderlich. Diese Daten werden künftig im Header des neuen GeoTIFF eingetragen. Dadurch können auch bei Messungen in Bildern mit Originalgeometrie Landeskoordinaten oder geographische Koordinaten ermittelt werden.

Die Erweiterung wird von den Satellitenbetreibern unterstützt, unter anderem von Space Imaging (Ikonos), Digital Globe (Quick Bird), OrbImage (OrbView3) und Spot Image.

Die 80 RPCs und die ergänzenden Parameter waren bisher in dem US-amerikanischen Datenformat NITF (National Imagery Transmission Format, sprich „nittif“) festgeschrieben. Dieses Format fand vor allem innerhalb der NATO Anwendung.

Die Erweiterung des GeoTIFF wurde auf dem Spring-Meeting 2005 der ASPRS diskutiert. Dabei gelang es, die RPCs nicht nur in GeoTIFF, sondern auch in SensorML und in der ISO 19130 einheitlich festzuschreiben.

5 Zusammenfassung

Der kleine Statusbericht konzentrierte sich auf die Arbeiten der WG 6 „Imagery“ im ISO/TC 211, auf das Sensor Web Enablement des OGC und auf die Erweiterung von GeoTIFF. Daneben gibt es sicherlich viele weitere Initiativen. Als Beispiele seien hier nur die ISPRS WG I/1 „Standards, validation and calibration“ und regionale Aktivitäten wie die Arbeiten des EuroSDR genannt.

Abschließend sei erwähnt, dass der Vorstand der ISPRS ein „Ad-hoc committee on standards“ als Beratungsgruppe eingerichtet hat. Diese Gruppe existiert seit dem Jahresbeginn

2005 und ist schon mehrfach tätig geworden, wenn es um die Beurteilung und Einordnung von Normungsaktivitäten ging.

6 Literaturverzeichnis

- BOBBITT, J. (2002): „Units of Measure Use and Definition Recommendations“, OpenGIS Recommendation Paper, version 0.9.1, OGC 02-007r4
- BOTTS, M. (2004): „Sensor Model Language (SensorML) for In-situ and Remote Sensors“, OpenGIS Implementation Specification, version 1.0.0 beta, OGC 04-019r2
- BOTTS, M. (2004): „Sensor Web Enablement“, OGC White Paper
- COX, S. (2003): “Observations and Measurements”, OpenGIS Discussion Paper, version 0.9.2, OGC 03-022r3
- FGDC (2002): Content Standard for Digital Geospatial Metadata: Extensions for Remote Sensing Metadata, FGDC-STD-012-2002, http://www.fgdc.gov/standards/status/csdgm_rs_ex.html
- GEO TIFF (2004): <http://www.remotesensing.org/geotiff/geotiff.html>
- KRESSE, W. & K. FADAIE (2004): “ISO Standards for Geographic Information“, Springer-Verlag
- MORAIN, S. & BUDGE, A.M., HRSG. (2004): “Post-Launch Calibration of Satellite Sensors”, ISPRS Book Series – Volume 2, Balkema-Verlag

Abkürzungen

- CD: Committee Draft (ISO-Begriff)
- DIS: Draft International Standard (ISO-Begriff)
- EuroSDR: European Spatial Data Research
- FDIS: Final Draft International Standard (ISO-Begriff)
- FGDC: Federal Geographic Data Committee, USA
- InSAR: Interferometric SAR
- ISO/IEC JTC1 SC24: International Organization for Standardization / International Electrotechnical Commission, Joint Technical Committee 1, Subcommittee 24 “Computer graphics and image processing“
- NITF: National Imagery Transmission Format
- NWIP: New Work Item Proposal (ISO-Begriff)
- RM-ODP: Reference Model of Open Distributed Processing (ISO-Norm)
- RPC: Rational Polynomial Coefficient
- SAR: Synthetic Aperture Radar
- SWE: Sensor Web Enablement (OGC-Begriff)
- SensorML: Sensor Model Language

Vergleich pixel- und objektorientierter Methoden zur Analyse städtischer Grünanlagen

KERSTIN KRELLENBERG ¹

Zusammenfassung: Durch den Vergleich pixel- und objektorientierter Methoden und deren Klassifizierungsgüte wird in diesem Artikel die grundsätzliche Eignung räumlich hochauflösender Satellitenbilddaten zur Analyse innerstädtischer Grünanlagen geprüft. Es kommt eine multispektrale IKONOS-Szene mit einer räumlichen Auflösung von 4 m zum Einsatz. Vor- und Nachteile der Methodenansätze werden am Beispiel der Metropole Buenos Aires aufgezeigt. Die Ergebnisse der städtischen Parkanlage Chacabuco zeigen, dass die Kombination aus pixel- und objektorientierten Analysen einen sinnvollen Methodenansatz reflektiert. Er stellt einerseits ein neues Anwendungsgebiet im Allgemeinen und andererseits im Speziellen für Buenos Aires dar.

1 Einleitung

Für die Stadtplanung sind detaillierte und aktualisierte Informationen über das heterogen strukturierte und heterogen genutzte städtische Ökosystem notwendig. Vor dem Hintergrund einer ökologisch ausgerichteten Stadtplanung kommt urbanen Grünanlagen, die durch die stetig steigende Flächeninanspruchnahme stark reduziert werden, eine besondere Bedeutung zu. Ihre Auswirkungen auf das Stadtklima, die Luftqualität etc. werden durch ihre Größe, ihre Gestalt und ihre Zusammensetzung bestimmt.

In den letzten Jahren haben hochauflösende Satellitenbilddaten, wie sie auch der IKONOS-Satellit bereitstellt, und alternative objektbasierende Klassifizierungsmethoden Einzug in die städtischen Forschungsprojekte gehalten. Die Aussagekraft räumlich hochauflösender Satellitenbilddaten ist speziell für innerstädtische Grünanlagen bisher jedoch kaum untersucht worden. Deshalb wird in der vorliegenden Studie durch den Vergleich pixel- und objektorientierter Methoden und deren Klassifizierungsgüte die grundsätzliche Eignung räumlich hochauflösender Satellitenbilddaten zur Analyse innerstädtischer Grünanlagen geprüft. Vor- und Nachteile werden am Beispiel von Buenos Aires aufgezeigt.

2 Untersuchungsgebiet

Die Hauptstadt Argentiniens ist mit rund 13 Millionen Einwohnern (UNITED NATIONS, 2004) die drittgrößte Metropole Lateinamerikas. Das Zentrum der autonomen Stadt Buenos Aires liegt bei 34°38' Süd und 58°28' West. Das für die vorliegende Studie als Untersuchungsgebiet ausgewählte Süd-West/Nord-Ost-Transekt befindet sich im ärmeren Süden der Stadt, der besonders gravierende Umweltprobleme aufweist. Das Transekt erstreckt sich von der Stadtmitte von Buenos Aires bis zum Stadtrand über eine Gesamtfläche von ca. 51 km² und umfasst sowohl urbane als auch suburbane Bereiche. Innerhalb des Transektes liegen sechs Parkanlagen von sehr unterschiedlicher Gestalt und Zusammensetzung. Die vier Parkanlagen Lezama, España, Patricios und Chacabuco wurden dem urbanen, die beiden anderen Parks Indoamericano und Ribera Sur dem suburbanen Sektor zugeordnet (vgl. Abb. 1).

¹ Dipl.-Umweltwiss. Kerstin Krellenberg, Geographisches Institut, Humboldt-Universität zu Berlin, Postanschrift: Unter den Linden 6, 10099 Berlin, e-mail: kerstin.krellenberg@geo.hu-berlin.de

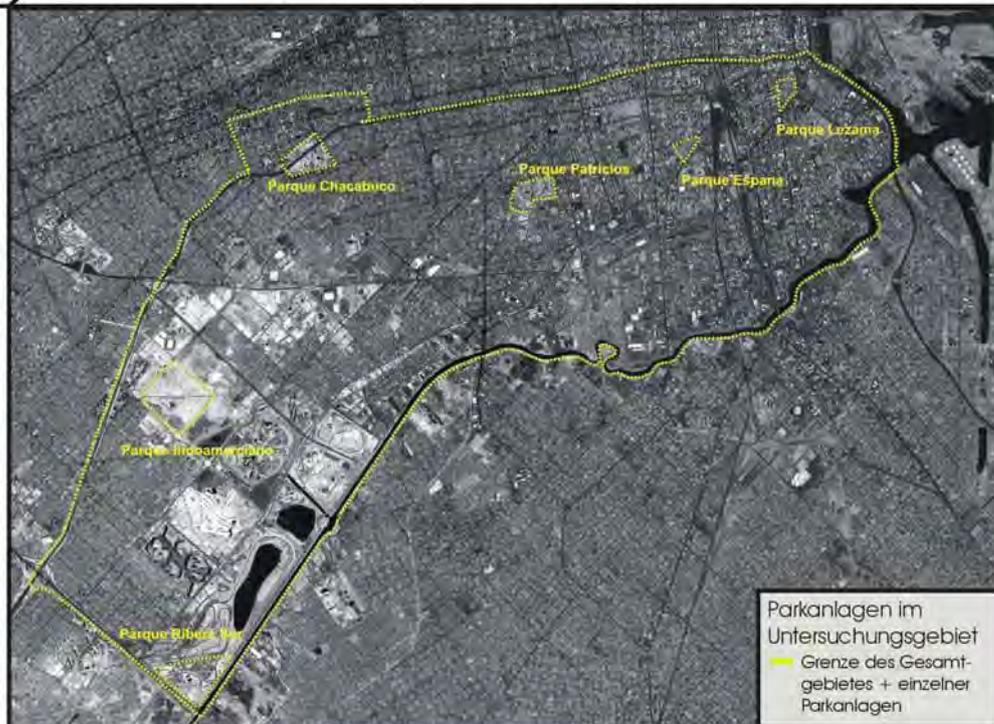
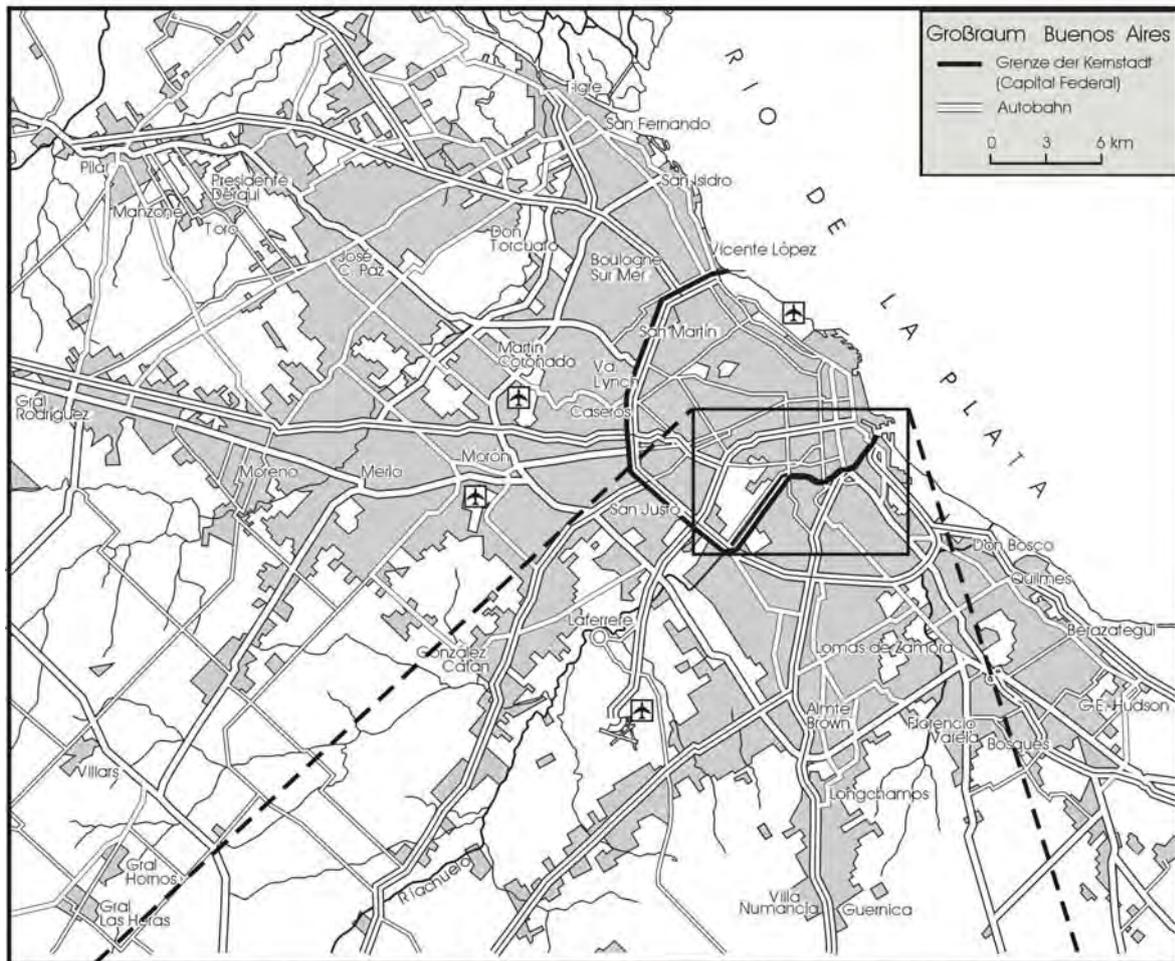


Abb. 1: Lage des Untersuchungsgebietes und der untersuchten Parkanlagen

3 Datengrundlage

Für die vorliegende Studie wurde eine multispektrale IKONOS-Szene mit einer räumlichen Auflösung von 4 m (Aufnahmezeitpunkt 02.01.2001) eingesetzt. Vor dem Hintergrund, dass für zukünftige Anwendungen in Buenos Aires keine finanziellen Mittel für den Einsatz von Szenen mit 1 m räumlicher Auflösung bereitstehen werden, stellt der für diese Studie zur Verfügung stehende Datensatz eine realistische Bearbeitung dar. Die vorliegende Szene wurde auf der Grundlage digitaler Katasterdaten sowie GPS-Kontrollpunkten, die während der Vor-Ort-Begehungen in den Jahren 2003 und 2005 aufgenommen wurden, geometrisch korrigiert. Für diesen Artikel wurde die Parkanlage Chacabuco als Beispielgebiet ausgewählt. Unter Berücksichtigung der Größe des Parks (24.41 ha) wurde ein Radius von 900 m gewählt, innerhalb dessen ökologische Wechselwirkungen zwischen dem Park und seiner Umgebung angenommen wurden. Dieses Gebiet wurde aus der IKONOS-Szene extrahiert. So konnten bei den durchgeführten Analysen hohe Prozessierungs- und Visualisierungszeiten vermieden werden.

4 Methoden

Basierend auf den Informationen der Vor-Ort-Begehungen und der visuellen Luft- und Satellitenbildinterpretationen sowie einer aus diesen Informationen abgeleiteten Biotop-typenkarte wurden überwachte Klassifizierungen durchgeführt. Dabei kamen Pixel- und objektorientierte Methoden zum Einsatz. Die auf Pixeln basierenden Analysen erfolgten mit der RSI Envi 4.0-Software; die objektorientierten Analysen wurden mit der eCognition Professional 4.0-Software durchgeführt. Eine vereinfachte Darstellung des methodischen Vorgehens liefert die Abb. 2.

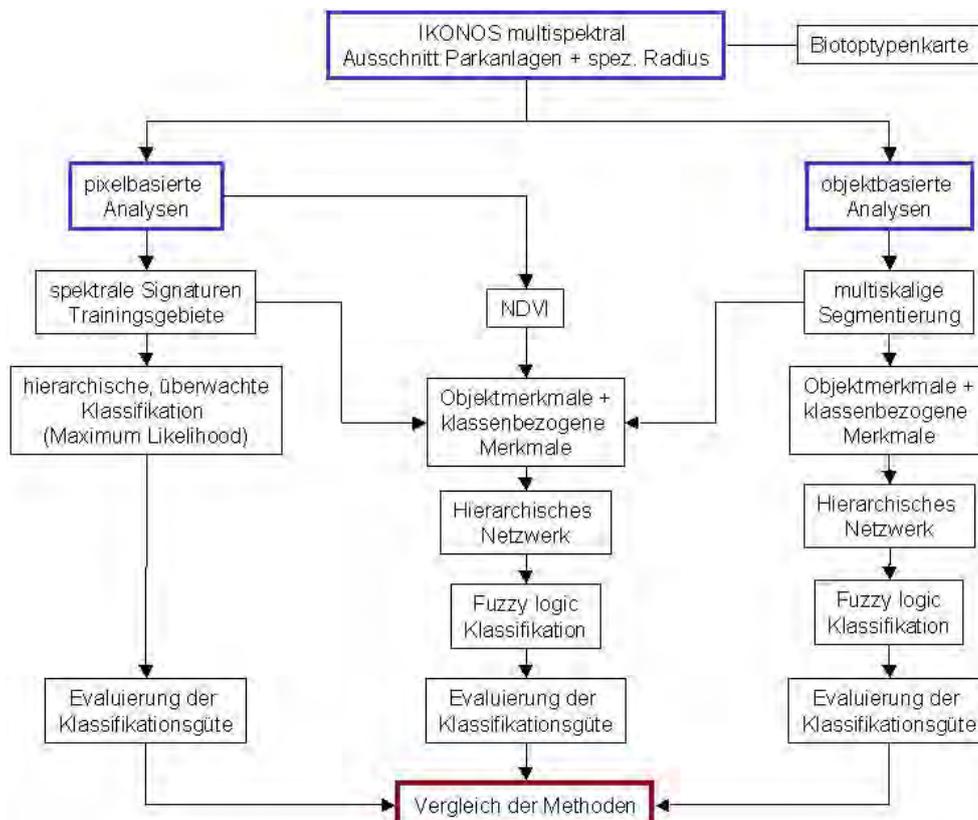


Abb. 2: Schematische Darstellung des methodischen Vorgehens

4.1 Bisherige Untersuchungen

Für zahlreiche andere Städte wurden unterschiedliche Analysen mit IKONOS- Satellitenbilddaten durchgeführt. Von MEINEL et al. (2001) wurden die grundsätzlichen Vorteile von IKONOS-Daten für städtische Anwendungen beschrieben. Auf der Grundlage einer Fusion der multispektralen IKONOS-Kanäle mit dem panchromatischen Kanal (1 m räumliche Auflösung) führten NEUBERT & MEINEL (2002) eine Untersuchung der vegetationsbestandenen Gebiete von Dresden auf der Grundlage eines objektorientierten Ansatzes durch und unterschieden Grünland, Bäume, Obstplantagen, landwirtschaftliche Nutzflächen sowie Brachflächen. Für andere städtische objektorientierte Forschungsansätze (z. B. KLEINSCHMIT & KIM, 2004; BANZHAF, 2004; BAUER & STEINNOCHER, 2001; DE KOK et al., 2003) basierten die Untersuchungen ebenfalls auf fusionierten IKONOS-Daten.

In Argentinien dagegen wurden bisher fast ausschließlich die natürlichen Ressourcen ländlicher Bereiche mit Hilfe von Satellitenbildern untersucht (z. B. KARSZENBAUM et al., 2000, KANDUS et al., 2001, MONTENEGRO et al., 2002). Aktuelle Planungs- und Kontrollwerkzeuge für den städtischen Bereich sind kaum vorhanden. Für die vorliegende Studie bedeutet dies, dass nur vereinzelt auf Grundlagendaten zurückgegriffen werden konnte. Stadtökologische Untersuchungen gekoppelt mit Satellitenbilddaten stellen einen gänzlich neuen Forschungsansatz für Buenos Aires dar.

4.2 Pixelorientierter Ansatz

Der pixelorientierte Ansatz beinhaltet eine auf den spektralen Eigenschaften ausgewählter Oberflächentypen basierende überwachte hierarchische Klassifikation. Hierarchisch meint in diesem Fall, dass zunächst die Klassen ausgewiesen wurden, die über ihre spektralen Eigenschaften am besten von anderen Klassen getrennt werden konnten. Die Klassen Schatten, Wasser, Aluminium, Rasen, Laubbäume, Nadelbäume, offene Fläche in Sukzession, Sand, Beton und Teer wurden in einzelnen Klassifikationsschritten nacheinander ausgewiesen und für die in der Hierarchie des Vorgehens folgende Zuordnung der anderen Klassen ausgeschlossen. Schattenbereiche wurden nicht gesondert betrachtet. Die für heterogen strukturierte urbane Bereiche charakteristischen Fehlklassifizierungen durch inhomogene Flächen oder Mischpixel konnten dadurch nicht vermieden werden. Die spektralen Signaturen der einzelnen Klassen wurden zuvor über Trainingsgebiete erarbeitet, die während intensiver Vor-Ort-Begehungen in den Jahren 2003 und 2005 erfasst wurden. Für jedes Trainingsgebiet wurde eine Signaturanalyse durchgeführt. Darüber hinaus wurde der NDVI (Normalised Difference Vegetation Index) berechnet.

4.3 Objektorientierter Ansatz

Für die objektorientierte Analyse erfolgte eine mehrskalige Segmentierung des Satellitenbildausschnittes in homogene Objekte. Der Segmentierungsansatz in eCognition basiert auf einem *Region Growing*-Verfahren, bei dem mehrdimensionale Bildpixel zu Objekten zusammengefasst werden, die in Form eines hierarchischen Netzwerkes miteinander verknüpft sind (BAATZ et al., 2000). Es wurde eine Klassenhierarchie erarbeitet, die die gleichen Kategorien wie die pixelorientierte Analyse beinhaltet. Jede Klasse wurde durch ihre spektralen Informationen sowie ihre Gestalt und Textur beschrieben. Die Beziehungen zwischen den Objekten (z. B. die Beziehung von Nachbarobjekten sowie Beziehungen zu Unter- und Oberobjekten, Zugehörigkeitsfunktionen etc.) wurden definiert. Um für jedes Objekt den größten Zugehörigkeitswert zu finden, wurde eine Fuzzy-Klassifikation durchgeführt.

Dabei kamen die grundsätzlichen Vorteile der objektorientierten Methode gegenüber einem pixelbasierten Verfahren zum Tragen. Diese bestehen darin, dass Formmerkmale wie Größe und Intensität von Objekten sowie Nachbarschaftsinformationen für topologische Zusammenhänge berechnet werden können. Dadurch ist eine nutzungsorientierte Klassenbildung möglich.

4.4 Kombination pixel- und objektorientierter Ansatz

Der über die spektralen Eigenschaften einzelner Pixel berechnete NDVI wurde als ein synthetischer Kanal zur Integration in die objektorientierte Analyse zu den IKONOS-Spektral-Kanälen hinzugefügt. Da der NDVI ein Maß für die photosynthetische Aktivität ist und stark mit Dichte und Vitalität der Vegetationsdecke korreliert, konnte er als zusätzliches Merkmal die objektbasierende Klassifikation verbessern. Als ebenso sinnvoll erwies es sich, die Spektralsignaturen aus der pixelbasierten Analyse hinzuzuziehen.

5 Ergebnisse

Die Ergebnisse der pixel- und objektbasierten Auswertungen der Parkanlage Chacabuco sind in Abb. 3 dargestellt. Anhand ausgewählter Testobjekte wurden zunächst die Ergebnisse verglichen, um dann eine Evaluierung der Methoden vorzunehmen. Eine Berechnung der Gesamtklassifizierungsgüte der Analysen zeigt, dass mit der objektorientierten und der pixelbasierenden Analyse eine nahezu gleich hohe Klassifizierungsgenauigkeit erreicht wurde. Mit 97 % liegt die Gesamtgenauigkeit bei dem Ergebnis der objektbasierten Methode etwas über der der pixelbasierten (95 %). Dabei wurden die für die Fragestellung besonders relevanten Klassen Gras und Beton durch die objektbasierte Methode besser klassifiziert. In Tab. 1 sind als Errormatrix die Klassifikationsergebnisse der beiden Methodenansätze einander gegenübergestellt. Diese sind vergleichbar, da für die Klassifikationen die gleichen Trainingsgebiete als Referenzdaten für die Errormatrix verwendet wurden. Die Gesamtgenauigkeit des Ergebnisses der kombinierten Methode ist mit 98 % am höchsten. Es wird deutlich, dass dieser Ansatz in diesem Fall das beste Klassifikationsergebnis aufweist.

Allerdings muss bei der Bewertung der Ergebnisse berücksichtigt werden, dass die Berechnungen nur für einen kleinen Ausschnitt von 2,5 km² durchgeführt wurden. Nicht alle Klassen waren in großer Anzahl vertreten, so dass es zu Überlappungen der Trainingsgebiete kam, die für die Spektralinformationen in die überwachte Klassifikation und als Referenzdaten in die Errormatrix eingingen. Dies betrifft vor allem die Klassen Sand und Nadelbäume. Daraus resultiert die insgesamt sehr hohe Genauigkeit. Vergleicht man vor diesem Hintergrund die mit den drei Methodenansätzen klassifizierten Flächenanteile, so werden große Unterschiede deutlich (Tab. 2). Die mit dem objektbasierten Methodenansatz als Aluminium ausgewiesene Fläche liegt beispielsweise rund fünfmal höher als bei der pixelorientierten Analyse. Bei einem visuellen Vergleich wird deutlich, dass die Kanten der Aluminiumdächer mit der pixelbasierten Methode stark generalisiert wurden. Durch die Segmentierung homogener Objekte konnte dagegen eine bessere Abtrennung der Kanten erreicht werden. Probleme bereitet in allen Fällen die Ausweisung von Nadelbäumen; der Flächenanteil ist auch bei der kombinierten Analyse noch zu hoch. Es kommt zu Überlappungen mit der Klasse Schatten.

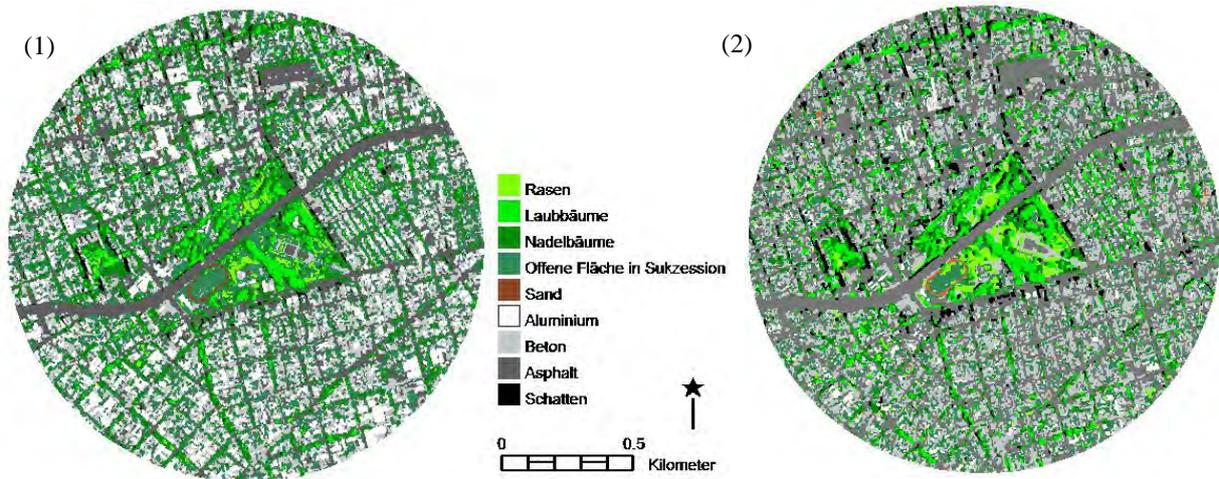


Abb. 3: Pixel- (1) und objektbasierte (2) Auswertung der Parkanlage Chacabuco

Tab. 1: Errormatrix des pixel- (erste Zahl in jeder Zelle) und objektbasierten (zweite Zahl in jeder Zelle) Klassifikationsergebnisses

Klassifikation	Trainingsgebiete									
	Gras	Laubbäume	Nadelbäume	Offene Fläche	Sand	Aluminium	Beton	Asphalt	Schatten	Total
Gras	61\69	0\0	0\0	0\1	0\0	0\0	0\0	0\0	0\0	61\70
Laubbäume	0\4	234\234	0\0	0\0	0\0	0\0	0\0	0\0	0\0	234\238
Nadelbäume	1\0	5\5	35\35	0\0	0\0	0\0	0\0	0\0	4\0	45\40
Offene Fläche	11\0	0\0	4\0	76\76	5\0	0\1	9\3	0\0	0\0	105\80
Sand	0\0	0\0	0\0	1\0	33\33	0\0	0\0	0\0	0\0	34\33
Aluminium	0\0	0\0	0\0	0\0	0\0	67\66	0\0	0\0	0\0	67\66
Beton	0\0	0\0	0\0	0\0	0\5	0\0	42\47	0\0	0\0	42\52
Asphalt	0\0	0\0	0\0	0\0	0\0	0\0	1\2	257\257	0\0	258\259
Schatten	0\0	0\0	1\5	0\0	0\0	0\0	0\0	0\0	25\29	26\34
Total	73\73	239\239	40\40	77\77	38\38	67\67	52\52	257\257	29\29	872

Tab. 2: Klassifikationsergebnisse der drei Methodenansätze (Flächenanteile in Pixel und in Prozent)

Klasse	Gesamtpixelzahl des Szenenausschnitts = 208392					
	Anzahl Pixel pixelbasiert	Anzahl Pixel objektbasiert	Anzahl Pixel kombiniert	Anteil in % pixelbasiert	Anteil in % objektbasiert	Anteil in % kombiniert
Gras	1898	2892	4043	0,91	1,39	1,94
Laubbäume	4995	11108	12399	2,40	5,33	5,95
Nadelbäume	20516	15406	13233	9,84	7,39	6,35
Offene Fläche	34200	16658	7544	16,41	7,99	3,62
Sand	1068	486	1230	0,51	0,23	0,59
Aluminium	21746	4149	6293	10,44	1,99	3,02
Beton	39115	42928	47326	18,77	20,60	22,71
Asphalt	33282	59198	64747	15,97	28,41	31,07
Schatten	2108	6103	2105	1,01	2,93	1,01
Unklassifizierter Außenbereich	49464	49464	49464	23,74	23,74	23,74

6 Diskussion und Ausblick

Bisher erfolgte die Evaluierung der unterschiedlichen Methodenansätze nur visuell und über die berechneten Klassifizierungsgenauigkeiten der Trainingsgebiete. Darüber können zwar erste Rückschlüsse auf die Gesamtgenauigkeit des Klassifizierungsergebnisses getroffen werden, allerdings muss bei der Bewertung der Ergebnisse berücksichtigt werden, dass die Berechnungen nur für einen kleinen Ausschnitt von 2,5 km² durchgeführt wurden. Für weitergehende Evaluierungen und Validierungen des Methodenansatzes wird entscheidend sein, ob dieser auf anders strukturierte Grünanlagen übertragbar ist. In der vorliegenden Beispieluntersuchung lagen nicht für alle Klassen ausreichend große Trainingsgebiete vor. Außerdem konnte der Grundsatz der Homogenität aufgrund der kleinräumigen Differenzierung der Parkanlage nicht für alle Gebiete gewährleistet werden. Weitere objektbasierende Parameter müssen getestet werden, um diesen Methodenansatz zu verbessern. Darüber hinaus sollen in weiterführenden Untersuchungen die Schattenbereiche gesondert betrachtet werden, da diese in urbanen Gebieten einen nicht unerheblichen Flächenanteil ausmachen.

Durch intensive Vor-Ort-Begehungen und eine Kombination aus pixel- und objektorientierten Auswertungsmethoden konnten zahlreiche Informationen zu den städtischen Grünanlagen von Buenos Aires abgeleitet werden. Sie stellen eine wichtige Datengrundlage für weitere stadtoökologische Untersuchungen dar. In einem nächsten Schritt werden die in dieser Studie erzielten Ergebnisse mit terrestrischen Kartierungen in einen Zusammenhang gebracht, um Aussagen zur ökologischen Wertigkeit der Grünanlagen treffen zu können. Aus den Ergebnissen können z. B. Planungsansätze zum Schutz und zur Aufwertung vorhandener Grünflächen abgeleitet werden. Eine Automatisierung der Anwendung könnte auch den Behörden vor Ort zugute kommen. Für weitere Untersuchungen in Buenos Aires wäre es außerdem wichtig und interessant, die temporalen Veränderungen der Grünanlagen zu modellieren, da sich Veränderungen in der Vegetationszusammensetzung sowie der Zusammenhängigkeit von Grünanlagen auf das gesamte städtische Ökosystem auswirken.

7 Danksagung

Der vorliegende Artikel ist Teil einer noch nicht abgeschlossenen Doktorarbeit, die seit 04/2004 durch ein NaFöG-Stipendium vom Land Berlin finanziert wird. Die digitalen Katasterdaten für Buenos Aires wurden vom D.G.S.I.G. (Dirección General de Sistemas de Información Geográfica del Gobierno de la ciudad de Buenos Aires), der Abteilung für Geographische Informationssysteme der Stadt Buenos Aires, bereitgestellt.

8 Literaturverzeichnis

- BAATZ, M., LESSING, R., ROTT, T. & SCHÄPE, A., 2000: Objektorientierte, fraktalhierarchische Auswertung von Fernerkundungsdaten.- Rundgespräch der Kommission für Ökologie, 17: 27-35.
- BANZHAF, E., 2004: Detektion von potenziellen Industriebrachen mittels Fernerkundungs- und GIS Daten. Das Beispiel Baltimore City, Maryland, USA.- Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation e.V., 13: 271-278.
- BAUER, T. & STEINNOCHER, K., 2001: Per parcel land use classification in urban areas applying a rule-based technique.- GeoBIT/GIS 6: 24-27.

- DE KOK, R., WEVER, T. & FOCKELMANN, R., 2003: Analysis of urban structure and development applying procedures for automatic mapping of large area data.- JÜRGENS, C., (Hrsg.), 2003: Remote Sensing of Urban Areas, Regensburg.
- KANDUS, P., KARSZENBAUM, H., PULTZ, T., PARMUCHI, G. & BAVA, J., 2001: Influence of flood condition and vegetation status in the radar backscatter of wetland ecosystems. Analysis of multitemporal /multiangle radarsat SAR data.- Canadian Journal of Remote Sensing, **27** (6): 651-662.
- KARSZENBAUM, H., KANDUS, P., MARTINEZ, J. M., LE TOAN, T., TIFFENBERG, J. & PARMUCHI, G., 2000: ERS-2, RADARSAT SAR backscattering characteristics of the Parana River Delta Wetland, Argentina.- ESA-SP-461.
- KLEINSCHMIT, B., & KIM, H. O., 2004: Anwendung sehr hochauflösender Satellitenbilddaten zur urbanen Biotop- und Nutzungstypenkartierung – dargestellt am Beispiel der südkoreanischen Megastadt Seoul.- Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation e.V., 13: 263-270.
- MEINEL, G., NEUBERT, M. & REDER, J., 2001: The potential use of very high resolution satellite data for urban areas - first experiences with IKONOS data, their classification and application in urban planning and environmental monitoring.- Regensburger Geographische Schriften, 35: 196-205.
- MONTENEGRO, C., MINOTTI, P., KARSZENBAUM, H., STRADA, M. & PARMUCHI, G., 2002: Integration of the different phases of the argentine first national native forest inventory in a GIS environment.- 29th International Symposium on Remote Sensing of Environment (IRSE), 8-12 de Abril 2002, Buenos Aires.
- NEUBERT, M. & MEINEL, G., 2002: Segmentbasierte Auswertung von IKONOS-Daten – Anwendung der Bildanalyse-Software eCognition auf unterschiedliche Testgebiete.- BLASCHKE, T., (Hrsg.), 2002: Fernerkundung und GIS. Neue Sensoren – innovative Methoden, Heidelberg.
- UNITED NATIONS, 2004: World Urbanization Prospects. The 2003 Revision, New York.

Anwendung von Fernerkundungsmethoden zur Schadstoffbilanzierung in urbanen Gebieten

U. WEIDNER¹, D. LEMP¹, M. VOSKAMP², G. ABBT-BRAUN²,
H.-P. BÄHR¹ und F.H. FRIMMEL²

Zusammenfassung: Der Lehrstuhl für Wasserchemie am Engler-Bunte-Institut (EBI) und das Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung (IPF) beschäftigen sich in einem laufenden Projekt mit der Bilanzierung von Schadstoffen auf urbanen Flächen durch chemische und bildanalytische Methoden. Ziel dieses Projektes ist, Modellparameter zu definieren, die eine Quantifizierung der durch ein Regenereignis verursachten Schadstoffmengen von urbanen Dachflächen ermöglichen. Ist das Arbeitsgebiet des EBI innerhalb dieses Projektes die chemische Analyse und Modellierung, so liegt das Hauptaugenmerk des IPF auf der Charakterisierung der Dachflächen durch geometrische Beschreibung und Materialklassifikation. Im Rahmen dieses Beitrages werden das Projekt und die bislang erzielten Ergebnisse dargestellt.

1 Einleitung

Urbane Gebiete zeichnen sich durch ihre hohe Komplexität und Variabilität hinsichtlich der auftretenden Strukturen und Geometrien, sowie der verwendeten Materialien aus. Aus diesem Grund war der Einsatz von Fernerkundungsmethoden zur Klassifikation in diesen Bereichen für eine lange Zeit nur sehr eingeschränkt möglich. Erst die Verfügbarkeit von hochauflösenden Sensoren in den letzten Jahren ermöglichte die Nutzung von Fernerkundungsmethoden zur Bearbeitung von Fragestellungen in diesen Bereichen. Der Begriff der hohen Auflösung umfasst an dieser Stelle jedoch nicht nur die geometrische Auflösung der Daten, z.B. beschrieben durch die Bodenabtastrate, sondern auch ihre spektrale Auflösung, z.B. beschrieben durch die Anzahl und Bandbreite der erfassten spektralen Bänder. Eine hohe geometrische Auflösung ist erforderlich, um der räumlichen Variabilität der geometrischen Stadtstrukturen gerecht zu werden. Dies betrifft zum einen die Erfassung der Geometrien, zum anderen die Erfassung von Oberflächeneigenschaften, z.B. Klassifikation der Oberflächenmaterialien. Im Hinblick auf eine solche Klassifikation erscheint weiterhin eine hohe spektrale Auflösung erforderlich, um eine Differenzierung der auftretenden Materialien zu erlauben. Das hier vorgestellte Projekt der Universität Karlsruhe (TH) nutzt Fernerkundungsmethoden als Grundlage für die Schadstoffbilanzierung für Dachflächen. Dieses Projekt wird vom Lehrstuhl für Wasserchemie des Engler-Bunte-Instituts und dem Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung durchgeführt. Hintergrund des Projekts ist, ein Beurteilungskonzept zu entwickeln, das mit einem geringen experimentellen Aufwand ermöglicht, Aussagen über eine großräumige (urbane) Belastungssituation zu treffen und durch sein Prognosepotenzial ein Entscheidungsinstrument für das Ver- und Entsorgungsmanagement darstellt. Darüber hinaus sind aus den chemischen Analysedaten auch Aussagen über die Belastung der Umwelt bei einer Direktversickerung des Dachablaufwassers - wie es sowohl aus ökologischen als auch aus ökonomischen Gründen wünschenswert wäre - von verschiedenen Dachmaterialien ableitbar. Dies ist ein entscheidender Punkt für die Grundwasserbewirtschaftung. Das Projekt umfasst folgende Arbeitspunkte: (1) chemische Untersuchungen (EBI), (2) Klassifikation der Oberflächenmaterialien (IPF), (3) Bestimmung der Oberflächengeometrie (IPF), (4) Modellierung und Schadstoffbilanzierung (EBI), (5) Modellverifikation (EBI/IPF). Der Schwerpunkt der Arbeiten lag beim Lehrstuhl für Wasserchemie bislang auf der Analytik von anorganischen und organischen Schadstoffen im Dach-

abflusswasser, beim IPF auf der Charakterisierung von Dachflächen, d.h. Bestimmung ihrer Geometrie und Klassifikation der Oberflächenmaterialien.

Die chemischen Untersuchungen zielen auf zwei repräsentative Schadstoffgruppen ab: Zum einen werden Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) untersucht, die als organische Spurenschadstoffe größtenteils durch anthropogene Quellen z.B. durch die unvollständige Verbrennung von fossilen Brennstoffen aus dem Straßenverkehr oder Hausbrand in die Umwelt eingetragen werden (FÖRSTER & HERRMANN 1996). Dachflächen können hierfür als Senken dieser Stoffbelastung fungieren. Zum anderen werden die Gehalte an Metallen wie Kupfer, Zink und Cadmium im Dachablaufwasser untersucht, wobei besonders unbeschichtete Dächer aus Kupfer- und Titanzinkblech als wichtige Quelle für diese Metalle anzusehen sind (FREITAG et al. 1986).

Der Einsatz hyperspektraler Daten erscheint für die Bestimmung der Dachmaterialien unerlässlich, um auch feine Unterschiede der beobachteten Spektren zu erkennen und für die Klassifikation zu nutzen. Die Laserscanning-Daten werden zur Erfassung der Dachgeometrien eingesetzt. Zusätzlich wird diese geometrische Information aber auch im Rahmen der Klassifikation genutzt, was im Vergleich zu einer Klassifikation allein auf Grundlage der spektralen Daten zu einer signifikanten Verbesserung des Klassifikationsergebnisses führt.

Laserscanning- und hyperspektrale Daten werden häufig jeweils allein eingesetzt, um entweder geometrische Information – vor allem über Gebäude – abzuleiten (vgl. z.B. VÖGTLE & STEINLE (2001)) oder Oberflächenmaterialien zu erfassen (vgl. z.B. HEIDEN et al. (2001)). Die gemeinsame Nutzung von geometrischen Daten in Form eines Digitalen Oberflächenmodells (DOM) und hyperspektralen Daten wurde bereits von MADHOK & LANDGREBE (1999) vorgeschlagen: sie differenzierten zwischen Gebäude- und Bodenbereichen aufgrund der Höheninformation eines aus Luftbildern abgeleiteten DOM und konnten somit Boden- und Dachmaterialien unterscheiden, die sich in den durch HYDICE-Sensor beobachteten Spektren kaum unterschieden. Einen ähnlichen Ansatz verfolgen auch HOUMAYOUNI & ROUX (2004) sowie BOCHOW et al. (2003). Im Gegensatz zu diesen Ansätzen nutzen wir aber nicht nur die reine Höheninformation des DOM, sondern berücksichtigen auch die Neigung der Dachsegmente als zusätzliche Informationsquelle für die Klassifikation.

2 Datengrundlage und Methoden

In diesem Abschnitt werden die eingesetzten Daten und Methoden vorgestellt. Die chemischen Untersuchungen dienen zur Bestimmung der chemischen Prozesse auf den ausgewählten Dachflächen und bilden somit eine wesentliche Grundlage der Modellierung und der darauf basierenden Schadstoffbilanzierung. Darüber hinaus geben sie uns auch Hinweise darauf, welche Materialien im Rahmen der Auswertung der Fernerkundungsdaten unterschieden und erfasst werden müssen. Die aufgrund der Untersuchungen erstellten Schadstoffmodelle können zusammen mit den erfassten Dachgeometrien und -materialien für eine Schadstoffbilanzierung eines größeren Bereiches genutzt werden.

2.1 Chemische Analysen

Die chemischen Analysen umfassen ein breites Spektrum an Methoden. Neben den klassischen Summenparametern wurden auch Einzelstoffanalysen sowie organische Spurenstoffanalysen durchgeführt. Basierend auf Literaturfundstellen (z. B. FÖRSTER (1996), SHU (1997)), wonach bei jedem Regenereignis eine exponentielle Abnahme der Schadstoffkonzentrationen in den Dachabläufen beobachtet worden ist, wurde das Dachablaufwasser in

zwei Probenfraktionen unterteilt. Die erste Fraktion („First Flush“) umfasst dabei die ersten 0,5 mm des Niederschlages (dies entspricht bei einer Fläche von 2 m² einem Probenahmevolumen von 1 L), die zweite Fraktion („Second Flush“) beinhaltet den Nachlauf bis zu einer Niederschlagsmenge von 1,25 mm (entsprechend einem Volumen von 2,5 L).

Als Summenparameter wurden in den wässrigen Proben die pH-Werte, die elektrischen Leitfähigkeiten, der gesamte organische Kohlenstoffgehalt (TOC) und der gelöste organische Kohlenstoffgehalt (DOC) bestimmt. Die Einzelstoffanalysen umfassen die anorganischen Anionen Chlorid, Nitrit, Nitrat und Sulfat, deren Konzentrationen mittels der Ionenchromatographie (IC) bestimmt worden sind, sowie die Metallkonzentrationen für 14 Elemente, darunter Kupfer (Cu), Zink (Zn) und Cadmium (Cd). Diese Konzentrationen wurden nach Anregung im induktiv-gekoppelten Plasma mittels der optischen Emissionsspektroskopie (ICP-OES-Technik) bestimmt. Die Unterscheidung zwischen den partikulär gebundenen und frei gelösten Metallen erfolgte durch Abtrennen der Partikel mittels Filtration (0,45 µm) und nasschemischem Aufschluss des Feststoffs in einem mikrowellenunterstützten Aufschlussystem, sowie anschließender ICP-OES-Analyse der erhaltenen Lösungen. Die 16 EPA-PAK als organische Spurenstoffe wurden nach einer Flüssig-Flüssig-Extraktion (LLE) der wässrigen Lösung mit Cyclohexan als Anreicherungsschritt mittels der Hochdruckflüssigkeitschromatographie und Fluoreszenzdetektion (HPLC-FLD) analysiert.

2.2 Fernerkundung

Für die Charakterisierung von Dachflächen standen als Datengrundlage Laserscanning- und hyperspektrale Daten zur Verfügung, auf die im folgenden Abschnitt eingegangen wird. Anschließend wird die Strategie zur Fusion und gemeinsamen Auswertung dieser komplexeren Daten dargestellt.

2.2.1 Daten

Das Arbeitsgebiet des Projektes ist der zentrale Campus-Bereich der Universität Karlsruhe. Für diesen Bereich liegen Digitale Oberflächenmodelle (DOM) vor, die aus Laserscanning-Daten (*first-* und *last-pulse*) einer Befliegung mit dem TopoSys-Sensor im März 2002 abgeleitet wurden. Für die Auswertung wurden nicht die originären Punktwolken, sondern die auf ein 1 m x 1 m-Raster umgerechneten DOM genutzt. Die Erfassung der hyperspektralen Daten erfolgte mit dem HyMAP-Sensor während der HyEurope-Kampagne 2003, die durch das DLR (Oberpfaffenhofen) durchgeführt wurde. Das DLR prozessierte die Daten (Korrekturen, Georeferenzierung) unter Zuhilfenahme der DOM. Es stehen 126 Bänder des HyMap-Sensors zur Verfügung. Die Bodenabtastrate von 4 m x 4 m ist geringer als die der vorliegenden DOM. Zur einfachen Kombination der Daten wurden die hyperspektralen Daten auf ein Raster von 1 m x 1 m neu abgetastet. Hierzu wurden verschiedene Standardtechniken wie Nächste-Nachbar-Interpolation eingesetzt (vgl. DELL'ACQUA & GAMBA (2003)). Im Vorgriff auf die Ergebnisse sei hier schon erwähnt, dass zwischen den Ergebnissen basierend auf den verschiedenen Interpolationsverfahren keine signifikanten Unterschiede zu erkennen waren.

Neben den Laserscanning- und hyperspektralen Daten wurden Luftbilder mit einem Maßstab von ca. 1:4000 aus dem Jahre 2001 für die Erstellung eines 3D-Campus-Modells einschließlich Materialinformation genutzt. Zum einen erfolgte eine photogrammetrische Auswertung und Interpretation der Luftbilder in Bezug auf die Dachmaterialien, zum anderen wurden die Dachmaterialien – soweit möglich – durch Feldbegehung bestimmt bzw. die Ergebnisse der Luftbildinterpretation überprüft und ergänzt. Dieses 3D-Campus-Modell bildet die Referenz für die Bewertung der Klassifikation.

2.2.2 Auswertung

Die Auswertung der Daten wurde mit einem objektorientierten Ansatz unter eCognition durchgeführt. Objekt- bzw. segmentorientierte Verfahren besitzen hinsichtlich der Auswertung von geometrisch hochauflösenden Fernerkundungsdaten in urbanen Bereichen gegenüber pixelbasierten Verfahren den Vorteil, dass neben der durch die Daten gegebenen Information auch Wissen über die Objekte und ihre Relationen einbezogen werden kann. Aus diesem Grund wurde innerhalb des Projektes eCognition eingesetzt. Des Weiteren sollte auch untersucht werden, in wieweit sich eCognition für die Auswertung hyperspektraler Daten eignet.

Der erste Schritt der Analyse besteht bei segmentbasierten Verfahren aus der Segmentierung. Das Verfahren von eCognition nutzt innerhalb des implementierten Regionenwachstumsverfahrens als Homogenitätskriterium neben den Werten der einzelnen Datenkanäle auch geometrische Merkmale der Segmente wie z.B. Formparameter. Die für die Datenkanäle zugrunde liegende Modellannahme von Bereichen mit konstanten Werten erscheint jedoch nicht sinnvoll, wenn für die Segmentierung die DOM-Information genutzt werden soll. Untersuchungen bestätigten dies auch. Als Beispiel hierfür können Walmdächer dienen. In diesem Fall führt die Segmentierung zu umlaufenden Segmenten mit konstanter Höhe. Am IPF wurde ein Segmentierungsverfahren von QUINT & LANDES (1996) für mehrkanalige Bilder entwickelt und von VÖGTLE & STEINLE (2000) für aus Laserscanningdaten abgeleitete DOM angewendet. Bei diesem Verfahren – ebenfalls ein Regionenwachstumsverfahren – ist die Modellannahme wählbar. Für DOM kann daher die Modellannahme von Ebenen – Bereiche mit konstanter 1. Ableitung – genutzt werden und somit Flach- aber auch geneigte Dächer segmentiert werden. Eine Segmentierung auf der alleinigen Grundlage der Höheninformation ist jedoch im Falle von Materialübergängen nicht ausreichend. Aus diesem Grunde wurden beide Verfahren in zwei Schritten kombiniert. Der IPF-Ansatz wird für den ersten Segmentierungsschritt genutzt, in den nur die geometrische Information einfließt. Diese initiale Segmentierung wird dann in eCognition eingeführt und die Segmente werden aufgrund der hyperspektralen Daten ggf. unterteilt. Diese Zweistufigkeit und das Anhalten der initialen Segmentierung aufgrund der Laserscanningdaten erscheint im Hinblick auf die unterschiedlichen geometrischen Auflösungen der beobachteten Daten sinnvoll.

Die aktuelle Klassifizierungsstrategie basiert nicht nur auf den hyperspektralen Daten, sondern auch auf den DOM. Im Falle der hyperspektralen Daten werden Charakteristiken der beobachteten Spektren genutzt. Ein Beispiel hierfür ist der Verlauf des beobachteten Spektrums für Kupfer mit einem Abfall von Kanal 8 bis 20. Für einige Materialien sind die Spektralkurven jedoch nicht so unterschiedlich. Dies gilt z.B. für Schiefer und die Materialgruppe aus steinartigem Material, z.B. Dächer mit Steinplatten oder Kies. Hier hilft die Geometrie weiter. So ist im Falle eines Kiesdaches die Neigung beschränkt, bei Schiefer liegt hingegen im Allgemeinen eine Neigung vor. Für die Materialgruppe basierend auf Steinmaterialien gilt auch häufig, dass diese Materialien nur die Deckschicht bilden und sich darunter eine Schicht aus Bitumenmaterial befindet. Die chemischen Untersuchungen deuten auf ein ähnliches Schadstoffverhalten hin, sodass in diesem Falle diese Materialien zu einer Klasse zusammengefasst werden können.

Parallel zu der gerade beschriebenen Strategie wurden Untersuchungen hinsichtlich der Dimensionalität der hyperspektralen Daten und der Anwendung von pixelbasierten Verfahren wie z.B. Spectral Angle Mapper (SAM) durchgeführt. Im Prinzip kann in das SAM-Verfahren auch die Höheninformation einbezogen werden. Hierbei stellt sich jedoch die Frage der gegenseitigen Gewichtung der unterschiedlichen Datentypen, sodass für erste

Betrachtungen nur die hyperspektralen Daten genutzt wurden. Um einen Vergleich mit Ergebnissen von eCognition durchzuführen, erfolgte die Materialklassifikation mit eCognition auch in einem Ansatz nur auf der Grundlage der hyperspektralen Daten.

3 Ergebnisse

3.1 Chemische Analysen

Beispielhaft für den Bereich der überwiegend aus anthropogenen Quellen stammenden organischen (Schad-)Stoffe wurden die Konzentrationen der 15 fluoreszenzaktiven von der nordamerikanischen Umweltbehörde (U. S. EPA) als hochprioritär eingestuften 16 EPA-PAK untersucht. Dabei zeigte sich, dass die Abläufe der verschiedenen Dachmaterialien eine nahezu identische Verteilung der 15 EPA-PAKs aufweisen. Die Konzentrationen liegen größtenteils im Bereich zwischen 10 und 100 ng-L⁻¹. Dabei ist zu beachten, dass die zur Anreicherung dieser Spurenstoffe eingesetzte Flüssig-Flüssig-Extraktion die Gesamtkonzentration für die einzelnen PAK erfasst. D.h. es wird sowohl der überwiegende Anteil dieser hydrophoben Schadstoffe, der an (natürliche) Makromoleküle bzw. Kolloide/Partikel gebundenen, als auch der frei gelöste Anteil zusammen bestimmt. Dieser geringe Anteil der frei gelösten PAK gilt nach Ansicht vieler Autorengruppen als der ausschließlich bioverfügbare Teil (HAITZER 1998 und darin zitierte Literatur), wohingegen die Wechselwirkungen der PAK mit natürlichen Wasserinhaltsstoffen zu einem beschleunigten Abbau dieser – teilweise kanzerogenen – Umweltschadstoffe führen sollen. Aufgrund der Gleichartigkeit des Verteilungsmusters bei verschiedenen Dachmaterialien und der geringen Konzentrationen in den Dachabläufen wurde auf eine eingehende Analyse und möglicher photochemischer Umwandlungsprodukte verzichtet.

Für ein typisches Regenereignis (Beprobung am 11.08.2004) sind die Ergebnisse der Metallanalysen in der nachfolgenden Abbildung dargestellt. Die Beprobung der Modelldächer mit metallischer Eindeckung ergab eine auffallend hohe Konzentration der Schwermetalle Zink und Kupfer in den Regenwasserdachabläufen der betreffenden Zink- bzw. Kupferdächer. Dabei wurden in den - in der Literatur als „First Flush“ (z. B. FÖRSTER 1996, SHU 1997) bezeichneten - jeweiligen ersten Fraktionen besonders hohe Metallgehalte an Zink bzw. Kupfer im Dachablauf des neuen Zink- und der beiden Kupferdächer beobachtet. Diese erste Fraktion spiegelt in besonderem Masse den Einfluss der Verwitterung des Dachmaterials z.B. infolge von Sonneneinstrahlung und Temperaturschwankungen wider.

Nachfolgend wurde in der zweiten Fraktion („Second Flush“) der Ablauf des „gereinigten“ Daches beprobt. Obwohl hier die Konzentrationen an Zink bzw. Kupfer niedriger als in den ersten Fraktionen waren, wurden auch hier hohe Metallgehalte in den jeweiligen Proben beobachtet. Die Hintergrundbelastung wurde dabei sowohl durch die Beprobung des Regenwassers (nasse Deposition) als auch durch die fraktionierte Beprobung eines Glasdaches (trockene und nasse Deposition) bestimmt. Das Ausmaß der trockenen Deposition lässt sich als Differenz aus dem Metall-Gehalt im Regenwasser und dem Gehalt in der ersten Fraktion des Glasdachablaufs (I-Glas) bestimmen und leistet hier einen vernachlässigbaren Beitrag zum Kupfereintrag durch Dachabläufe. Die zweite Fraktion des Glasdachablaufs (II-Glas) sollte mit den Werten des Regenwassers identisch sein, wie dies in Abb. 1 zu sehen ist.

Für die Beprobung des Kupferdachmaterials stand neben einem neu installierten ein über einige Jahre gealtertes Kupferdach zur Verfügung. Dabei wirkt sich eine Alterung des beprobten Kupferdaches (Cu, alt) bei einer deutlich sichtbaren dunkelbraunen, matten Patina

nicht auf die Kupfer-Konzentration im Dachablaufwasser aus, wie der Vergleich mit einem neu installierten Kupfer-Dach (Cu, neu) in der Abb. 1 zeigt.

Die Zink-Konzentrationen im Ablauf eines neu installierten Zinkdaches liegen im Beprobungszeitraum (April 2004 bis Februar 2005, vgl. Abb. 2) im Bereich von 8,8 bis 32,4 mg L⁻¹ für die erste Fraktion und 4,3 bis 13,7 mg L⁻¹ für die zweite Fraktion. Der Spitzenwert der Kupferkonzentration liegt bei 26,2 mg L⁻¹ für die erste Dachablauffraktion.

Die Verteilung der Schwermetalle Zink und Kupfer zwischen der frei gelösten Phase und der partikulär gebundenen Phase ist in Abb. 3 dargestellt.

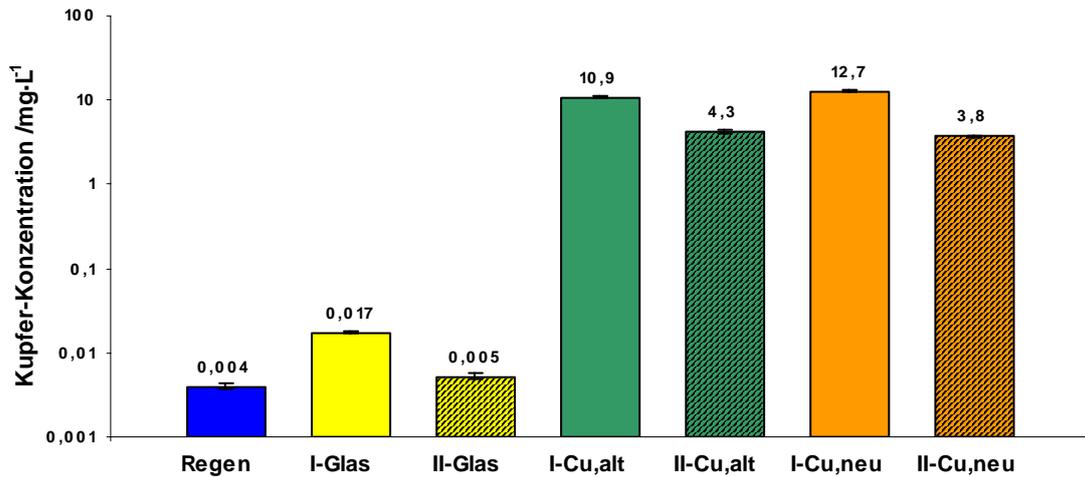


Abb. 1: Typische Verteilung der Kupferkonzentration in der ersten Fraktion (I-) der Regenablaufwasser bis 0,5 mm Niederschlag und der folgenden Fraktion (II-) eines gealterten (Cu, alt) und eines neuen Modellkupferdachs (Cu, neu), sowie eines Glasdaches (Glas) und des Regenwassers (Regen) als Referenz (filtrierte Lösungen, dargestellt anhand eines Regenereignisses am 11.08.2004).

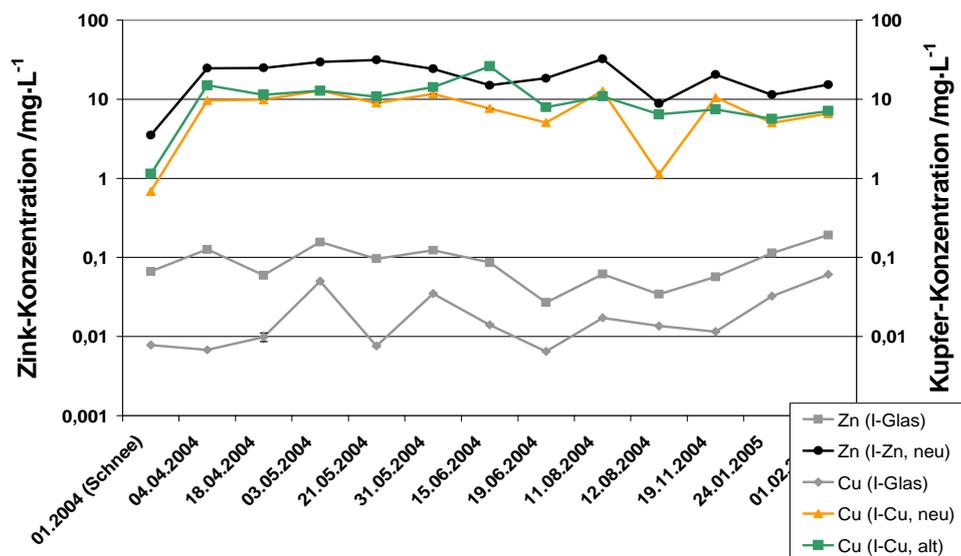


Abb. 2: Jahressganglinien der Zink- und Kupfer-Konzentrationen in den ersten Fraktionen der Dachabläufe der Zink- bzw. Kupfer-Dächer, sowie des Glas-Daches als Referenzdach für die trockene und nasse Deposition.

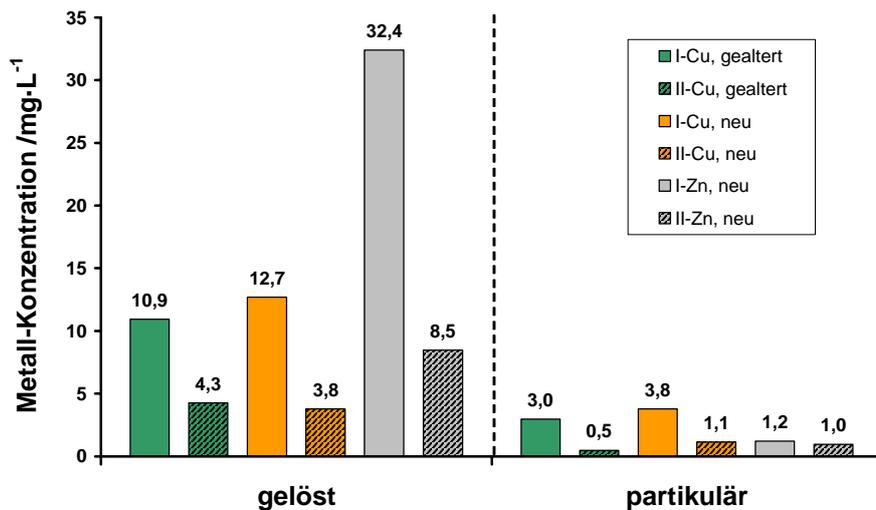


Abb. 3: Kupferkonzentration in wässriger Lösung (gelöst) und an Partikel gebunden (partikulär) bezogen auf das Suspensionsvolumen der Partikel in jeweils zwei Dachablauffractionen (I- und II-) für ein gealtertes (Cu, alt) und ein neues Kupferdach (Cu, neu) (dargestellt anhand des Regenereignisses vom 11.08.2004).

Für die beiden Kupferdächer wurden dabei sehr gut übereinstimmende Verteilungen erhalten. Auf das Volumen der Probe bezogen liegen bei pH-Werten von 5,8 bzw. 5,9 ca. 80 % des Kupfers in wässriger Lösung vor, während 20 % der Gesamtkonzentration des Kupfers an Partikel größer 0,45 μm fixiert sind. Im Regenwasserablauf des neu installierten Zinkdachs lagen bei annähernd gleichen pH-Werten wie bei den Kupferdächern ca. 90 % der Gesamtkonzentration an Zink als frei gelöste Spezies vor und nur 10 % waren an die in den Dachabläufen vorhandenen Partikel gebunden. Dieser Verteilung zwischen wässriger und partikulärer Phase kommt bei der Einschätzung der Ausbreitungsgeschwindigkeit des eingetragenen Kupfers im Boden (z.B. bei einer Direktversickerung der Dachabläufe) eine entscheidende Rolle zu.



Abb. 4: Ergebnis der zweistufigen Segmentierung (links) im Vergleich zum entsprechenden Luftbildausschnitt (rechts)

3.2 Erfassung der Dachflächen

Grundlage der geometrischen Erfassung der Dachflächen bildet die Segmentierung der DOM und hyperspektralen Daten. Die im Laufe des Projekts gemachten Erfahrungen lassen den

verfolgten zweistufigen Ansatz als sinnvoll und erfolgreich erscheinen. Abb. 4 zeigt das Segmentierungsergebnis für einen Bereich im Vergleich zum entsprechenden Luftbildauschnitt. Ein visueller Vergleich zeigt eine gute Übereinstimmung, wenn auch im südlichen Bereich ein Aus- bzw. Überlaufen von Segmenten festzustellen ist. Die Parameter für die Segmentierungen wurden so gewählt, dass kleinere Dachgauben in die umgebenden Segmente einbezogen werden. Die Effekte sind hierdurch zu erklären.



Abb. 5: Ergebnis der Klassifikation (hyperspektrale Daten) - **Ziegel**, **Schiefer**, **Stein**, **Kupfer**, **Metall** (Zink/Aluminium)

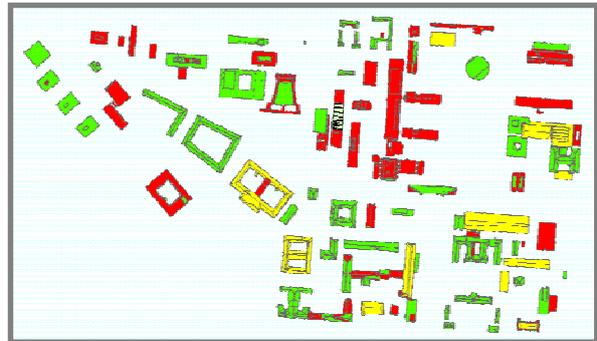


Abb. 6: Vergleich mit den Referenzdaten

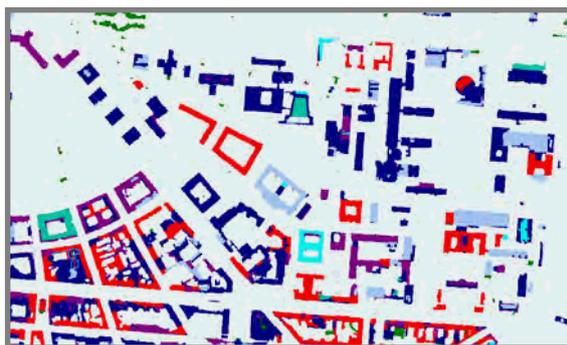


Abb. 7: Ergebnis der Klassifikation (hyperspektrale Daten und Neigung) - **Ziegel**, **Schiefer**, **Stein**, **Kupfer**, Metall (**Zink/Aluminium**)



Abb. 8: Vergleich mit den Referenzdaten

Abb. 5 zeigt das Ergebnis der Klassifikation. Dieses Ergebnis wurde mit den Referenzdaten verglichen. In Abb. 6 sind falsch klassifizierte Dachbereiche in Rot, korrekt klassifizierte Metaldächer (Zink/Aluminium) in Gelb, korrekt klassifizierte sonstige Dächer in Grün und Bereiche ohne Referenz in Hellgrün dargestellt. Auffällig sind die großen falsch klassifizierten Bereiche in der Mitte des Campus. Viele der Segmente wurden als Schiefer klassifiziert, obwohl es sich um Kies- und mit Steinplatten abgedeckte Dächer handelt. Dies schlägt sich auch in der Genauigkeit der Klassifikation nieder: nur ca. 57 % der erfassten Dachfläche ist korrekt klassifiziert. eCognition bietet intern die Möglichkeit die sog. Stabilität aufgrund der Differenzen der Zugehörigkeitsfunktionen zu bestimmen. In diesem Fall zeigt dieses Maß bereits die Schwierigkeiten hinsichtlich der Trennbarkeit dieser Klassen allein aufgrund der hyperspektralen Daten an. Vergleiche von Ergebnissen einschließlich ihrer Stabilität gemäß eCognition auch aufgrund der Nutzung unterschiedlicher Ansätze zur Verknüpfung der Zugehörigkeitswerte von Einzelmerkmalen (z.B. fuzzy-AND) sind in LEMP

& WEIDNER (2004) angegeben. Eine Klassifizierung mittels Spectral Angle Mapper (SAM) erbrachte eine ähnliche Klassifikationsrate (vgl. BRAND (2005)).

4 Ausblick

In diesem Beitrag zeigten wir die Anwendung von Fernerkundungsmethoden zur Schadstoffbilanzierung in urbanen Gebieten am Beispiel des zentralen Campusbereiches der Universität Karlsruhe (TH). Für den Bereich der Wasserchemie sollen im Weiteren die anhand des Modelldachsystems ermittelten Schwermetall-Konzentrationen in den Dachabläufen Ergebnissen von realen Dachflächen mit gealterten Zink- bzw. Kupfereindeckungen gegenüber gestellt werden, um die Übertragbarkeit des Modellsystems auf urbane Bereiche zu untersuchen und um schließlich zu einer großflächigen Bilanzierung zu gelangen. Die erzielten Ergebnisse der Dachflächenklassifikation zeigen die prinzipielle Eignung des vorgestellten Ansatzes zur Charakterisierung von Dachflächen. Für die Zukunft sind weitere Untersuchungen eines größeren Innenstadtbereichs geplant, wodurch eine Verifikation des Ansatzes erfolgen soll. Der Campusbereich zeichnet sich durch seine großflächigen Strukturen aus, jedoch gibt es gerade hier Störungen durch Aufbauten. Die für die weiteren Untersuchungen zur Verfügung stehenden Datensätze umfassen Bereiche mit kleineren geometrischen Strukturen und sicherlich auch mit einer größeren Anzahl von verwendeten Dachmaterialien. Begleitend zu den Untersuchungen hinsichtlich des segmentbasierten Ansatzes sollen auch pixelbasierte Verfahren unter Nutzung geometrischer Information betrachtet werden, sodass ein Vergleich dieser Ansätze möglich ist.

5 Literaturverzeichnis

- BOCHOW, M., GREIWE, A. & EHLERS, M., 2003: Ein Prozessmodell zur Analyse von Hyperspektraldaten in urbanen Gebieten. In: Vorträge 23. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF, Bochum, S. 255-264
- BRAND, S., 2005: Use of hyperspectral and laser scanning data for urban material mapping: comparison of a pixel-based and an object-based classification approach. In: Proceedings of 4th EARSeL Workshop on Imaging Spectroscopy "Imaging Spectroscopy. New quality in environmental studies" 27-29 April 2005, Warschau. (zur Veröffentlichung anstehend)
- DELL'ACQUA, F. & GAMBA, P., 2003: Using image magnification techniques to improve classification of hyperspectral data. In: IGARSS 2003, Toulouse, CD-ROM
- FÖRSTER, J., 1996: Patterns of roof runoff contamination and their potential implications on practice and regulation of treatment and local infiltration. In: Wat. Sci. Tech., Vol. 33, Nr. 6, S. 39-48
- FÖRSTER, J. & HERRMANN, R., 1996: Eintrag und Transport von organischen Umweltchemikalien über verschiedene Dächer in das Kanalsystem. In: Beichert et al. (Eds.): Stoffaustrag aus Kanalisationen, Verlag Chemie, Weinheim, S. 24-42
- FREITAG, G., FRIMMEL, F. H. & QUENTIN, K.-E., 1986: Zum Einfluß der Auffangsysteme auf die Zusammensetzung von Niederschlagsproben. – eine Fallstudie. Z. Wasser-Abwasser- Forschung 19: 103-106.
- HAITZER, M., HÖSS, S., TRAUNSPURGER, W. & STEINBERG, C., 1998: Effects of dissolved organic matter (DOM) on the bioconcentration of organic chemicals in aquatic organisms – a review. In: Chemosphere, Vol. 37, S. 1335-1362
- HEIDEN, U., ROESSNER, S. & SEGL, K., 2001: Potential of hyperspectral HyMap data for

- material oriented identification of urban surfaces. In: *Remote Sensing of Urban Areas*, Regensburger Geographische Schriften, Vol. 35, S. 69-77
- HOUMAYOUNI, S. & ROUX, M., 2004: Hyperspectral image analysis for material mapping using spectral matching. In: *IAPRSIS*, Vol. 35, Part B (Comm. VII), CD-ROM
- LEMP, D. & WEIDNER, U., 2004: Use of hyperspectral and laser scanning data for the characterization of surfaces in urban areas. In: *IAPRSIS*, Vol. 35, Part B (Comm. VII), CD-ROM
- MADHOK, V. & LANDGREBE, D., 1999: Supplementing hyperspectral data with digital elevation. In: *IGARSS 1999*, Hamburg, CD-ROM
- QUINT, F. & LANDES, S., 1996: Colour aerial image segmentation using a bayesian homogeneity predicate and map knowledge. In: *IAPRS*, Vol. 31, Part B4, S. 663-668
- SHU, P., 1997: *Zum Verhalten ausgewählter Schadstoffe in urbanem Niederschlag und Dachabfluss*, Shaker Verlag, Aachen
- STEINLE, E. & VÖGTLE, T., 2001: Automated extraction and reconstruction of buildings in laser-scanning data for disaster management. In: E. Baltsavias et al. (eds.): *Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images (III)*, Swets & Zeitlinger, Lisse, The Netherlands, ISBN 90 5809 252 6, S. 309 - 318
- VÖGTLE, T. & STEINLE, E., 2000: 3D modelling of buildings using laserscanning and spectral information. In: *IAPRS*, Vol. 33, Part B3, S. 927-934

Untersuchungen zur Aktualisierung topographischer Datenbestände durch multitemporale Auswertungen von IKONOS-Daten

ANDREAS BRUNN¹, MICHAEL SCHÄFER¹ & CHRISTIAN FISCHER¹

Zusammenfassung: Im Rahmen einer Projektbearbeitung zur Umweltüberwachung bergbaulicher Vorhaben erfolgten Untersuchungen zur Auswertung von hochauflösenden IKONOS-Daten mit dem Ziel, die regelmäßige Aktualisierung vorhandener Vektordatenbestände zu unterstützen. Insbesondere die Notwendigkeit der regelmäßigen Überprüfung und gegebenenfalls Aktualisierung großmaßstäbiger Datensätze zur Beschreibung von Landnutzungsarten und Biotoptypen erfordert die Entwicklung von robusten und wirtschaftlichen Verfahren. Ein Ziel der Untersuchungen ist die Unterstützung von Kartierungen durch Bereitstellung von aktuellen Daten zur geometrischen Situation im Untersuchungsgebiet und zur zielgerichteten Kontrolle ausgewählter Flächen. Die entwickelten Ansätze dienen damit der Unterstützung fachgutachterlicher Arbeiten und bilden eine inhaltliche Ergänzung zu vorhandenen terrestrischen Beobachtungskonzepten und Erfassungsmethoden und unterstützen deren Optimierung.

1 Einleitung

Gesetzliche Anforderungen zur Umweltüberwachung bergbaulicher Aktivitäten und von Vorhaben zur Rohstoffgewinnung machen es erforderlich, umfangreiche Geodaten zu erheben und im Rahmen von abbaubegleitenden Monitoringaufgaben zu analysieren. Aufgrund der oftmals großen Untersuchungsgebiete, in denen mögliche Veränderungen auftreten können, besitzt die integrative Nutzung unterschiedlicher Fernerkundungsdaten ein großes Potential. In Ergänzung zu bekannten Datenerhebungsverfahren zur Erfassung von Landbedeckungs- und Landnutzungsarten durch manuelle Luftbildinterpretationen oder durch Nutzung multispektraler bzw. hyperspektraler Bilddaten und deren Auswertung mit statistischen oder physikalischen Bildauswerteverfahren, wurde im Rahmen des Projektes untersucht, ob eine Aktualisierung vorliegender Vektordatenbestände durch die Auswertung von IKONOS-Daten erfolgen kann.

2 Problemstellung

Derzeit erfolgt eine Aktualisierung der vorhandenen Datenbestände in den potentiellen Auswirkungsbereichen des Bergbaus durch terrestrische Begehungen, sowie außerhalb dieser Bereiche durch manuelle Luftbildauswertungen. In Zukunft ist es geplant, im Rahmen eines abbaubegleitenden Monitorings ein Aktualisierungsintervall von zwei Jahren zu etablieren. Unter Berücksichtigung insbesondere wirtschaftlicher und zeitlicher Aspekte, sowie aus Gründen der Objektivierung ist es zur Unterstützung der terrestrischen Kartierarbeiten notwendig, ein Verfahren zu etablieren, das eine regelmäßige Bildauswertung zur Erfassung auftretender Veränderungen der Landbedeckungsstruktur ermöglicht und damit die fachgutachterlichen Kartierungen unterstützen kann.

¹ Dipl.-Geogr. Andreas Brunn, Dipl.-Geol. Michael Schäfer, Dr.-Ing. Christian Fischer, Institut für Geotechnik und Markscheidewesen, Technische Universität Clausthal, Erzstrasse 18, D-38678 Clausthal-Zellerfeld, e-Mail: (vorname.name)@tu-clausthal.de

Eine Erfassung topographischer Objekte durch Nutzung von IKONOS-Daten erscheint insbesondere dann möglich, wenn zusätzliche Informationen zur Verfügung stehen, die bei der Interpretation bzw. der Bildauswertung oder Bildsegmentierung genutzt werden können, vgl. GIANETTO et al. (2004) und KRISTÓF et al. (2002). Im Rahmen der Projektarbeiten stand allerdings weniger die Erfassung auftretender Veränderungen in der gleichen Informationstiefe wie die der vorliegenden Vektordaten im Vordergrund. Das Ziel des entwickelten Verfahrens ist es, unter Nutzung der jeweils zum Zeitpunkt der Auswertungen vorliegenden Vektordaten, die Flächen zu erfassen, die sich in ihrer geometrischen Ausprägung verändert haben. Diese erfassten Veränderungen dienen dann als Grundlage für die eigentlichen Kartierarbeiten. Als Referenzdatenbestand wurde ein Vektordatenbestand im Maßstab 1 : 5.000 gewählt. Der Datensatz beschreibt die im Untersuchungsgebiet auftretenden Biotypen. Die geometrische Grundlage basiert auf den Daten der Deutschen Grundkarte 1 : 5.000 wobei die Informationen in städtischen Bereichen auf der kartierten Realnutzung des Kommunalverbandes Ruhrgebiet beruhen.

3 Fernerkundungsdaten

Geometrisch hochauflösende Bilddaten stehen seit wenigen Jahren durch die Sensoren IKONOS und QuickBird zur Verfügung. Da zum Zeitpunkt der Projektbearbeitung eine Beschaffung von IKONOS Daten flexibler erschien, wurde trotz der geringfügig schlechteren Auflösung auf diese Daten zurückgegriffen und zwei Szenen vom Typ Carterra Geo beschafft. Es wurde auf eine möglichst geringe Wolkenbedeckung Wert gelegt, so dass die vom Anbieter angebotene Option zur Reduzierung der maximal zulässigen Wolkenbedeckung von 20 % auf 10 % gewählt wurde. Gleichzeitig wurde gefordert, dass der Sensor bei der Aufnahme nur gering verschwenkt sein darf. Die Spezifikationen der Datensätze können Tabelle 1 entnommen werden.

Tab. 1: Spezifikationen der beschafften IKONOS Daten

	2003	2004
Aufnahmedatum	10.08.2003	19.05.04
Geometrische Auflösung	1 m (pan sharpened)	1 m (pan sharpened)
Wolkenbedeckung	0 %	< 10 %
Aufnahmewinkel	> 72°	> 72°
Aufgenommene Fläche	ca. 100 km ²	ca. 100 km ²

Die erreichbaren Kartenmaßstäbe ergeben sich aus der geometrischen Auflösung der Bilddaten, der erreichbaren Lage- und Höhengenaugigkeit sowie aus der Identifizierbarkeit topographischer Objekte. Bei der geometrischen Bewertung wird im Allgemeinen von folgenden Anforderungen ausgegangen:

- Die Zeichengenaugigkeit für topographische Objekte bei der Erstellung einer Strichkarte beträgt 0,2 mm.
- Zur Erfassung des Informationsgehaltes ist eine Pixelgröße von 0,05 bis 0,1 mm im Kartenmaßstab erforderlich. Hierbei muss allerdings berücksichtigt werden, dass der Informationsgehalt von den radiometrischen Verhältnissen der Bilddaten abhängig ist.

Bei der Pixelgröße von 1 m ergibt sich damit ein möglicher Kartenmaßstab von 1 : 10.000 bis 1 : 20.000. Damit wird deutlich, dass die Genauigkeit nicht der begren- zende Faktor ist, vgl. auch 4.1. Die Begrenzungen des Informationsgehaltes werden insbesondere bei der Betrachtung städtischer Bereiche deutlich, da hier eine Auswer- tung zur thematischen Fortführung der Biotoptypenkartierung nicht möglich ist. Ebenso ist zu erwarten, dass Veränderungen von Flächen bei insbesondere kleinräumig struktu- rierten und linienhaften Biotopen nicht erfasst werden können.

4 Bildverarbeitung

Aufgrund der in der Praxis zu erwartenden zeit- und personalintensiven Auswertung der Daten erschien es notwendig, möglichst teil-automatisierte und robuste Verfahren zur Bildauswertung zu entwickeln. Gleichzeitig sollten die Verfahren flexibel und erweiter- bar sein, um die zunehmende Verfügbarkeit an hochauflösenden Fernerkundungsdaten zukünftig, auch aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten, nutzen zu können. Um die Ver- änderungen zwischen zwei IKONOS-Bildern ableiten zu können, wurden verschiedene Ansätze und Verfahren untersucht. Folgende Parameter wurden aus den Bilddaten er- rechnet:

- Der Wert des Hue-Farbwinkels im zylindrischen IHS-Farbraum (vgl. 4.2),
- der selbstentwickelte Texturparameter Steigung, berechnet auf Basis der Intensi- tätswerte des IHS-Farbraums (vgl. 4.3),
- der Vegetationsindex GEMI (Global Environmental Monitoring Index) und
- der Vegetationsindex MSAVI (Modified Soil Adjusted Vegetation Index; vgl. 4.4).

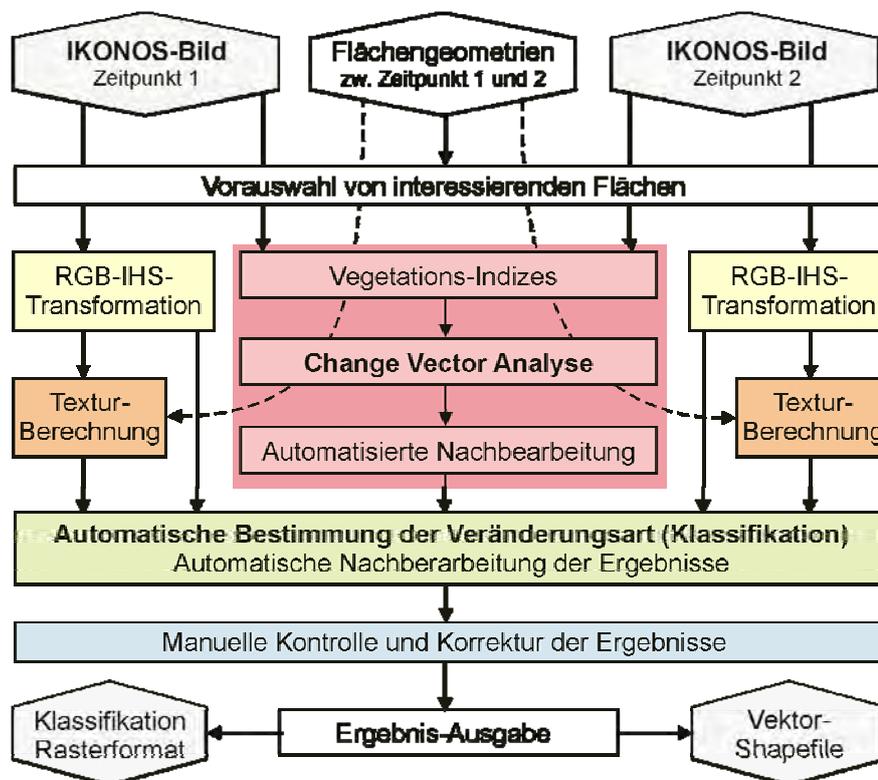


Abb. 1: Schematischer Ablauf der Veränderungsanalyse unter Nutzung von zwei IKONOS-Szenen

4.1 Georeferenzierung

SpaceImaging (SI) vertreibt hinsichtlich der Genauigkeit der Georeferenzierung unterschiedliche Produkte der jeweiligen Bilddatensätze. Das Basisprodukt Carterra Geo wird als ein auf eine Ebene mit konstanter Höhe projizierter Datensatz ausgeliefert. Alle genauer georeferenzierten Datenprodukte sind wesentlich teurer. Eine Berechnung der Bildorientierung ist grundsätzlich unter Nutzung der von SI vertriebenen rationalen Funktionen möglich, die den Zusammenhang zwischen den Bildpositionen und den Objektkoordinaten beschreiben (GRODECKI & DIAL, 2001). Allerdings werden diese Daten nur in Verbindung mit den jeweiligen Stereobildpaaren vertrieben. Für die Daten vom Typ Carterra Geo wird seitens SI eine Lagegenauigkeit von 15 m, bezogen auf die verwendete Ebene, angegeben. Die Genauigkeit wird dabei als CE90-Wert angegeben. Dieser Wert entspricht dem 2,1-fachen der Standardabweichung (JACOBSEN, 2002).

Die Georeferenzierung der IKONOS-Daten erfolgte unter Nutzung eines Luftbildorthophotomosaiks, welches das gesamte Untersuchungsgebiet von ca. 110 km² abdeckt. Die Befliegung der Luftbilder erfolgte in 2001 im Bildmaßstab 1 : 4.000. Auf Basis dieser Bilddaten wurde durch digital photogrammetrische Auswertungen ein Höhenmodell mit einer Rastermaschenweite von 5 m generiert. Die Lagegenauigkeit des DHM wurde mit $dx/dy < 5$ cm und mit einer Höhengenaugigkeit von ± 10 cm angegeben. Die IKONOS-Daten aus 2003 wurden über 72 Passpunkte in das Gauß-Krüger-Koordinatensystem polynomisch transformiert. Dazu wurden in einem ersten Schritt die UTM-Koordinaten der Szene in das von ERDAS IMAGINE vorgegebene GK-Datum transformiert. Da dieses Datum deutschlandweit gilt, musste mit hohen Restklaffungen an den Passpunkten gerechnet werden. Daher wurde unter Nutzung des Programmsystems BLUH (JACOBSEN, 2004) eine Pseudohöhe von 60 m ü. NN eingeführt und über eine Lageausgleichung die GK-Koordinaten ausgeglichen. Als Ergebnis lagen die ermittelten Abweichungen an den Passpunkten im Subpixelbereich. Die Daten aus 2004 wurden dagegen auf Basis des auf den Zeitpunkt 2004 aktualisierten DHM aus 2001 unter Nutzung der Funktionalitäten der Software „Leica Photogrammetry Suite“ (LPS) orthorektifiziert. Es wurden die gleichen Passpunkte verwendet. Die Abweichungen an den Passpunkten lagen ebenfalls im Subpixelbereich. Dieser Ansatz wird das zukünftige Standardverfahren zu Georeferenzierung weiterer Bilddaten sein. Insgesamt zeigte sich, dass die Georeferenzierung der Szenen für die Zeitreihenanalyse hinreichend genau war.

4.2 Farbraumtransformation

Da drei originären RGB-Bildkanäle untereinander stark korrelieren, wurde eine RGB zu IHS Farbraumtransformation durchgeführt (vgl. PALUS, 1998). Die Transformation dieser Bildkanäle in den **IHS**-Farbraum spaltet die redundanten Informationen in die drei linear unabhängigen Kanäle **I**ntensity, **H**ue und **S**aturation (Intensität, Farbwert, Sättigung) auf. Der Hue-Wert des IHS-Farbraums beschreibt dabei alle Farben als Winkelmaß zwischen 0 und 360°. Um die Ergebnisse der Transformation unterschiedlicher Datensätze vergleichen zu können, ist es erforderlich, die RGB-Ausgangsdaten vor der Transformation radiometrisch aufeinander anzupassen. Diese Anpassung erfolgt mit Hilfe eines „histogramm stretches“. Dabei wird eine Szene als Referenzszene (sog. „master“) definiert, auf die die zweite Szene (sog. „slave“) angepasst wird. Die Ergebnisse dieser Transformation werden bei der Bildanalyse zur Generierung von unterschiedlichen Parametern genutzt. Die wesentlichsten Schritte sind die Texturberech-

nung auf der Grundlage der Bildintensität und die Klassifikation der ermittelten Veränderungen mit Hilfe der Textur und dem Farbwert.

4.3 Texturberechnungen

Zur Ableitung des Parameters „Textur“ wurde folgender Ansatz entwickelt: Er errechnet sich nicht wie üblicherweise durch die Verwendung von zwei gegeneinander versetzten (Co-) Occurrence Matrizen, innerhalb derer das Auftreten von Pixel-Paaren gleicher Grauwerte untersucht wird (vgl. z. B. KOURGLI & BELHADJ-AISSA, 2000), sondern im Gegensatz dazu wird die Änderung der Intensität in der Umgebung eines zentralen Pixels in bis zu 16 verschiedenen Richtungen auf lokale Minima und Maxima hin untersucht. Der Textur-Parameter Steigung errechnet sich damit als die relative entfernungsnormierte Differenz zwischen den Minima und Maxima, gemittelt über alle betrachteten Richtungen (s. Abb. 2).

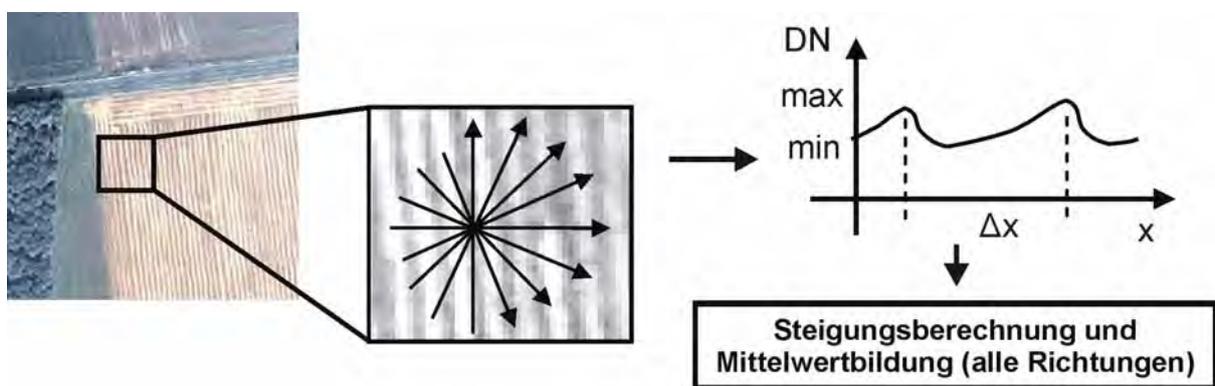


Abb. 2: Veranschaulichung der Texturberechnung in 8 Richtungen

Um mögliche Verwischungseffekte im Randbereich von unterschiedlichen Landbedeckungen zu vermeiden, erlaubt der Algorithmus bei Bedarf die Angabe von geometrischen Flächengrenzeninformationen, so dass dann die Berechnung des Texturparameters auf die benachbarten Pixel beschränkt ist, die zur Fläche des zentralen Pixels gehören. Trifft der Algorithmus in einer Richtung auf eine Flächengrenze, so werden die Minima und Maxima ausschließlich in den entgegengesetzten Richtungen gesucht.

4.4 Change Vector Analyse (CVA)

Zur Bestimmung von auftretenden thematischen Veränderungen kommt eine modifizierte Change Vector Analyse (CVA) zum Einsatz, die sich hier auf zwei Vegetationsindizes stützt (vgl. LORENA et al., 2002 und NACKAERTS et al., 2005). Hierzu werden zunächst für jeden Datensatz des Bildpaares die Indizes GEMI und MSAVI berechnet (vgl. Formeln 1 und 2; die angegebenen Abkürzungen beziehen sich auf die entsprechenden Kanäle der Bilddatensätze):

$$MSAVI = \frac{2 \cdot NIR + 1 - \sqrt{(2 \cdot NIR + 1)^2 - 8 \cdot (NIR - Red)}}{2} \quad (1)$$

und

$$GEMI = \eta \cdot \left(1 - \frac{1}{4} \cdot \eta\right) - \frac{Red - 0.125}{1 - Red} \quad (2)$$

mit: $\eta = \frac{2 \cdot (NIR^2 - Red^2) + 1.5 \cdot NIR + 0.5 \cdot Red}{NIR + Red + 0.5}$

Der nicht-lineare Index GEMI minimiert gegenüber dem üblicherweise verwendeten Vegetationsindex NDVI deutlicher die relativen Einflüsse der atmosphärischen Effekte auf die Vegetationsrückstreuung (PINTY & VERSTRAETE, 1992). Der MSAVI-Index minimiert dagegen die Einflüsse des Bodensignals auf das Vegetationssignal (QI et al., 1994). Für die Durchführung der CVA werden diese multitemporalen Vegetationsindizes in ein Koordinatensystem aufgetragen und die Entfernung (Dist) zwischen den beiden Punkten sowie der eingeschlossene Winkel (α) berechnet (vgl. Abb. 3, sowie Formeln 3 und 4).

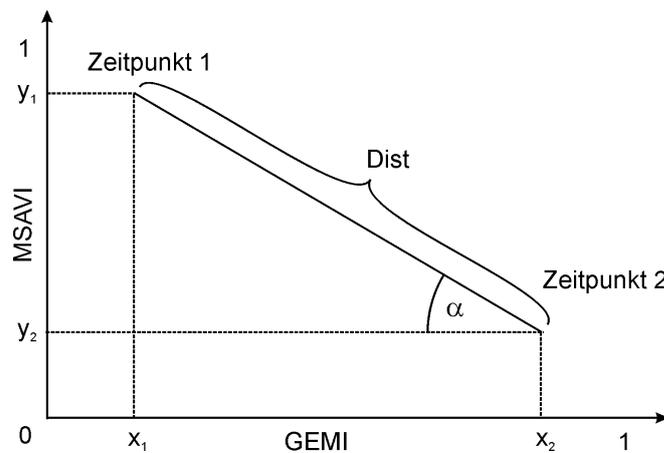


Abb. 3: Schematische Darstellung des CVA-Verfahrens

$$Dist = \sqrt{(y_1 - y_2)^2 + (x_1 - x_2)^2} \quad (3)$$

$$\sin(\alpha) = (y_2 - y_1) / Dist \quad (4)$$

mit: Dist = Euklidische Distanz
 x_1 = GEMI Zeitpunkt 1
 x_2 = GEMI Zeitpunkt 2
 y_1 = MSAVI Zeitpunkt 1
 y_2 = MSAVI Zeitpunkt 2

5 Auswertungen und Ergebnisse

Basierend auf den Ergebnissen der CVA werden mit Hilfe von durch den Nutzer zu definierende Schwellwerte die Flächen abgeleitet, für die relevante geometrische Veränderungen erfasst wurden. Als Nachbearbeitungsschritt erfolgt eine Segmentierung der Flächen mit Hilfe eines Scanline-Algorithmus, wobei kleine Flächen unter einer ebenfalls vom Nutzer anzugebenden Flächengröße verworfen werden. Es hat sich gezeigt, dass Veränderungsflächen mit einer Größe von unter 20 m² keine Relevanz besitzen

und zumeist durch veränderte Aufnahmebedingungen (wie z. B. unterschiedlichen Schattenwurf) verursacht worden sind.

Anschließend erfolgt die automatische Bestimmung der Veränderungsart durch eine Klassifikation der Veränderungsflächen, basierend auf den Informationen des Hue-Farbwertes und der Textur der Bilddaten. Folgende Veränderungen werden durch das System automatisch erfasst:

- keine Veränderung,
- Wald \Rightarrow Wasser,
- Wald \Rightarrow Bebauung,
- Wald \Rightarrow Rodung / Lichtung,
- Wald \Rightarrow „undefiniert“,
- Freiland \Rightarrow Wasser,
- Freiland \Rightarrow Bebauung,
- Freiland \Rightarrow Abgrabung,
- Freiland \Rightarrow „undefiniert“.

Unter „Freiland“ werden dabei unversiegelte Flächen außerhalb geschlossener Ortschaften verstanden, die keine Wald- und Wasserflächen sind. Als nachfolgender Schritt werden vergleichsweise große Flächen durch Angabe eines Schwellenwertes in einem automatischen Nachbearbeitungsschritt erneut analysiert (s. Abb. 4). Dies betrifft überwiegend landwirtschaftlich genutzte Flächen, die aufgrund eines unterschiedlichen Aufwuchses als Veränderungen erfasst worden sind. Hierbei werden die Flächen mit Hilfe des Textur-Parameters auf innere Inhomogenitäten hin untersucht. Treten statistisch markante Abweichungen vom errechneten Mittelwert der Fläche auf, so werden diese Teilbereiche als neue Veränderungsflächen definiert. Die ursprünglichen, großen Flächen werden dann nicht weiter betrachtet.

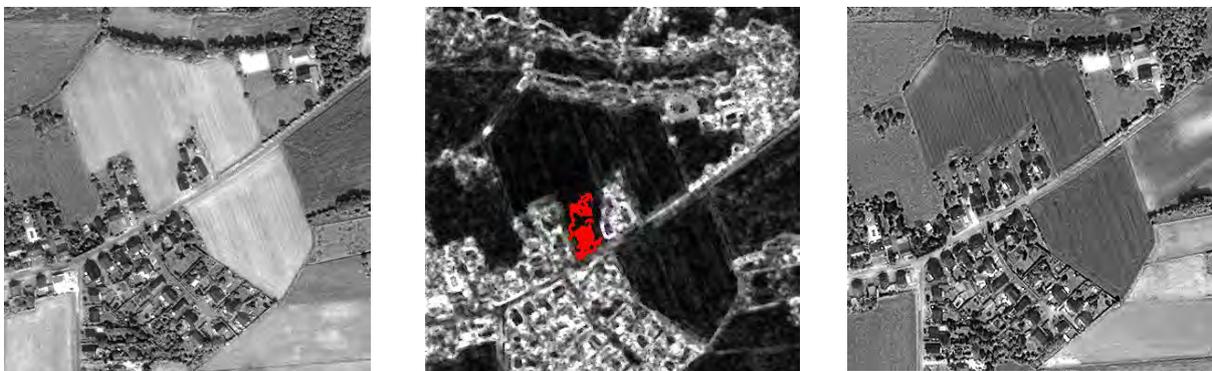


Abb. 4: Erfassung einer Bebauung auf einer landwirtschaftlich genutzten Fläche, die aufgrund unterschiedlicher Nutzungen in 2003 und 2004 als verändert charakterisiert wurde

Die Software ermöglicht eine einfache Korrektur der Veränderungsflächen und der klassifizierten Veränderungsarten sowie eine anschließende manuelle Kontrolle. Neben der Visualisierung der veränderten Flächen und der Anzeige der Veränderungsart, besteht die Möglichkeit zur Korrektur der automatisch detektierten Veränderungsarten und die Möglichkeit zur Zusammenfassung einzelner Veränderungsflächen. Durch diese Vorgehensweise muss der Anwender lediglich noch die automatisch detektierten Veränderungsflächen visuell überprüfen. Das Endergebnis kann als Klassifikationsergebnis in einem Raster-Format oder als Vektor-Shapefile ausgegeben werden. Dadurch wird die anschließende Einpflegung in eine GIS-Umgebung ermöglicht.



Abb. 5: Tool zur manuellen Nachbearbeitung der entwickelten Software

6 Schlussfolgerungen

Die aktuell verfügbaren geometrisch hochauflösenden Bilddaten des Sensors IKONOS besitzen das Potential für großmaßstäbige Bildauswertungen und können damit zur Aktualisierung vorhandener Datenbestände genutzt werden. Die Kombination der genutzten Verfahren erlauben eine detaillierte Erfassung von unterschiedlichen Veränderungsklassen und die Ableitung hinreichend genauer Vektordaten, die entweder direkt zur Aktualisierung vorhandener Datenbestände bzw. im Rahmen von zielgerichteten Feldkartierungen genutzt werden können. Eine Erweiterung oder Anpassung des vorgestellten Konzeptes und der entwickelten Routinen zur Nutzung von Daten weiterer aktuell oder zukünftig verfügbarer hochauflösender Sensoren erscheint ohne großen Aufwand realisierbar.

7 Danksagung

Die Arbeiten erfolgten im Rahmen eines Forschungsprojektes im Auftrag der Deutschen Steinkohle AG. Die Autoren möchten sich insbesondere bei Herrn Dipl.-Ing. Peter Vosen und Herrn Dipl.-Ing. Volker Spreckels, BG G - Servicebereich Standort- und Geodienste, für die umfangreiche Unterstützung bedanken.

8 Literaturverzeichnis

GIANINETTO, M., GIUSSANI, A., LECHI, G.M. & SCAIONI, M. (2004): „Fast Mapping“ from high resolution satellite images: a sustainable approach to provide maps for developing countries. – Proceedings XXth Congress of the ISPRS, Com. VI, 12-23 July, Istanbul (published on CD).

- GRODECKI, J. & DIAL, G. (2001): IKONOS Geometry Accuracy. – High Resolution Mapping from Space 2001. Joint Workshop of ISPRS Working Groups I/2, I/5 und IV / 7, Sept. 19 – 21, Hannover (published on CD).
- JACOBSEN, K. (2002): Auswertung von IKONOS-Aufnahmen. – Tagungsband der Wissenschaftlich-Technischen Jahrestagungen der DGPF, Band 11. SEYFERT, E. (Hrsg.): Zu neuen Märkten - auf neuen Wegen - mit neuer Technik. 22. Jahrestagung der DGPF, Neubrandenburg, 49-57.
- JACOBSEN, K. (2004): Programmsystem BLUH. – Institut für Photogrammetrie und GeoInformation Universität Hannover.
- KOURGLI, A. & BELHADJ-AISSA, A. (2000): Textural classification using textural signatures. – CANSANOVA, J. L. (Ed.): Remote Sensing in the 21st Century: Economics and Environmental Applications. Proceedings of 19 EARSeL Symposium. A.A. Balkema, 293-297.
- KRISTÓF, D., CSATÓ, É. & RITTER, D. (2002): Application of high-resolution satellite images in forestry and habitat mapping – evaluation of IKONOS images through a Hungarian case study – IAPRS & SIS, Vol. 34, Part 4, 602-607.
- LORENA, R.B., SANTOS, J.R., SHIMABUKURO, Y.E., BROWN, I.F. & KUX, H.J.H. (2002): A Change Vector Analysis Technique to Monitor Land Use / Land Use Cover in SW Brazilian Amazon: Acre State.
<http://www.isprs.org/commission1/proceedings/paper/00014.pdf>
- NACKAERTS, K., VAESEN, K. ET. AL. (2005): Comparative performance of a modified change Vector Analysis in Forest Change detection. – International Journal of Remote Sensing, 26 (5), 839-852.
- PALUS, H. (1998): Colour spaces. In: SANGWINE, S.J. & HORNE, R.E.N. (Ed.): The Colour Image Processing Handbook. – Chapman & Hall (Cambridge), 67-89.
- PINTY, B. & VERSTRAETE, M.M. (1992): GEMI: A non linear index to global vegetation from satellites. – Vegetation, 101, 15-20.
- QI, J., CHEHBOUNI, A., HUETE, A.R., KERR, Y.H. & SOROOSHIAN, S. (1994): A Modified Soil Adjusted Vegetation Index. – Remote Sensing of Environment, 48 (2), 119-126.

Kartierung von Trockenheitsfolgeschäden mit hochauflösenden Satellitenbilddaten

BIRGIT KLEINSCHMIT¹ & BODO COENRADIE¹

Zusammenfassung: Die extreme Trockenheit im Sommer 2003 führte z. T. zu großflächigen Schädigungen von Waldbeständen. Ein frühzeitiges und gezieltes forstwirtschaftliches Handeln erfordert in solchen Fällen großflächige Übersichtsinventuren. Für diese Anforderungen wurde ein automatisiertes Kartierungsverfahren zur Erfassung von Vegetationsveränderungen mittels hochauflösender Satellitendaten entwickelt. Es beruht auf der multitemporalen Analyse von multispektralen und multisensoralen Satellitenszenen (SPOT4 und SPOT5). Durch die ausschließliche Nutzung von Infrarot Kanälen und deren Normierung mittels Hauptkomponententransformationen sind zeitaufwendige radiometrische Kalibrierungen der verschiedenen Sensoren und Bildjahrgängen nicht zwingend erforderlich. Eine Verbesserung und Nutzungssteigerung konnte durch eine weiterführende Analyse im GIS vorgenommen werden. Der Verfahrensansatz zielt auf eine möglichst uneingeschränkte Auswahlmöglichkeit von optischen Satellitensensoren hoher und mittlerer Auflösung ab. Der hohe Automatisierungsgrad gewährleistet eine rasch durchführbare, großräumige Kartierung von Veränderungsflächen.

1 Einleitung

Die extreme Trockenheit des Sommers 2003 in weiten Teilen Zentraleuropas führte bereits im gleichen Jahr zu unmittelbaren Schädigungen von Wäldern. Für das Jahr 2004 wurden zunächst noch stärkere Folgeschäden prognostiziert. Nach Erfahrungen aus früheren Trockenperioden war unter anderem mit flächigem Absterben von Beständen oder Bestandesteilen, der Massenvermehrung von Borkenkäfern und anderen Insekten sowie Pilzschäden in geschwächten Beständen zu rechnen. Entsprechende Dürreschäden wurden bereits in 2003 aus Teilen Deutschlands, der Schweiz und Österreich gemeldet (KLEINSCHMIT & KENNEWEG 2004).

Ein frühzeitiges und gezieltes forstwirtschaftliches Handeln erfordert in solchen Fällen großflächige Übersichtsinventuren über den Waldzustand. Mit dem Ziel eines schnellen Überblicks können terrestrische Aufnahmen durch den Einsatz von Fernerkundungsmethoden er-

¹ Prof. Dr. Birgit Kleinschmit, Dr. Bodo Coenradie, Institut für Landschaftsarchitektur und Umweltplanung, TU Berlin, Franklinstr. 28/29, FR 2-6, 10587 Berlin, E-Mail: birgit.kleinschmit@tu-berlin.de, coenradie@ile.tu-berlin.de

gänzt oder teilweise ersetzt werden. Im Auftrag des Sächsischen Landesforstpräsidiums (LFP) in Graupa wurde am Institut für Landschaftsarchitektur und Umweltplanung, am Fachgebiet für Geoinformationsverarbeitung, der TU Berlin geprüft, inwieweit eine möglichst kostengünstige und praktikable Nutzung von hochauflösenden Satellitenbilddaten zur automatisierten Erfassung von Dürreschäden und Trockenstress von Wäldern möglich ist. Für die Pilotstudie wurde das Nadel- und Laubwald geprägte Forstamt Tharandt im Südwesten von Dresden ausgewählt.

Ein bedeutendes Problem in der Umweltbeobachtung mit optischen Satellitensystemen ist die kurzfristige Szenenverfügbarkeit für zeitnahe Erfassen, Analysieren und Monitoring von Schadensereignissen. Eine hohe Flexibilität bei der Szenenauswahl ist daher eine wichtige Voraussetzung für die operationelle Anwendung von Fernerkundungsverfahren. Für die Kartierung von Trockenheitsfolgeschäden wurde daher ein multitemporaler Lösungsansatz angestrebt, der Multisensorauswertungen und den optionalen Rückgriff auf Archivaufnahmen unterstützt.

2 Methodik

2.1 Datengrundlage

Für die Entwicklung des Auswertungskonzepts wurden SPOT4- und SPOT5-Szenen aus verschiedenen Jahren und Jahreszeiten kombiniert. Der Waldzustand am Ende der noch andauernden Trockenheitsperiode wird in einer SPOT5-Szene abgebildet (August 2003). In zwei SPOT4-Szenen ist das Untersuchungsgebiet in einer vergleichbaren phänologischen Phase vor sowie zu Beginn der Trockenperiode (August 2002, Juni 2003) erfasst.

Die zuvor geokodierten Satellitenszenen wurden einer topographischen Normalisierung unterzogen. Als Verfahren diente das Minnaert-Korrekturmodell (COLBY 1991), welche sich bereits mehrfach in Walduntersuchungen bewährt hat (u. a. BANKO 1997, SCHARDT et al. 2000, COENRADIE 2003). Da der Einfluss reliefbedingter Beleuchtungsunterschiede objektar-tenspezifisch variiert, wurden zwei jeweils auf Nadel- und Laubwald optimierte Normalisierungen der Ausgangsdaten vorgenommen.

Zur Effizienzsteigerung wurden neben den Daten des Forstlichen Informationssystems Sachsens (FGIS) weitere dem LFP landesweit und flächendeckend zur Verfügung stehende Geo-Daten (ATKIS-DLM25/ -DGM25, digitale Orthophotos) in den Auswertungsprozess integriert.

2.2 Vorüberlegungen

Dürreperioden bedingen verschiedenste Auswirkungen auf die Vitalität von Bäumen und Beständen, die zeitlich und räumlich eng miteinander verzahnt sind:

- akuter Trockenheitsstress (verminderter Wassergehalt in Blattorganen, Verringerung der Transpiration),
- Blattverfärbung und Blattverlust (dauerhafter bzw. intensiver Trockenstress) und
- Auflichtungen und Verlichtungen (sehr starke Blattverluste, kleinparzelliges Absterben von Bäumen, flächenhafter Ausfall ganzer Bestände).

Für die Detektion gestresster Bestände sind Bestandesreflexionen zu analysieren, die Rückschlüsse auf die Wasserverfügbarkeit und den Bestandesschluss ermöglichen. Geeignete Satellitensysteme müssen daher neben Spektralinformationen des nahen Infrarots (höchster Informationsgehalt für Walddifferenzierungen) auch Spektralinformationen des mittleren Infrarots (zusätzliche Informationen für Vitalitäts- bzw. Feuchtedifferenzierungen) erfassen. Die hier ausgewählten SPOT-Systeme erfüllen diese Kriterien.

Eine fernerkundliche Kartierung von Trockenheitsfolgeschäden bzw. akutem Trockenstress liefert Verdachtsflächen, da eine ursächliche Abgrenzung nur bedingt möglich ist (z. B. „normaler“ Holzeinschlag - Entnahme von Käferbäumen). Dies erfordert ein zweistufiges Auswertungskonzept, bestehend aus einer automatisierten Auswertung der Satellitenbilder (Vorkartierung) sowie einer GIS-gestützten Nachbereitung und Interpretation der Kartierungsergebnisse (Nachkartierung).

Die Erfassung von Trockenheitsfolgeschäden wird als spezielle Form der Veränderungskartierung in Wäldern betrachtet. Zahlreiche Change Detection-Verfahrensansätze sind beschrieben, die zumeist über multitemporale Vergleiche zur Kartierung von Bestandesauflichtungen und Sturmwurfereignissen (u. a. KUNTZ & EBEL 2001, KAHABKA et al. 2001) bzw. von Insektenkalamitäten (u. a. HILL et al. 2000) beitragen. Zur automatisierten Erfassung von Veränderungen hat sich die Anwendung der Hauptkomponententransformation bewährt. Diese wurde unter anderem im Projekt „Monitoring of Changes in Biotope and Land Use Inventories in Schleswig Holstein and Denmark by means of Satellite Image Analysis and GIS - MoBio“ erfolgreich eingesetzt für kanalweise zeitliche Vergleiche (WEIERS et al. 1999). Im Projekt „Operationalisierung von Fernerkundungsdaten für die Umweltverwaltung des Landes Sachsen-Anhalt - OFULSA“ erfolgte eine methodische Anpassung und Erweiterung des MoBio-Ansatzes zur Lokalisierung von Veränderungsflächen in Waldgebieten (COENRADIE & KENNEWEG 2002). Dieser Verfahrensansatz wurde aufgegriffen und in ein mehrstufiges Auswertungsverfahren zur automatisierten Erfassung von Trockenheitsfolgeschäden integriert.

2.3 Automatisierte Kartierung

Um den Aufwand für Datenaufbereitung und -auswertung möglichst gering zu halten, wird auf absolute radiometrische Kalibrierungen der Daten verzichtet, die Veränderungskartierung beruht vielmehr auf einem relativen Szenenvergleich. Ferner macht die methodische Vorgehensweise eine Atmosphärenkorrektur nicht zwingend notwendig. VIS-Kanäle bleiben unberücksichtigt und ausschließlich IR-Kanäle, die den höchsten relevanten Informationsgehalt aufweisen, werden analysiert.

2.3.1 Normierung der Einzelszenen

Mit dem Ziel, mögliche Beeinträchtigungen der multitemporalen und multisensorale Vergleichbarkeit zu reduzieren, wird für jede Szene vorab mittels Hauptkomponententransformation (HKT) eine Merkmalsraumtransformation der IR-Kanäle vorgenommen. Diese bewirkt einen Normierungseffekt, der einen verbesserten relativen Vergleich von Satellitenbildern auf der Basis der transformierten Daten verspricht. Folgende Aspekte werden hierbei berücksichtigt:

- Reduzierung von „Pseudo-Veränderungen“: Liegen innerhalb einer Szene weitgehend homogene atmosphärische Bedingungen vor (Dunst), so werden unveränderte geschlossene Waldflächen im Szenenvergleich tendenziell „heller“ oder „dunkler“ abgebildet. Diese Veränderungen sind in etwa gleichgerichtet. Ähnliches gilt für phänologische Veränderungen in den Monaten Juni bis August, welche die Reflexionswerte von Wäldern geringfügig modifizieren können.
- Reduzierung sensorspezifischer Einflüsse: Sofern die räumlichen, spektralen und radiometrischen Auflösungen von gleichen Spektralkanälen verschiedener Aufnahmesysteme nur geringfügig voneinander abweichen, sind die spektralen Informationen von identischen (Wald-)Oberflächen positiv korreliert. Auch abweichende Reflexionswerte, die auf unterschiedliche radiometrische Empfindlichkeiten von Sensoren zurückgehen, sind gleichgerichtet.
- Hervorhebung von Auflichtungen und Schäden: Die originalen IR-Kanäle sind innerhalb von Nadel- oder Laubwäldern stark miteinander korreliert. Hierbei überwiegen tendenziell gleichgerichtete Reflexionen innerhalb von geschlossenen Beständen. Gegenläufige Reflexionen charakterisieren jüngere Bestände sowie Auflichtungen oder Schäden. Innerhalb geschlossener Bestände können erhöhte Werte im SWIR-Kanal auf starken Trockenheitsstress hindeuten.

Die Basis für die Berechnungen der statistischen Transformationsparameter bildet nicht die Gesamtszene (Standardverfahren), sondern ausschließlich Nadel- bzw. Laubwälder. Aus die-

ser objektartenoptimierten Transformation resultieren somit zwei Datensätze. Der neue Merkmalsraum wird von zwei weitgehend unkorrelierten Hauptkomponenten (HK) aufgespannt (Abb. 1). Entsprechend den Grundprinzipien der HKT (u. a. Informationsverdichtung, redundanzfreie Transformierte) verteilen sich die Informationen auf die 1. HK (positiv korrelierte gleichgerichtete Reflexionen) und 2. HK (vorwiegend negativ korrelierte Spektralinformationen; tendenziell gegenläufige Reflexionen).

Bei den Berechnungen kommt den absoluten Grauwerten eine nur geringe Bedeutung zu. In den nachfolgenden multitemporalen Szenenvergleichen werden daher solche Einflüsse, die zu einer gleichgerichteten Erhöhung oder Verringerung der vom Sensor empfangenen Messwerte führen, weitgehend eliminiert. Die Anwendung der Hauptkomponententransformation führt also zu einem Normierungseffekt.

2.3.2 Multitemporale Analyse

Die multitemporale Veränderungskartierung basiert auf der Analyse der jeweils 2. HK, da diese vor allem aufgelichtete sowie teilweise gestresste Bestände hervorhebt. Die synthetischen Kanäle sind innerhalb von Nadelholz oder Laubholz dominierten Waldflächen erneut sehr stark korreliert, da sie überwiegend ähnliche Informationen wiedergeben. Durch eine erneute Anwendung der Hauptkomponententransformation auf diesen multitemporalen Datensatz treten Veränderungsflächen innerhalb von Nadel- oder Laubwäldern deutlich hervor. In der 1. HK werden solche Informationen wiedergegeben, die zu den beiden Zeitpunkten nur geringfügig voneinander abweichen und sehr hoch korreliert sind. Es handelt sich um weitgehend „unveränderte“ Bildbereiche. In der 2. HK werden Informationen wiedergegeben, die in den Datensätzen mehr oder weniger stark voneinander abweichen. Es handelt sich um mehr oder weniger stark „veränderte“ Bildbereiche.

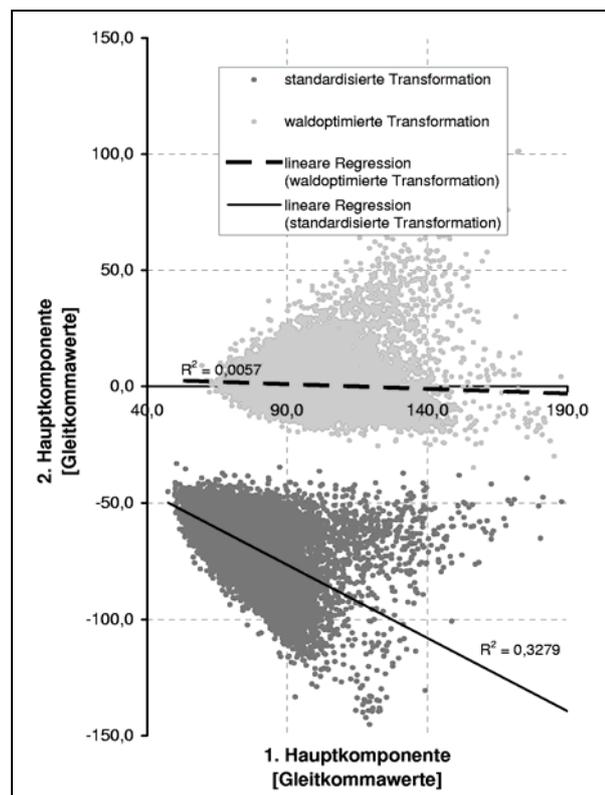


Abb. 1: Merkmalsraum der Hauptkomponententransformation - Standardverfahren, Objektoptimierung (aus COENRADIE et al. 2003)

Zur Extraktion potenzieller Veränderungsflächen erfolgt eine statistische Kategorisierung der zweiten Hauptkomponente, deren Histogramm nahezu eine Normalverteilung der Grauwerte zeigt (Abb. 2). Veränderungsflächen werden hiernach von Bildelementen wiedergegeben, die mehr oder weniger starke Abweichungen vom Mittelwert aufweisen. Mit zunehmender Standardabweichung steigt die Wahrscheinlichkeit, dass es sich um Veränderungsflächen handelt. Auflichtungen bzw. gestresste Bestände werden in helleren Graustufen (positive Standardabweichung) wiedergegeben. Auf der Basis der Standardabweichung wird eine Kategorisierung festgelegt (Tab. 1).

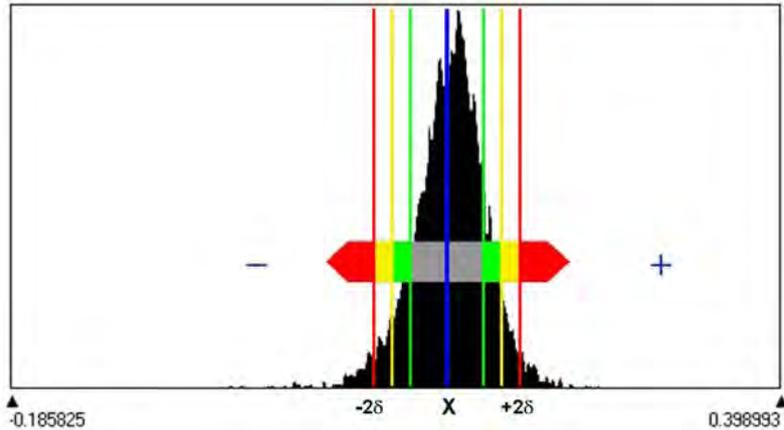


Abb. 2: Schema der statistischen Kategorisierung der 2. HK (Basis: arith. Mittel, Standardabweichung)

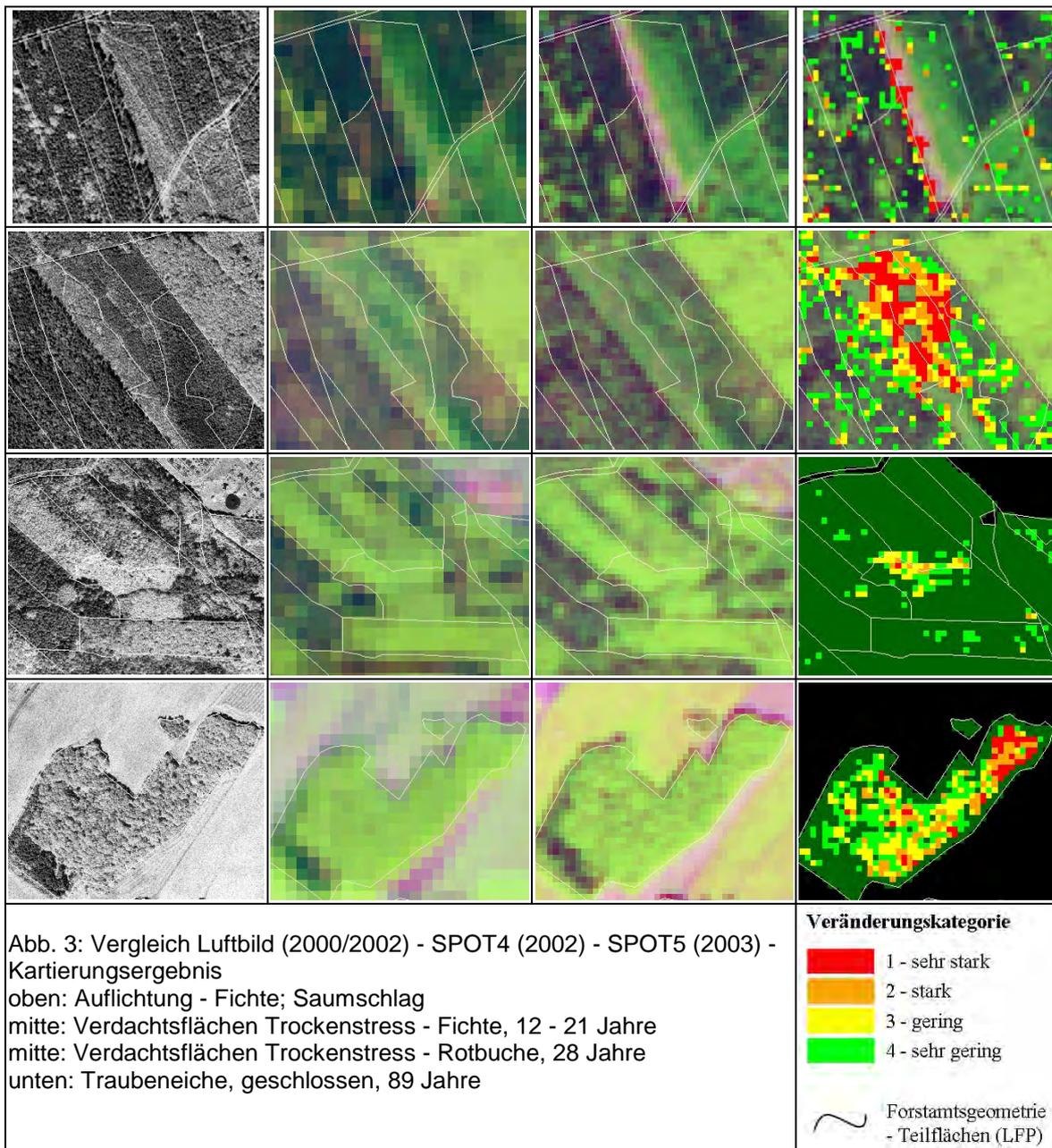
Tab. 1: Schwellenwerte für Veränderungskategorien

Kategorie	Festlegung (x, δ)	Veränderungsintensität
1	$> (X + 2,0\delta)$	sehr hoch
2	$> (X + 1,5\delta)$	hoch
3	$> (X + 1,0\delta)$	gering
4	$> (X + 0,5\delta)$	sehr gering

2.3.3 Ergebnis der automatisierten Kartierung - Vorkartierung

Als Ergebnis der automatischen Kartierung resultieren zwei sich ergänzende Kartierungen von potenziellen Verdachtsflächen: Auflichtungen sowie Bestandesteile mit potenziellem Trockenstress in Nadel- und in Laubholzbeständen. Exemplarische Ausschnitte des Kartierungsergebnisses, das aus dem Szenenvergleich von August 2002 und August 2003 hervorgeht, gibt Abbildung 3.

Zur Bewertung der Kartierungsergebnisse erfolgte eine Plausibilitätsprüfung unter Verwendung von Forsteinrichtungsdaten und Forstgrundkarten sowie Luftbildern und terrestrischen Kartierungen.



Hiernach sind Auflichtungen bzw. Verlichtungen erwartungsgemäß sehr gut lokalisierbar (sicherste Veränderungskategorien). Für die zuverlässige Lokalisierung von Auflichtungen wird eine Erfassungsuntergrenze von ca. 0,2 ha ermittelt. Eine Kartierung von kleineren Borkenkäfernestern ist auch bei der Auswertung von SPOT5-Daten nicht sicher möglich.

Verdachtsflächen für Trockenheitsstress sind zumeist durch schwach ausgeprägte Reflexionsänderungen charakterisiert. Die häufigen Konzentrationen auf Bestandestypen wie Jungwuchs, Dickungen, geschlossene Laub- und Laubmischwälder, Laubwälder auf steilen Südhängen lassen eine korrekte Kartierung plausibel erscheinen. Entsprechende Kartierungen konzentrieren sich zudem häufig auf Bestände, für die Borkenkäferbefall terrestrisch festge-

stellt wurde. Dies ist ein wichtiger Hinweis darauf, dass die entwickelte Methodik für ein frühzeitiges Erkennen von Risiko- bzw. Gefährdungsflächen beitragen kann.

2.4 GIS-basierte Verbesserungen der Kartierungsergebnisse

Verbesserungen der Kartierungsergebnisse sowie flächenbezogene Analysen setzen eine Verknüpfung der Auswertungsergebnisse mit forstlichen Fachdaten bzw. die Integration ins GIS voraus. Es eröffnen sich vielfältige Analysen nach Bestandes- und Standortparametern (z. B. Baumarten, Altersklassen, Bodenfeuchtezahl). Terrestrische Schadenskartierungen können zur Verifizierung beitragen oder die Satellitendatenanalyse ergänzen. Mit den Fachinformationen kann die Analysefläche weiter eingegrenzt und damit Fehlkartierungen reduziert werden. Mit exemplarischen Verschneidungen der Kartierungsergebnisse mit der Forstgrundkarte wurden statistische Aussagen für Flächeneinheiten (Basis: forstliche Teilfläche) abgeleitet.

3 Diskussion

Der Verfahrensansatz unterstützt eine multisensorale Auswertung sowie die Einbindung von Archivaufnahmen. Somit konnte ein zentrales Projektziel, eine möglichst hohe Flexibilität für die Szenenauswahl, erreicht werden. Die Erfassung von potenziellen Veränderungsflächen ist weitgehend automatisiert. Die Robustheit des Verfahrens ermöglicht die Kombination von Satellitendaten verschiedener räumlicher Auflösungen (5 m bis 20 m). Die Relation sollte jedoch einen Faktor 2 nicht überschreiten. Die Nutzung von aktuellen höchstauflösenden Systemen ist allerdings nicht möglich, da diese keine Spektralinformationen des mittleren IR liefern.

Bei einem Schadensereignis kann in kürzester Zeit die Verfügbarkeit und Eignung von Archiv-Szenen geprüft werden. Die Archivszene sollte das Untersuchungsgebiet in einer Phase mit „typischen / normalen“ Lufttemperatur- und Bodenfeuchteverhältnissen abbilden. Zur Minimierung phänologischer Einflüsse sind Szenen desselben Monats anderen vorzuziehen. Die „Trockenheitsstress“-Szene sollte die Situation während oder kurz nach der Dürreperiode festhalten. Die Aufnahmezeitpunkte der Szenenpaare sollten möglichst nicht mehr als zwei, maximal drei, Jahre auseinander liegen, da mit zunehmender Zeitspanne weitere Veränderungen erfasst werden.

Die automatisierte Kartierung von Auflichtungen und Verlichtungen ist zuverlässig. Vereinzelte Entnahmen von Käferbäumen sind aber nicht detektierbar. Die Lokalisierung von Bestandesteilen mit erheblich verringerter Wasserverfügbarkeit ist möglich. Da entsprechende Reflexionsänderungen von Waldbeständen schwach ausgeprägt sind, werden diese aufgrund der natürlichen Variabilität der Objektart „Wald“ von anderen Einflussgrößen teilweise über-

prägt. Vielversprechend sind flächenbezogene Analysen und Aussagen auf Bestandes- oder Teilflächenebene. GIS-Analysen verbessern die Qualität der (Vor-)Kartierungsergebnisse und ermöglichen ein gezieltes Monitoring von gefährdeten Beständen bzw. Risikoflächen.

Das Verfahren eignet sich sowohl für die Erfassung von flächigen Insektenkalamitäten als auch für die Kartierung von forstlichen Eingriffen. Darüber hinaus sollte das Auswertungskonzept auch eine Kartierung von Sturmwurfllächen unterstützen, entsprechende Tests konnten in der vorliegenden Studie jedoch nicht durchgeführt werden.

4 Literatur

BANKO, G., 1997: Waldoptimierte Korrektur von geländebedingten Beleuchtungsunterschieden in Landsat-TM-Daten. In: DOLLINGER, F. & J. STROBL (Hrsg.): Angewandte Geographische Informationsverarbeitung IX, Beiträge zum GIS-Symposium vom 2.-4. Juli 1997. Salzburger geographische Materialien, Heft 26, Salzburg, 1-10.

COENRADIE, B. & KENNEWEG, H., 2002: OFULSA - Operationalisierung von Fernerkundungsdaten für die Umweltverwaltung des Landes Sachsen-Anhalt - Teilvorhaben Wälder und Forsten. Endbericht zum Forschungsprojekt, BMBF-Förderkennzeichen 50EE9924, Berlin/Halle.

(http://www.delphi-imm.de/ofulsa/download/endbericht_forst.pdf).

COENRADIE, B.; HOFFMANN, K.; SAGISCHEWSKI, H.; KENNEWEG, H. & BRAUN, H., 2003: Abschlussbericht zum Forschungsprojekt „Verbessertes Waldzustandsmonitoring mit MOMS-Priroda Daten“. Landesforstpräsidium (Hrsg.), DLR-Förderkennzeichen 50EE9628, ISBN: 3-932967-28-3, Graupa.

COENRADIE, B., 2003: Waldzustandserfassung und -monitoring mit hochauflösenden Satellitenbilddaten. Dissertation, TU Berlin,

(http://edocs.tu-berlin.de/diss/2003/coenradie_bodo.pdf).

COLBY, J.D., 1991: Topographic Normalization in rugged Terrain. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 57, No. 5, 531-537.

HILL, J.; PEERENBOOM, H.G.; STÖVER, O.; ATZBERGER, C.; VOHLAND, M.; DIEMER, C.; BLÜMEL, A.; EGIDI, H. & ENGELS, F., 2000: Die Nutzung von MOMS-2P-Daten zur Waldzustandserfassung und Aktualisierung von Forsteinrichtungsdaten in Rheinland-Pfalz. Abschlussbericht, Universität Trier.

KAHABKA, H.; RAMMINGER, G.; SAIDANI, N.; DEES, M. & KOCH, B., 2001: Schadenserfassung nach Orkan "Lothar" mit Methoden der Fernerkundung. AFZ - Der Wald, 56. Jg., Heft 25, 1331-1334.

KLEINSCHMIT, B. & KENNEWEG, H., 2004: Luftbildinterpretation - Bäume im Stress. Wissenschaftsdienst der Technischen Universität Berlin, 5. Jg., Nr. 1, 5

(<http://www.tu-berlin.de/presse>).

- KUNTZ, S. & EBEL, U., 2001: Regionale Kartierung von Sturmschäden in Mitteleuropa. Photogrammetrie - Fernerkundung - Geoinformation, Heft 4/2001, 245-252.
- RICHARDS, J.A. & JIA, X., 1999: Remote Sensing Digital Image Analysis - An Introduction. Springer-Verlag, 3rd Edition, Berlin/Heidelberg.
- SCHARDT, M.; GALLAUN, H. & GRANICA, K., 2000: Fernerkundungsgestützte Methoden zum Waldmonitoring in den Alpen. In: GRUEHN, D.; HERBERG, A. & ROESRATH, C. (Hrsg.): Naturschutz und Landschaftsplanung - Moderne Technologien, Methoden und Verfahrensweisen. Festschrift zum 60. Geburtstag von Prof. Dr. Hartmut Kenneweg, Mensch & Buch Verlag, Berlin, 191-201.
- WEIERS, S.; MIELBY, S.; GROOM, G.; STJERNHOLM, M.; WISSEN, M.; BOCK, M.; SCHADE, B. & TSCHACH, E., 1999: Monitoring of Changes in Biotope and Land Use Inventories in Schleswig Holstein and Denmark by means of Satellite Image Analysis and GIS Technology - MoBio. Final Report, Köln (<http://www.dfd.dlr.de/extern/MOBIO/>).

Object Oriented Deforestation Mapping in Siberia – Results from the SIBERIA-II Project

SÖREN HESE & CHRISTIANE SCHMULLIUS

Abstract: This paper presents final results on forest change mapping in Siberia as part of the EU project SIBERIA-II (Multisensor Concepts for Greenhouse Gas Accounting of Northern Eurasia). SIBERIA-II aims to understand the greenhouse gas budget and its interaction with climate change in the Eurosiberian region. Monitoring and mapping of ARD processes (Afforestation, Reforestation, Deforestation) and related land cover changes is important for national carbon budget inventories (potential source and sink function of vegetation for CO₂) and for regional biosphere modelling. Due to the complex definition of Kyoto ARD (human induced change, landuse change with specific time interval definitions) the accurate classification of these change classes is a challenge for EO data analysis methods. Object oriented image processing offers some advantages compared with other methods although none of the available classification procedures can classify reliable the underlying causes of landuse changes. Two specific characteristics of the object oriented image analysis approach are analysed in this work for the differentiation of human induced deforestation and non-human induced changes: object shape characteristics of deforestation objects and class related context information of change features.

1 Introduction

The work presented in this paper is part of the EU project SIBERIA-II (Multi-Sensor Concepts for Greenhouse Gas Accounting of Northern Eurasia) (SCHMULLIUS & HESE, 2002; HESE et al., 2002; SANTORO et al., 2002). The scientific objective of the SIBERIA-II project is to integrate Earth observation information and biosphere process models such that full greenhouse gas accounting within a significant part of the biosphere can be quantified. Global estimates of the net carbon flux due to land cover changes are complicated by critical uncertainties like distribution and rate of deforestation and biomass burning, conversions from natural land cover and rate of reforestation and re-growth of deforested or burned land. The Kyoto Protocol (KP) carbon emission inventory is related to land cover changes with respect only to areas directly affected by human action through ARD (Afforestation, Reforestation, Deforestation) (SCOLE & QI, 1999).

It is important to differentiate the needs by the KP and by full carbon accounting (FCA). FCA accounts for all possible sources and sinks and not only for those related to ARD under a specific and restricting definition of forest.

Differentiation between natural and human induced forest changes (as required by the KP) is a complex task and asks for an analysis of underlying causes of disturbances. As noted already in SCOLE & QI (1999) forest management practices which change growth rates of forests and selective logging are not considered in the KP. Interpretation of the possible causes of forest changes is often impossible with Earth observation. Analysis of contextual and structural information using post classification analysis with contextual GIS analysis systems in multiple scales can however improve the potential of remote sensing for Kyoto ARD mapping.

Dr. Sören Hese, Prof. Dr. Christiane Schmallius, Earth Observation Section, Department of Geography, Friedrich-Schiller University Jena, Löbdergraben 32, 07743 Jena, e-mail: soeren.hese@uni-jena.de.

There will however remain restrictions to extract underlying causes of land cover changes with remote sensing. A combination of Earth observation with extensive ground truth and local forest enterprise information to deliver precise information to these questions is essential.

Different forest cover change detection approaches have been proposed in the past. COPPIN & BAUER (1994) analyzed vegetation indexes using standardized differencing and selective principal component analysis. 14 change features were generated and the Jeffries-Matusita distance for best minimum separability was used as a measure of best statistical divergence to select the best change feature dataset. COPPING & BAUER (1994) concluded that the most promising change features are the standardized difference of brightness, the second principal component of greenness, the second principal component of brightness, the second principal component of the green ratio and the standardized difference of greenness. This pointed towards the Kauth-Thomas brightness and greenness indexes and the green ratio as the vegetation indexes with the most relevant forest cover change information. It was also noted that analysis of change that is beyond the spectral-radiometric information would need the incorporation in a GIS framework with artificial intelligence capabilities. Other studies used direct multi-date classifications or hyper clustering (LECKIE et al., 2002), change vector analysis, parcel-based change detection procedures, artificial neural networks (GOPAL & WOODCOCK, 1996), cross-correlation analysis (KOELN & BISSONNETTE, 2000) and various post classification change detection methods. Important reviews of change detection methods have been published by SINGH (1989), COPPIN & BAUER (1996) and LU et al. (2004).

The object-based strategy for data classification (BAATZ & SCHÄPE (1999), BENZ et al. (2004)) uses as a first stage a segmentation into different scales of image object primitives according to spatial and spectral features. This segmentation is a bottom up region merging technique starting with one pixel sized objects. In numerous subsequent steps smaller objects are merged into bigger objects (pair wise clustering) minimizing the weighted heterogeneity of resulting objects using the size and a parameter of heterogeneity (local optimization procedure) (BENZ et al. 2004). This concept has the advantage to account for contextual information using image objects instead of the pixel based concept used frequently as the basic element in image processing. In a second stage rule-based decisions can be used to classify the multi scale image objects. Class based feature definitions (integrating a post classification analysis) are possible as well as the inheritance of class descriptions to form a class hierarchy. Image processing tasks can be performed using vector shape and vector characteristics. Results can be also analyzed and presented in vector format (polygons with attributes) instead of the raster cell format. This increases the flexibility of this image processing concept and integrates GIS-like data queries in an attribute database directly into the image processing and analysis approach. New attributes (like object shape or structural characteristics e.g. distance to other objects) can be used on the basis of the vector data format.

Object based image analysis has been used since 1999 for different forest classification approaches. HALOUNOVA (2004) used the object oriented approach to classify B&W aerial photos with textural features. YIJUN & HUSSIN (2003) classified tropical deforestation in East Kalimantan using the object oriented approach and MITRI & GITAS (2002) developed an object oriented classification model for burned area mapping. FLANDERS et al. (2003) tested the object oriented approach for cut block delineation.

Various advantages over pixel-based approaches have been published mainly using very high resolution airborne or orbital Earth observation data. The primary advantage of reducing spectral variability in high spatial resolution data sets (spatial resolution better than 1 m) is only one aspect of object oriented image analysis. For the development of change detection

procedures new GIS-like analysis concepts are important. Object shape in different scales based on a simplification through vectorisation can potentially be used to differentiate clear cuts from other deforestation processes that do not show specific object shapes with a high rectangular fit (HESE & SCHMULLIUS, 2004). Multi-scale object information can be used to increase the classification accuracy of classes that have to be defined using textural information instead of spectral information (e.g. the spectral variability in urban areas is preferably classified using larger objects). Class related classification can be used to build rules for complex neighborhood relations to already classified image objects. This can be used to function as a classification of object structure. Such an approach can be applied e.g. to connect the classification of clear cuts to the classification of linear road objects beyond a parent change class. Transportation is prerequisite for logging activities and can be used as GIS context information. Road networks that were created in forested areas are than secondary information for the detection of logging processes.

Using the class hierarchy with inheritance of features, simple change – no-change masks can be developed that provide a powerful global (inherited) approach for the adaptation to other data sets. One drawback of the combined use of post-classification procedures using class related features and direct two-date change detection in one procedure is the complex error propagation logic that can lead to unstable classification results.

2 Data

2.1 Earth Observation Data

Multi-temporal Landsat ETM and TM5 data was acquired from 1989 and 2000 covering areas in the Krasnoyarsky Kray and Irkutsk Oblast. To correct for path radiance in multi temporal data atmosphere correction algorithms were employed using algorithms from RICHTER (1996).

Table 1: Landsat TM5 and ETM data

Landsat-WRS2 Path/Row	Date	Cloud Coverage	Despiking 1989/2000	Forest Enterprise
135/21	1989/2000	0%/5%	yes/no	Shestakovsky
136/21	1989/2000	0%/25%	no/no	Primorsky
140/20	1990/2000	5%/0%	no/no	Chunsky
142/20	1989/2000	1%/5%	no/no	Bolshe-Murtinsky
143/20	1989/2002	0%/5%	yes/no	Bolshe-Murtinsky

Some Landsat data showed a “salt and pepper” effect which appeared randomly at different places in the image geometry and without correlation between the different sensor bands. This noise was corrected using a threshold based selective filter technique that changes the effected pixels to the mean of the surrounding 8 pixel values if a defined threshold is exceeded. Adjacent Landsat scenes were relative corrected to an atmosphere corrected multi temporal master scene using histogram matching techniques to allow the application of train-

ing areas and signatures to larger areas. Reprojection to the Siberia-II “Albers Equal Area Conical WGS84” projection was performed for all datasets.

2.2 Training and Validation Data

Ground truth information from test territories (Table 2) with extensive forest inventory data from forest enterprises in Russia is used for this analysis (on ground forest inventory and planning (FIP) for intensively managed forests). These datasets cover different regions in Siberia and provide information about e.g. stand age of dominant species, species composition, land category information, relative stocking, growing stock volume, species composition, height of dominant species and average tree diameter (breast height diameter).

Table 2: Forest inventory enterprises in Siberia for the forest cover change analysis (IIASA – International Institute for Applied Systems Analysis - GIS ground truth database).

Test Territories	East	North	East	North
Krasnoyarsky Krai				
Bolshe-Murtinsky	91.83	56.83	94.00	57.33
Chunsky	95.17	57.42	98.25	58.08
Irkutsk Oblast				
Primorsky	102.09	55.58	102.56	55.99
Shestakovsky	102.94	56.10	104.51	56.68
Juzhno-Baikalsky	103.08	51.33	104.75	51.83

3 Method

The first step in object oriented image analysis is the segmentation into object primitives using a bottom up region merging algorithm. Three different object levels are generated for the forest change detection approach using different thresholds for object merging based on multitemporal data from 1989 and 2000. The class hierarchy that is created is based on the primary segmentation levels. A change and no-change parent class is created using a simple standardized change ratio (COPPIN & BAUER, 1994) of the red Landsat band. Clouds, cloud shadows and water objects are classified with the brightness calculated for Landsat ETM and TM5. These classes are grouped together to form one class and are excluded from the change detection classification process.

The final forest change classification is done in the segmentation level with the smallest objects. Again a no-change and change “decision tree” is created using a standardized multi temporal change ratio of the red and the green channel. “Forestation on deforested areas” and “Deforestation” is classified using the multitemporal near infrared difference and NDVI thresholds. “Forestation on deforested areas” is defined as deforested in 1989 and reaching an age of 10 years in 2000. Deforestation is defined as not forested in 2000 but in a forest state in 1989. The classification is done using a NIR difference image and NDVI thresholds.

The human induced landuse conversion of agriculture land (that has not been forest before) to forested land is named “Afforestation”. For the classification of this specific change class differentiation of urban areas, agricultural used areas and forested areas in 1989 is important. To integrate this additional information into the change analysis system class related features are used. Using class related features a landuse change classification can be combined with a forest change mapping approach. A detailed explanation of the class hierarchy can be found in HESE & SCHMULLIUS (2004).

It should be noted that these class definitions do not follow exactly the definitions for Kyoto Afforestation, Reforestation and Deforestation. The improvement of an ARD-like classification system with Earth observation is still subject of ongoing research using context information to classify human induced changes and differentiate different types of changes. The remaining limitations to derive these class definitions using Earth observation (EO) have already been mentioned in this paper. Remote sensing data analysis techniques will in most cases not be able to reveal the causes of changes. Therefore a change detection system cannot successfully derive information about the accurate Kyoto ARD class definitions.

The spectral signature of clear cuts and older fire scars is very similar. Therefore differentiation should be done with additional non-spectral features. Object shape as an additional information is an important new feature type and could be used to differentiate logging activities from fire scar deforestation. However both types of forest change can be human induced (compare with Fig. 1). The description of a specific shape to detect logging activities is very difficult because only few clear cut objects show typical rectangular polygon shapes.

Some object shape descriptions following concepts of the software eCognition (DEFINIENS, 2004) are analysed:

- *Rectangular Fit (REF)*: describes the difference between a master rectangle and the considered object using the same measure of area, width and length for the master rectangle. The areas outside and inside of the master rectangle are compared (1 = complete fitting object, 0 = no fit).
- *Shape Index (SI)*: describes the smoothness of the image object borders and is calculated as the ratio of the border length e and four times the square root of the area A . It is similar to the fractal characteristic of the image object shape.

$$si = e / (4 \sqrt{A})$$

- *Number of Edges*: describes the number of polygon edges.
- *Degree of Skeleton Branching (DSKB)*: after the segmentation results are converted into polygons using the Douglas-Peucker algorithm the internal structure of the polygons can be derived using skeletons. The skeletons are created by performing a Delaunay triangulation of the polygon elements. Skeletons are then created by identifying the midpoints of the triangles and connecting them (DEFINIENS, 2004). A very high degree of skeleton branching is an indication of a complex and non-smooth polygon shape.

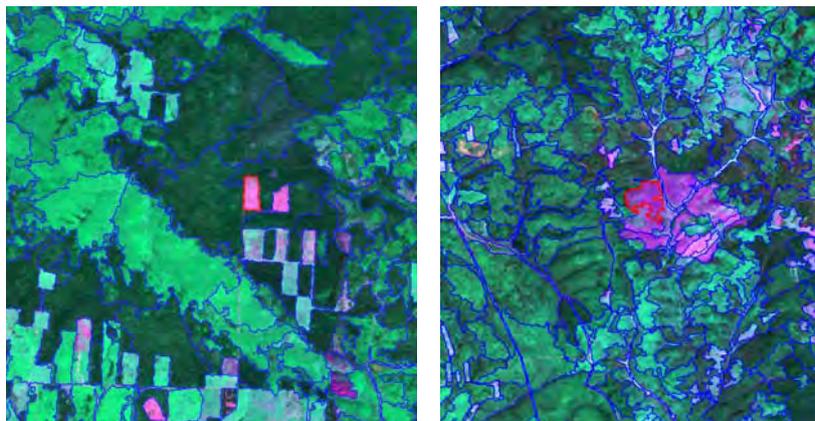


Figure 1: Left: segmentation of clear cut areas, right: fire scar area (Landsat ETM RGB: 543, Bolshe Murtinsky).

Analysing these object features for the differentiation of forest clear cuts and fire scars it was noted that none of these characteristics can differentiate clear cuts from fire scars completely. This is due to the heterogeneity of scale and shape of objects. Scale independent template matching techniques should be used that use context information and object structure from training scenarios for different regions. Comparing shape index and rectangular fit a good correlation is detected for both “clear cuts” and “fire scar” class objects but fire scar objects show a higher shape index than clear cut objects and do not reach higher rectangular fit values than 0.9 (Fig. 2).

Higher orders of SKB can be found together with much higher number of object edges at fire scar objects. SKB of order one or two only appear with clear cut objects (Fig. 3). Comparing the area statistics of fire scar and clear cut objects a differentiation is feasible (Fig. 4). Fire scar objects appear to have larger area values and as expected more polygon edges (Fig. 4). In this analysis outliers were not removed.

Shape as a description is a very complex attribute that is hard to parameterize. A new approach to object shape classification is clearly needed. Object shape should be described or classified using scale independent matching techniques that can be driven by a master object shape or possibly a master shape catalog for a specific object type.

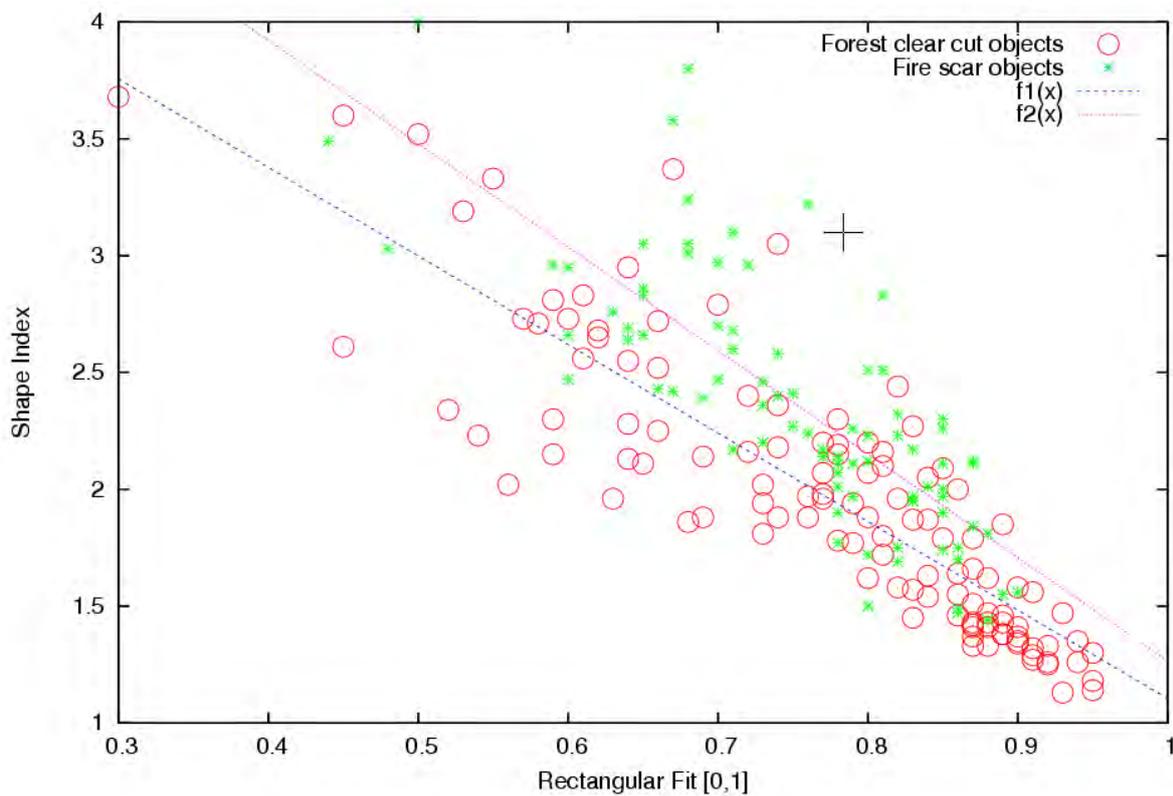


Figure 2: Polygon shape index vers. rectangular fit for fire scar objects ($R=-0.86$) and clear cut objects ($R=-0.79$)(Landsat ETM - Bolshe Murtinsky/Siberia) (medium scale object size). Outliers were not removed.

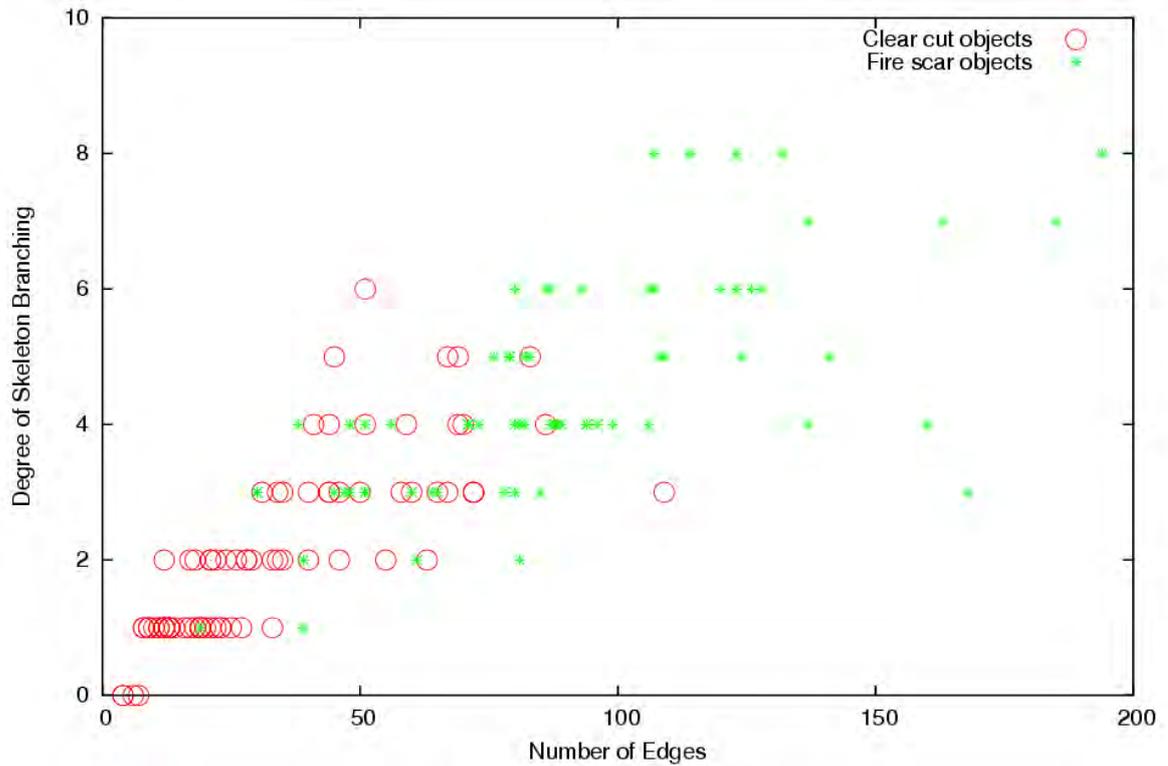


Figure 3: Degree of polygon skeleton branching vers. number of object edges for fire scar objects and clear cut objects in Siberia (Landsat ETM - Bolshe Murtinsky/Siberia) (segmentation layer with largest objects). Outliers were not removed.

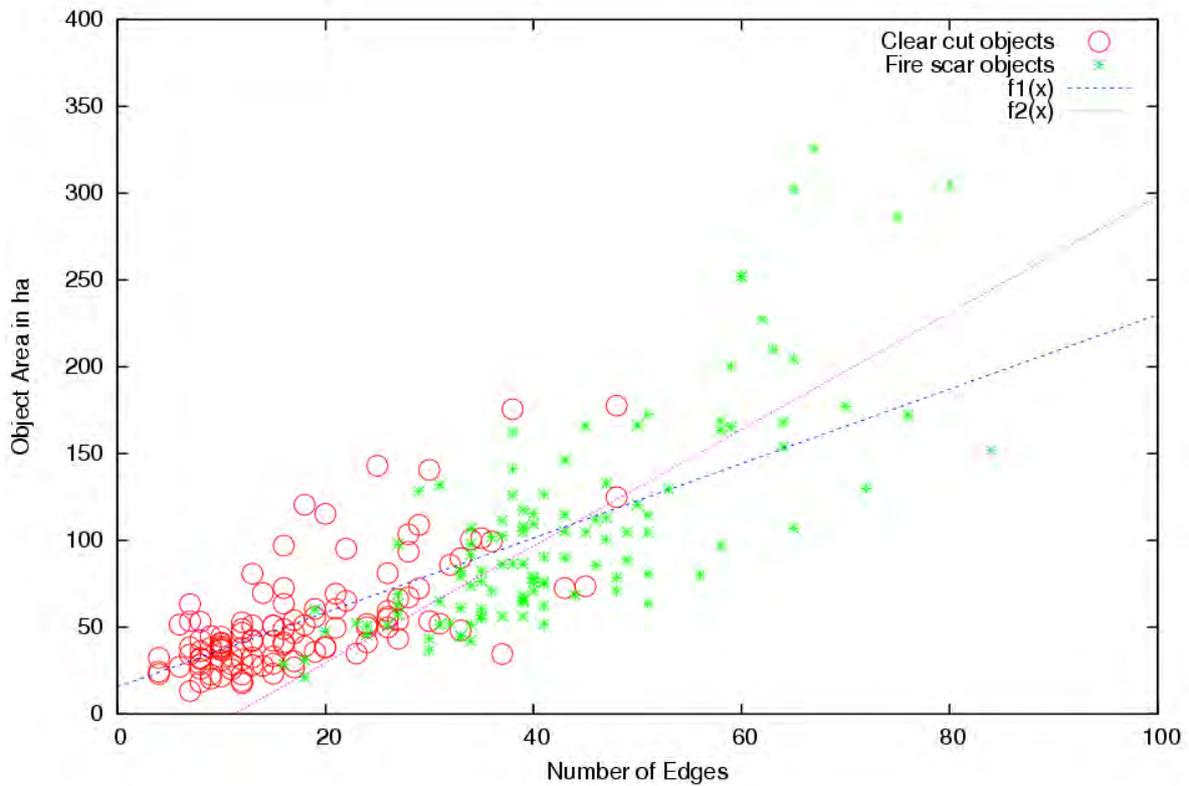


Figure 4: Object area vers. number of object (polygon) edges for fire scar objects and clear cut objects in Siberia (Landsat ETM - Bolshe Murtinsky/Siberia) (segmentation layer with smallest object size). Outliers were not removed.

4 Results and Discussion

Results of the forest change classification indicate deforestation between 57000 and 160000 ha per Landsat scene (no differentiation into clear cuts and fire scars). Regrowth of forest on deforested areas is slightly lower. Forest growth on former non-forested land (Afforestation) is neglectable (Table 3).

Results of the final classification of five different areas in the Krasnojarsk Krai in Siberia using larger datasets showed that the complex class hierarchy needed for detection of very specific changes cannot be easily transferred to other regions with different object scales and object context structure. Although the radiometry of the neighbouring datasets was changed to an atmosphere corrected multitemporal master dataset the class hierarchy had to be adapted. The differentiation into deforestation types logging and fire scars was possible within one region but not easily transferable to other regions. This was mainly due to the different object scales and heterogeneity of object shape in different regions. The final classification was not performed with this sub-differentiation. Use of context information - although promising for the stabilization of change classes - showed similar limitations when applied to other regions. The main potential of the object oriented approach for this work: the integration of complex shape, structure and context features shows in turn weaknesses when automatic application to large areas is needed. This is clearly the result of a complex hierarchical classification system that does not only pass on feature descriptions (inheritance) but does also pass on errors – creates a complex error propagation problem.

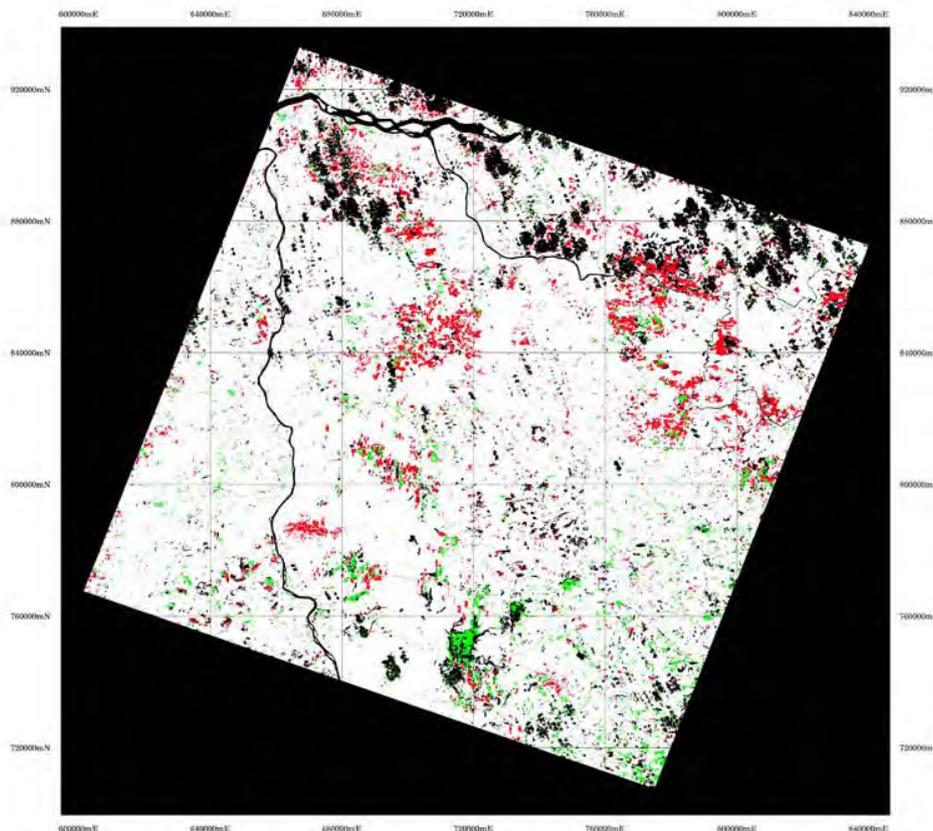


Figure 5: Example of a forest change map with deforested areas (in red), forestation on areas that have been forest before (in green) and forestation on areas that have not been forest before (in cyan) in the south of Siberia (Bolshe Murtinsky) Landsat WRS2: 142/20. Masked clouded areas, cloud-shadows and water areas appear in black.

Table 3: Forest change mapping results for selected forest enterprises in Siberia.

Test Territories	Cloud-Water-Mask (%/ha)	Deforestation (%/ha)	Regrowth (%/ha)	Forest growth on former non-forested land (%/ha)	No-change (%/ha)
Bolshe-Murtinsky (WRS2: 143-20)	2.17 (68684)	3.31 (104981)	3.2 (101454)	0.06 (1931)	89.55 % (2837849.5)
Chusky (WRS2: 142-20, 140-20)	5.58 (178128)	4.94 (157668)	2.34 (74761)	0.05 (1495)	83.59 (2669942.0)
	5.83 (189718)	4.15 (134878)	3.84 (124979)	0.20 (6386)	81.87 (2663196)
Primorsky (WRS2: 136-21)	12.53 (399370)	1.78 (56787)	1.16 (37049)	0.35 (11297)	74.26 (2365951)
Shestakovsky (WRS2: 135-21)	2.17 (68771)	3.12 (98851)	2.37 (74939)	0.00 (25)	90.91 (2880694)

Acknowledgements

This work is part of the project SIBERIA-II which is a shared-cost action financed through the 5th Framework Programme of the European Commission, Environment and Sustainable Development sub-programme, generic activity 7.2: Development of generic Earth Observation Technologies (Contract No. EVG1-CT-2001-00048).

References

- BAATZ, M. & SCHÄPE, A., 1999: Object-oriented and multi-scale image analysis in semantic networks, in: proceedings of the 2nd International Symposium: Operationalization of Remote Sensing, 16-20 August, ITC, NL, 1999.
- BENZ, U.C., HOFMANN, P., WILLHAUCK, G., LANGENFELDER, I. & HEYNEN, M., 2004: Multi-resolution, object-oriented fuzzy analysis of remote sensing data for GIS-ready information, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 58 (2004), 239-258, 2004.
- DEFINIENS AG, 2004: eCognition Users Guide, 2004.
- COPPIN, P.R. & BAUER, M.E., 1994: Processing of Multitemporal Landsat TM Imagery to Optimize Extraction of Forest Cover Change Features, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 32, No. 4, July, 1994.
- COPPIN, P.R., & BAUER, M.E., 1996: Digital Change Detection in Forest Ecosystems with Remote Sensing Imagery, *Remote Sensing Reviews*, 1996, Vol. 13, pp 207-234, 1996.
- FLANDERS, D., HALL-BEYER, M. & PEREVERZOFF, J., 2003: Preliminary evaluation of eCognition object-based software for cut block delineation and feature extraction, *Canadian Journal of Remote Sensing*, Vol. 29, No. 4, pp.441-452, 2003.
- GOPAL, S. & WOODCOCK, C., 1996: Remote Sensing of Forest Change using Artificial Neural Networks, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 34, no. 2, March 1996.
- HALOUNOVA, L., 2004: Textural classification of B&W aerial photos for the forest classification, *Remote Sensing in Transition*, Goossens (ed.), Millpress, Rotterdam, 2004

- HESE, S., SCHMULLIUS, C., BALZTER, H., CRAMER, W., GERARD, F., KIDD, R., LETOAN, T., LUCHT, W., LUCKMAN, A., MCCALLUM, I., NILSSON, S., PETROCCHI, A., PLUMMER, S., QUEGAN, S., SHVIDENKO, A., SKINNER, L., VENEVSKY, S. VOIGT, S., WAGNER, W., WEGMÜLLER, U. & WIESMANN, A., 2002: Sensor Systems and Data Products in SIBERIA-II - a Multi-Sensor Approach for Full Greenhouse Gas Accounting in Siberia, *ForestSAT proceedings*, Edinburgh, 5-9 August 2002, Forest Research, Forestry Commission, 2002.
- HESE, S., & SCHMULLIUS, C., 2004: Approaches to Kyoto Afforestation, Reforestation and Deforestation Mapping in Siberia using Object Oriented Change Detection Methods, GGRS 1st Göttingen GIS and Remote Sensing Days, Göttingen, Germany, 2004.
- KOELN, G., & BISSONNETTE, J., 2000: Cross-correlation analysis: mapping landcover change with a historic landcover database and a recent, single date multispectral image, in Proc. 2000 ASPRS Annual Convention, Washington D.C., 2000.
- LECKIE, D., WALSWORTH, N., DECHKA, J. & WULDER, M., 2002: An Investigation of Two Date Unsupervised Classification in the Context of a National Program for Landsat Based Forest Change Mapping, Proceeding of the International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS) and 24th Symposium of the Canadian Remote Sensing Society, June 24-28, Toronto, Canada, 2002.
- LU, D., MAUSEL, P., BRONDIZIO, E. & MORAN, E., 2004: Change detection techniques, *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 25, No.12, 2365-2407, 2004
- MITRI, G.H. & GITAS, I.Z., 2002: The development of an object-oriented classification model for operational burned area mapping on the Mediterranean island of Thasos using Landsat TM images, *Forest Fire Research and Wildlife Fire Safety*, Viegas (ed.), Millpress, Rotterdam, 2002.
- RICHTER, R., 1996: A spatially adaptive fast atmospheric correction algorithm, *Intern. Journal of Remote Sensing*, vol. 17, no. 6, 1201-1214, 1996.
- SANTORO, M., SCHMULLIUS, C., ERIKSSON, L. & HESE, S., 2002: The SIBERIA and SIBERIA-II projects: an overview, *Proceedings of SPIE*, vol 4886, SPIE Conf., Crete, Sept. 2002.
- SCHMULLIUS, C. & HESE, S., 2002: SIBERIA-II – an international Multi-Sensor Remote Sensing Project for Full Greenhouse Gas Accounting in the Boreal Region, *Proceedings of the DGPF annual meeting 2002*, Neubrandenburg, revised edition.
- SCOLE, D. & QI, J., 1999: Optical remote sensing for monitoring forest and biomass change in the context of the Kyoto Protocol, Workshop Paper 5 , *Remote Sensing and the Kyoto Protocol*, Workshop Report ISPRS WG VII / 5-6, Michigan USA, October 20-22. 1999.
- SINGH, A., 1989: Digital change detection techniques using remotely-sensed data, *Int. J. Remote Sensing*, Vol. 10, No. 6, 989-1003, 1989.
- YIJUN, C. & HUSSIN, Y.A., 2003: Object-oriented classifier for detection Tropical Deforestation using Landsat ETM+ in Berau, East Kalimantan, Indonesia, *Map Asia Conference 2003*.

Entscheidungsbasierte Datenfusion von multisensoralen Fernerkundungsdaten zur Erkennung von Siedlungsgebieten

Manfred Ehlers, Ulrich Michel, Guido Bohmann & Daniel Tomowski

*Zusammenfassung: Mit dem vorgestellten Verfahren ist es gelungen, auf der Basis vom multisensoralen Daten (SPOT und LANDSAT) in einem entscheidungsba-
sierten Netzwerk von Segmentierungsebenen mittels einer Klassifikation auf der
Basis von Textur-, Form- und multispektralen Parametern Siedlungsflächen er-
folgreich zu erfassen. Das vorgestellte Verfahren konnte, mit Ausnahme der Da-
tenvorverarbeitung und des letzten beschriebenen Arbeitsschritts, für die vorlie-
gende Datenbasis automatisiert werden.*

1 Einleitung

Das Wachstum der Siedlungs- und Verkehrsflächen betrug in den letzten Jahren bis zur Jahrtausendwende knapp 130 ha pro Tag. Verlässliche Datengrundlagen, sei es für die Entscheidungsfindung in der Politik oder für die Anwendung in der Stadt-, Regional- und Landesplanung sind Voraussetzungen für zielorientiertes Handeln. Bisherige Planungsunterlagen, ob in analoger (topographische Karten) oder digitaler Form (ATKIS) sind in aller Regel nicht auf dem neuesten Stand. Eine landesweite Aktualisierung durch terrestrische Erhebungen stellt einen nicht unerheblichen Zeit- und Kostenaufwand dar. Daher ist am Forschungszentrum für Geoinformatik und Fernerkundung der Universität Osnabrück auf Basis räumlich hoch aufgelöster Satellitendaten und multispektraler Informationen im Rahmen des Projekts „Landesweite Erfassung der Siedlungsflächen in Nordrhein-Westfalen“ ein semiautomatisches, wissensbasiertes Verfahren zur Klassifikation von Siedlungsflächen entwickelt worden. Ziel des Verfahrens ist die Erzeugung einer binären Maske (Siedlung/Nicht-Siedlung). Dabei wird Siedlungsfläche nach APEL et. al. (1995, S.29) als „die für Siedlungs- und Verkehrsfläche insgesamt in Anspruch genommene Bodenfläche“ verstanden, die „neben den bebauten Grundstücken und den Verkehrsflächen“ auch „Betriebsflächen, Sport- und Spielflächen, Stadtparkanlagen und Friedhöfe.“ enthält.

2 Datengrundlage

Auf Basis räumlich hoch aufgelöster Satellitendaten (SPOT 5 PAN, 5 m Ground Sampling Distance, Aufnahmedatum 16.3.03) sowie multispektraler Informationen (Landsat 7 ETM+, PAN: 15m Ground Sampling Distance, VNIR - SWIR: 30 m Ground Sampling Distance, TIR. 60 m Ground Sampling Distance, Aufnahmedatum 26.6.01) wurden Siedlungsbereiche in drei ausgewählten Testgebieten detektiert. Die panchromatischen Spot-Szenen wurden auf Basis einer TK 25 auf das Gauß-Krüger Koordinatensystem rektifiziert und auf die Pixelgröße von

5 m formatiert. Der aus der Berechnung resultierende RMSE (Root Mean Square Error) beträgt 2,5 Pixel, welches einer Lageabweichung von $\leq 12,5$ m entspricht. Die Landsat-Daten wurden auf Basis der Spot-Szene entzerrt und auf die Pixelgröße von 30 m resampled; der RMSE beträgt 0,53 Pixel (Lageabweichung < 16 m). Im Anschluss wurde die Pixelauflösung der multispektralen Daten unter Einbeziehung des panchromatischen Kanals der Landsat-Aufnahme auf 15 m angepasst. Für ein durch eine SPOT-Szene unterlegtes Testgebiet (Fläche: 3.856 ha) wird das Verfahren exemplarisch erläutert. Abbildung 1 zeigt das Testgebiet, bei dem es sich um einen Ausschnitt der westlich von Köln gelegenen Gemeinde Vettweiß handelt.

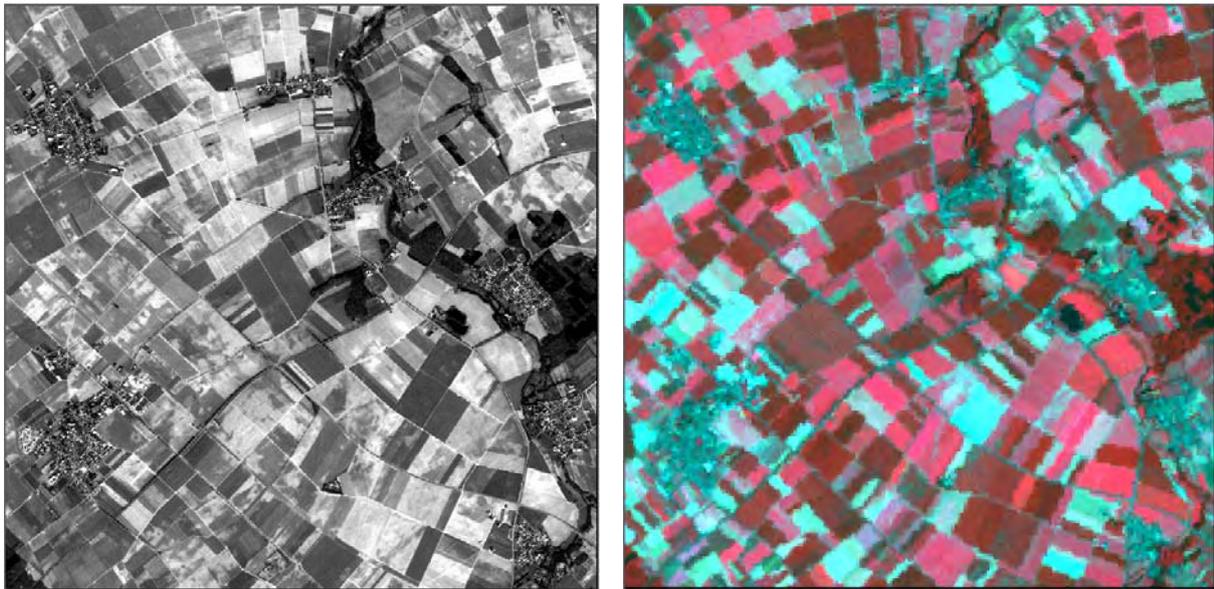


Abb. 1: Spot- und Landsataufnahme des Untersuchungsgebietes

3 Verfahren

Auf Basis von Spot-Szenen werden unter Einsatz der Software eCognition Segmente in drei unterschiedlichen großen Abstufungen (Level) erzeugt (Tabelle 1). BAATZ & SCHÄPE (2000) erläutern im Detail den Region-Growing-Algorithmus, mit dem die Erzeugung der erstellten Segmente erfolgt.

Tab. 1: Segmentierungseinstellungen in eCognition

	Scale	Color	Shape	Compactness	Smoothness
Level 3	48	0,7	0,3	1,0	0,0
Level 2	24	0,7	0,3	1,0	0,0
Level 1	12	0,7	0,3	1,0	0,0
Endlevel	12	1,0	0,0	0,0	0,0

Zweck dieser Unterteilung ist die Ermittlung der Siedlungsflächen durch ein hierarchisches Netzwerk von Segmenten (Abbildung 2). Beginnend im dritten Level werden zunächst potentielle Siedlungsflächen und Nicht-Siedlungsflächen bestimmt. Dies eröffnet im nächsten Schritt die Möglichkeit, bei der Klassifikation des zweiten Levels die bestimmten Nicht-Siedlungsflächen des dritten Levels ausschließen zu können. Analoge Vorgehensweise gilt auch für den ersten Level, bei dem die Nicht-Siedlungsflächen des zuvor ermittelten zweiten Levels als Ausschlussflächen für die Klassifikation des ersten Levels dienen.

Die Klassifikation beginnt zunächst im dritten Level. Für jedes Segment der Klasse „Siedlung“ wird neben standardmäßig ermittelten Textur- und Formparametern zudem aus den multispektralen Informationen ein durchschnittlicher NDVI berechnet. Da die (ggf. sehr) großen Segmente meist noch eine starke (spektrale) Heterogenität aufweisen, werden die Schwellwerte der limitierenden Parameter in jenem ersten Schritt entsprechend niedrig angesetzt.

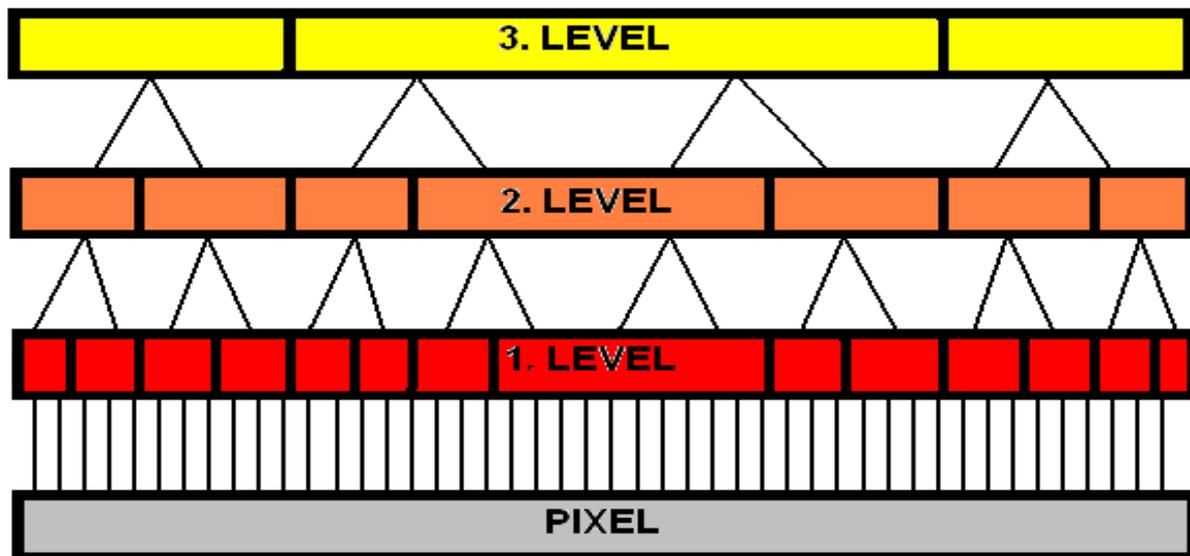


Abb. 2: Schematische Darstellung eines hierarchischen Netzwerks von Segmenten

Grundlage für die Berechnung der Textur bilden die in eCognition implementierten „grey level co-occurrence“ (GLC) Matrizen nach HARALICK et al. (1973), die sowohl die spektrale als auch die räumliche Verteilung von Grauwerten im Bild untersuchen. Die Matrix beschreibt die Wahrscheinlichkeit des Übergangs vom Grauwertniveau i auf das Grauwertniveau j zweier benachbarter Bildelemente.

Anders ausgedrückt werden in einer GLC-Matrix, deren Größe sich nach dem Grauwertbereich des untersuchten Bildes richtet, die normierten Häufigkeiten zweier benachbarter Grauwerte i und j mit fest definierten Abstand für die beiden Nachbarn einer bestimmten Richtungsraden gezählt. Das Ergebnis ist eine symmetrische Matrix. Wegen der zeit- und speicheraufwendigen Berechnung verwenden HARALICK et al. (1973) 14 Texturmerkmale, die den Charakter einer GLC-Matrix in einem Wert darstellen.

Da sich nach STEINNOCHER (1997) für „die Analyse von panchromatischen Fernerkundungsbildern ... der IDM als vorteilhafter ...“ erwiesen hat, wurde das Texturmerkmal IDM (Inverse Difference Moment) als Grundlage zur Klassifikation der erzeugten Segmente verwendet:

$$IDM = \sum_{i,j=0}^{N-1} \frac{P_{i,j}}{1 + (i - j)^2}$$

mit

N = Zeilen oder Spaltenanzahl,

i, j = Grauwertkombination in der Zeile i und Spalte j der GLC - Matrix,

$P_{i,j}$ = Auftretswahrscheinlichkeit eines Grauwertpaars.

Dabei wird über die Grauwertdifferenz der Grauwerte i und j im Nenner ein Gewichtungsfaktor gebildet, im Zähler stehen die nominalen Häufigkeiten der Grauwertübergänge im Ver-

hältnis zur Gesamtzahl der möglichen Grauwertübergänge für eine Richtung. Dies führt dazu, dass homogene Bereiche höher gewichtet werden als heterogene, da die homogenen Elemente näher an der Diagonale der GLC-Matrix liegen.

Mit diesem Klassifikationsmerkmal lassen sich bereits grobe Unterteilungen zwischen besiedelten (heterogenen) und unbesiedelten (teilweise homogenen) Bereichen herstellen, deren Genauigkeit jedoch noch unzureichend ist, insbesondere in Regionen mit Feld- und Ackerflächen, die ebenfalls ähnliche Texturwerte aufweisen können wie Siedlungsflächen. Einen Lösungsansatz zur Elimination solcher texturbefahenen landwirtschaftlichen Flächen zeigt STEINNOCHER (1997) auf, indem er bei der Flächenbeschreibung drei texturale Eigenschaften in Bildern unterscheidet:

1. richtungsabhängige inhomogene Flächen
2. richtungsunabhängige inhomogene Flächen
3. homogene Flächen

Wird der IDM jeweils für alle vier möglichen Richtungen (horizontal, vertikal, rechtsdiagonal und linksdiagonal) berechnet, zeigt sich, dass richtungsabhängige Komponenten des IDM innerhalb von Siedlungs- und Waldbereichen annähernd identisch sind, sich bei landwirtschaftlichen Flächen die Hauptrichtung der Kanten deutlich in den berechneten IDM-Werten widerspiegelt. Das IDM von Feldern und Äckern zeigt für die vertikale Richtung einen deutlich höheren Wert als die übrigen Richtungswerte. Dies liegt darin begründet, dass durch Differenzbildung „zweier normal aufeinander stehender Texturmerkmale ... sich in Kantenmengen – und nur dort – Differenzen ... signifikant größer Null“ STEINNOCHER (1997) bilden.

Da pro Umgebung zwei Möglichkeiten der Differenzbildung bestehen, wurde zum einem der Betrag des Differenzwerts zwischen horizontaler und vertikaler Ausrichtung und zum anderem zwischen linksdiagonaler und rechtsdiagonaler Ausrichtung des IDM berechnet.

$$CF_h = \sqrt{(IDM_{0^\circ} - IDM_{90^\circ})^2}$$

$$CF_d = \sqrt{(IDM_{45^\circ} - IDM_{135^\circ})^2}$$

Als Formparameter wurde im dritten Level der Segmenthierarchie das Längen/Breiten – Verhältnis von Segmenten in die Klassifikation miteinbezogen, da nach der Durchführung von iterativen Versuchsreihen insbesondere Flüsse oder Autobahnen in allen verwendeten SPOT-Szenen gut von den Siedlungsflächen abzugrenzen waren. Die Software eCognition verwendet dazu zwei Berechnungsvorschriften. Entweder wird das Verhältnis von „covariance matrices“ zur Parameterberechnung verwendet, oder eine sogenannte „bounding box“ (vgl. DEFINIENS IMAGING, 2003), wobei in einem Vergleich der beiden Ergebnisse der kleinere Zahlenwert als Endwert für das betroffene Segment zählt.

$$NDVI = \sum_{i=1}^N \frac{IR_i - R_i}{IR_i + R_i}$$

mit

N = Pixelanzahl je Segment,

i = Pixel innerhalb eines Segmentes,

IR = Reflexionswert im nahen Infrarot-Bereich,

R = Reflexionswert im sichtbaren Rot-Bereich.

Letztendlich wird über ein eigens erstelltes „costumized feature“ ein durchschnittlicher NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) auf Grundlage der Landsatdaten eingefügt, um großflächige Regionen mit Vegetation ausschließen zu können. Durchschnittlich deshalb, da alle pixelbasierten Werte als Mittelwert für jedes erzeugte Segment dienen. In der zweiten Segmentierungsebene werden die bestehenden Segmente ihrerseits in kleinere Subsegmente (sog. Filialsegmente) zerlegt und die Textur-, Form- und NDVI-Schwellwerte angehoben; sie werden zudem nur noch für Filialsegmente berechnet, die Teil eines Nicht-Ausschlussflächen-Segments sind.

Neben den bereits für Level 3 verwendeten Klassifikationsmerkmalen, werden in dieser Segmentierungsebene zwei weitere Neuerungen eingeführt. Die erste Neuerung besteht in der Anwendung eines weiteren Formparameters, dem Kompaktheitsgrad. Dabei wird, ausgehend von den Segmentierungseinstellungen (vgl. Tabelle 1), von der Prämisse ausgegangen, dass Siedlungsflächen im Regelfall kompakter sind als Naturflächen. Nach der Durchführung empirischer Versuchsreihen und manueller Vergleiche, konnten weitere Nicht-Siedlungsflächen über ermittelte Schwellwerte ausgeschlossen werden.

$$\text{Kompaktheitsgrad} = \frac{\text{Segmentlänge} * \text{Segmentbreite}}{\text{Pixelanzahl}}$$

Durch die Verschärfung der Restriktionen im zweiten Segmentierungslevel konnten erfolgreich Siedlungsflächen eingegrenzt werden, wobei bei der Schwellwertanhebung ebenfalls eine Elimination von Siedlungsflächen auftrat, insbesondere innerhalb von Siedlungsgebieten. Nach SCHIEWE et. al. (2001) liegt dies am hierarchischen Klassifikationsansatz in eCognition, der zu unerwünschten Splitterpolygonen oder sogar fehlenden Segmenten führen kann. Beispiele für solche Splitterpolygone sind in Abbildung 3 aufgezeigt.



Abb. 3: Eliminierte Siedlungsbereiche innerhalb von Siedlungen

Um diese fälschlicherweise ausgeschlossenen Segmente (Grünflächen oder Gebiete mit geringer Textur) wieder einzugliedern, wird zur Mutterklasse Siedlung eine Klasse „eingeschlossene Segmente in Level 2“ hinzugefügt, deren Restriktionen wie folgt aussehen:

1. Die betroffenen Segmente müssen eine geringfügig stärkere Textur aufweisen als die der Klasse Siedlung. Damit soll sichergestellt werden, dass landwirtschaftliche Flä-

chen in Randbereichen zu besiedelter Fläche nicht wieder der Klasse „Siedlung“ zugeordnet werden.

2. Die betroffenen Segmente müssen zu mindestens 50 % von Segmenten der Klasse Siedlung umgeben sein.

Nach der Klassifikation der zweiten Segmentierungsebene werden im untersten Segmentierungslevel die beschriebenen Klassifikationsregeln mit sehr hohen Restriktionen noch ein letztes Mal angewandt, so dass letztendlich kleine Segmente (sog. Nepotalsegmente) verbleiben. Da durch die wiederum verschärften Restriktionen sowohl Nicht-Siedlungsflächen als aber auch innere Siedlungsbereiche wiederum wegfallen, wird analog wie im Level 2 eine Klasse „eingeschlossene Segmente in Level 1“ als Tochterklasse implementiert, deren Klassenmerkmale mit der erzeugten Klasse „eingeschlossene Segmente in Level 2“ identisch sind.

Um die zuvor in Level 2 ermittelten Siedlungssegmente der Klasse „eingeschlossene Segmente in Level 2“ beizubehalten, wird von den Vorteilen des hierarchischen Klassifikationsnetzwerks Gebrauch gemacht; zur Beibehaltung der Splitterpolygone aus Level 2 wird eine Beziehung zu Superobjekten (Segmente aus dem 2. Level) angewandt. Diese geschieht über eine „existence of“ - Beziehung, die die Klasse „eingeschlossene Segmente in Level 2“ im 1. Level verfügbar macht.

Nach einer Zusammenfassung der Siedlungssegmente über eine „classification based fusion“ zu großen Segmenten, kann über die Berechnung der Grauwertvarianz je Siedlungssegment eine weitere Verbesserung des Klassifikationsergebnisses erreicht werden, da landwirtschaftliche Flächen ohne Vegetation im Regelfall eine hohe Texturierung, aber eine geringe Grauwertvarianz aufweisen (siehe dazu JÜRGENS, 1997). Siedlungsflächen hingegen weisen eine hohe Grauwertvarianz auf.

Die Zusammenfassung der Segmente hat insbesondere den Vorteil, dass die im untersten Segmentierungslevel bestimmten Siedlungsflächen nicht mehr abänderbar sind. Dies bedeutet, dass das Wegfallen innerer Siedlungsbereiche vermieden wird und Tochterklassen zur Eingliederung nicht mehr erstellt werden müssen. Nachteilig ist der Verlust der oberen Segmentierungslevel, die zur Zusammenfassung der Segmente gelöscht werden müssen. Schlussendlich können durch die Berechnung der Grauwertvarianz bisher verbliebene kleine landwirtschaftliche Flächen im Außenbereich nahezu eliminiert werden.

Da das Ziel die Erfassung von Siedlungsflächen (vgl. APEL et. al. 1995) und nicht etwa die Erfassung von versiegelter Fläche ist, müssen im letzten Arbeitsschritt innerstädtische Flächen, wie Parks, Seen oder Friedhöfe, die keine Textur aufweisen, aber per Definition zur Siedlungsfläche gehören, in die Endklassifikation eingegliedert werden.

Dazu werden im letzten Arbeitsschritt die bisher erzeugten Siedlungssegmente gerastert und auf 1 bit rekodiert. Durch eine Segmentierung des Rasterbildes ohne Einbeziehung von Formrestriktionen (Shape = 0 und Color = 1, vgl. Tab. 1) kann einfach zwischen den bereits ermittelten Siedlungssegmenten, die einen Grauwert von 1 besitzen, und gesuchten inneren Segmenten mit dem Grauwert 0 differenziert werden: Die gesuchten innerstädtischen Flächen ohne Textur repräsentieren einzelne Segmente, die zu 100 % von den ermittelten Siedlungsflächen mit dem Grauwert 1 umgeben sind. Durch eine Neuklassifikation über folgende Regeln kann die entgültige Siedlungsmaske erzeugt werden:

1. Die Klasse Siedlung besitzt den Grauwert 1.
2. Die Klasse Innenbereiche ist zu 100% von der Klasse Siedlung umschlossen.

4 Auswertung und erste Genauigkeitsanalysen

Für das ausgewählte Testgebiet der SPOT-Szene (Fläche: 3.856 ha) wurden auf Basis einer manuell digitalisierten Referenzmaske die Ergebnisse einer Genauigkeitsanalyse unterzogen. Tabelle 2 dokumentiert die sukzessive Verbesserung des Ergebnisses mit jedem Klassifikationsschritt.

Tab. 2: Ergebnisse der Genauigkeitsanalyse

	Generierte Siedlungsmaske	Übereinstimmung mit Referenzmaske	Nutzergenauigkeit
Level 3	1728,39 ha	234,57 ha	13,57 %
Level 2	316,17 ha	221,25 ha	69,98 %
Level 1	232,44 ha	202,00 ha	86,90 %
Endlevel	225,53 ha	203,74 ha	90,34 %

Mit dem vorgestellten Verfahren konnte eine Nutzergenauigkeit von 90,34 % erreicht werden. Im Vergleich zu herkömmlichen pixelbasierten Klassifikationsverfahren, wird deutlich, dass „das objektbasierte Verfahren bei der Klassifizierung ... den pixelbasierten Verfahren überlegen ist.“ (siehe dazu KOCH et. al, 2003, S.200), da das in diesem Fallbeispiel skizzierte Verfahren Siedlungsflächen als einheitliche Regionen mit fest definierten Merkmalen identifiziert, ohne eine Vielzahl von fehlklassifizierten Pixeln aufzuweisen. Allerdings bleibt anzumerken, dass Siedlungsflächen geringer Größe (einzelne Bauernhöfe oder Häusergruppen) unter Umständen nicht vollständig erfasst werden. Ferner wird deutlich, dass die erzeugte Siedlungsmaske, im Vergleich mit den vom menschlichen Betrachter erzeugten Referenzdaten, in Siedlungsrandbereichen weniger generalisierte Grenzen aufweist, sondern stärker an den tatsächlichen Grenzen verläuft.

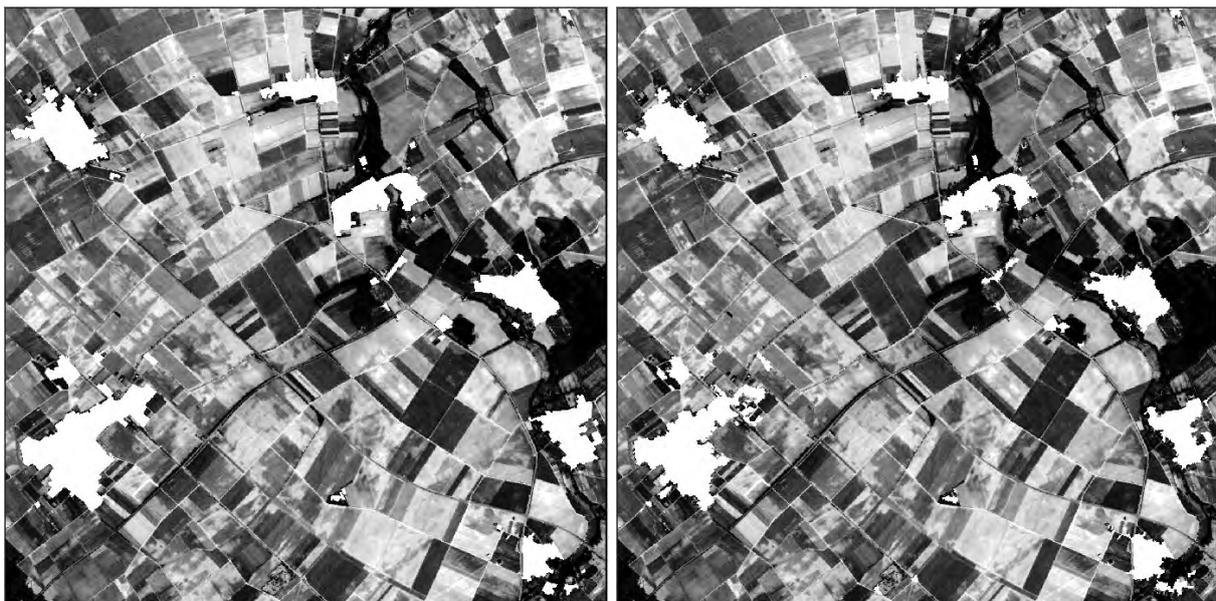


Abb. 4: Referenzdaten (links) und erzeugte binäre Siedlungsmaske (rechts)

5 Ausblick

Für eine landesweite Anwendung dieses Verfahrens sind die Kosten für die Anschaffung der SPOT- und Landsat-Szenen relativ hoch, weshalb die Untersuchung der Eignung anderer Sensoren (u.a. panchromatische KOMPSAT-Aufnahmen mit 6,8 m Auflösung) und ASTER-Daten (mit 15m/30m Auflösung) in die Forschungsarbeit einbezogen wird. Es wird daher insbesondere die Frage untersucht werden, inwiefern die Schwellwerte der Klassifikationsmerkmale auf Daten mit anderer räumlicher Auflösung übertragbar sind und ob der Klassifikationsablauf weiter automatisiert werden kann.

6 Literatur

- APEL, D. & HENCKEL, D., 1995: Flächen sparen, Verkehr reduzieren – Möglichkeiten zur Steuerung der Siedlungs- und Verkehrsentwicklung. *Deutsches Institut für Urbanistik (Hrsg.): Difu-Beiträge zur Stadtentwicklung*, Band 16. Berlin.
- BAATZ, M. & SCHÄPE, A., 2000: Multiresolution segmentation – an optimization approach for high quality multi-scale image segmentation. In: STROBL, J., BLASCHKE, T., GRIEBEBENER, G.(Hrsg.): *Angewandte Geographische Informationsverarbeitung*, Beiträge zum AGIT-Symposium Salzburg: 12-23.
- DEFINIENS IMAGING GmbH, 2003: *Ecognition Userguide*. München.
- HARALICK, R.M., SHANMUGAM, K. & DINSTEN, I., 1973: Textural features for image classification. *IEEE Trans. Syst., Man, Cybern.*, SMC-3: 610-621.
- JÜRGENS, C., 1997: Bestimmung von ländlichen Siedlungsflächen anhand von Satellitenbilddaten. In: BREUER, T., HEINE, K., HERMES, K., OBST, J., RINSCHKE, G. (Hrsg.): *Regensburger Geographische Schriften*, Heft 28: 133-139.
- KOCH, B., JOCHUM, M., IVITS, E. & DEES, M., 2003: Pixelbasierte Klassifizierung im Vergleich und zur Ergänzung zum objektbasierten Verfahren, *Photogrammetrie Fernerkundung Geoinformation*, Heft 3: 195-204.
- SCHIEWE, J., TUFTE, L. & EHLERS, M., 2001: Potential and Problems of Multi-Scale Segmentation Methods in Remote Sensing, *Geo-Informationssysteme*, Heft 6: 34-39.
- STEINNOCHER, K., 1997: Texturanalyse zur Detektion von Siedlungsgebieten in hochauflösendenpanchromatischen Satellitenbilddaten. In: AGIT IX, 2.-4. Juli 1997, *Salzburger Geographische Materialien*, Heft 26: 143-152.

Sensor and Data Fusion Contest: Comparison of Visual Analysis between SAR- and Optical Sensors

ANKE BELLMANN¹, OLAF HELLWICH¹

Zusammenfassung: Der „EuroSDR Sensor and Data Fusion Contest“ soll Aufschluss darüber geben, in wie weit vergleichbare Ergebnisse bei der Auswertung von optischen Sensoren und SAR-Daten erreicht werden können. In der ersten Phase wurden sowohl optische Daten als auch Radardaten von bis zu vier Regionen visuell ausgewertet. Um die visuellen Auswertungen einheitlich vergleichen zu können, wurden im Vorfeld Referenzdatensätze erstellt, die die Grundlage für den Datenvergleich liefern. Die vier Testgebiete werden vorgestellt; die Entstehung der Referenzdaten erläutert. Das Ergebnis des Vergleichs ist zum einen eine prozentuale Angabe der Auswertegenauigkeit bezogen auf die Referenzdaten und zum anderen eine visuelle Interpretation der Daten. Die Methoden der Auswertung werden aufgezeigt, bevor die Ergebnisse der ersten Phase gezeigt und erläutert werden.

1 Introduction

The *EuroSDR Sensor and Data Fusion Contest* **Information for mapping from airborne SAR and optical imagery** seeks to compare the potential of airborne synthetic aperture radar data with imagery from optical sensors for topographic mapping. The test is organised by EuroSDR in conjunction with the IEEE GRSS data fusion technical committee (DFC) and the ISPRS working group III/6 “Multi-Source Vision”. In the first phase of the contest, a competitive information extraction is performed on both state of the art airborne SAR data and high resolution optical imagery of different terrain types. One aim of the contest is to answer two questions: (1) Can airborne SAR compete with optical sensors for the given domain? (2) What can be gained when SAR and optical images are combined? A preliminary answer to these questions will be given in this paper.

2 Basic Principles of the Contest

2.1 General

The “EuroSDR sensor and data fusion contest” is divided into the following three phases:

- Phase I: Visual Image Interpretation
- Phase II: Automatic Object Extraction and Classification
- Phase III: Sensor Fusion

Currently, a final report on phase I is complete, while some test participants are still in the process of completing phase II. At the end of summer 2005, the second phase will be concluded and work on phase III will begin. For the first phase, nine interpreters from six institutions are participating in the contest. The institutions which take part in the contest are the University of Hannover, Germany; the Technische Universität München, Germany; Photogrammetry Department, General Command of Mapping, Ankara, Turkey; University of

¹ Dipl.-Ing. Anke Bellmann, Prof. Dr.-Ing. Olaf Hellwich, Berlin University of Technologie, Computer Vision & Remote Sensing, Franklinstraße 28/29, 13353 Berlin, e-mail: bellmann@cs.tu-berlin.de, hellwich@cs.tu-berlin.de, URL: <http://www.cv.tu-berlin.de>

Rome, Italy; Budapest University of Technology and Economics, Hungary and Berlin University of Technology, Germany. Depending on the experience of the interpreters, the results of information extraction consisted of the segmentation of scenes into separate objects and only two interpreters analyzed both imagery types.

The object types of interest for the fusion contest include built-up areas, agricultural and forest areas as well as lakes and linear objects such as highways, roads, alleys and rivers. Depending on the test data, additional objects like airports, sport fields and railway tracks have been added.

2.2 Imagery

The data used for the contest are optical airborne colour or black/white photography of photogrammetric quality and state of the art airborne polarimetric SAR imagery (Tab. 1).

Tab.1: SAR images used for different test areas

Test site	Characteristics	Sensor	Polarisation	λ	Test data resolution
Trudering, <i>Germany</i>	industrial rural	AeS-1	none	X-Band	1.5 m
Oberpfaffenhofen, <i>Germany</i>	airport agricultural	E-SAR	lexicographic	L-Band	3.0 m
Copenhagen, <i>Denmark</i>	urban suburban	EMISAR	Pauli	C-Band	4.0 m
Fjärdhundra, <i>Sweden</i>	agricultural forested	EMISAR	Pauli	C-Band	4.0 m

The optical imagery was resampled to the pixel size of the corresponding SAR images to avoid taking advantage of the higher resolution of optical images. The data sets used are described in detail by HELLWICH et al. (2002).

2.3 Reference Data

As a basis for analysing the interpretations produced as part of the contest, it was necessary to create reference data sets for the different test areas. Reference data contents should ideally include the information of optical and SAR imagery as well as information from topographic maps (Fig. 1). Since data acquisition times were not the same for optical and SAR images, the data sets have marginal discrepancies. The topographic maps used are of a scale of 1:25.000 and 1:50.000 (in Sweden, topographical maps of a larger scale are not available). Due to the fact that topographic maps are highly generalised (streets are broadened, buildings are merged and objects shown as signatures) and can not be referenced to the other images with pixel accuracy, they only were used to examine the content.

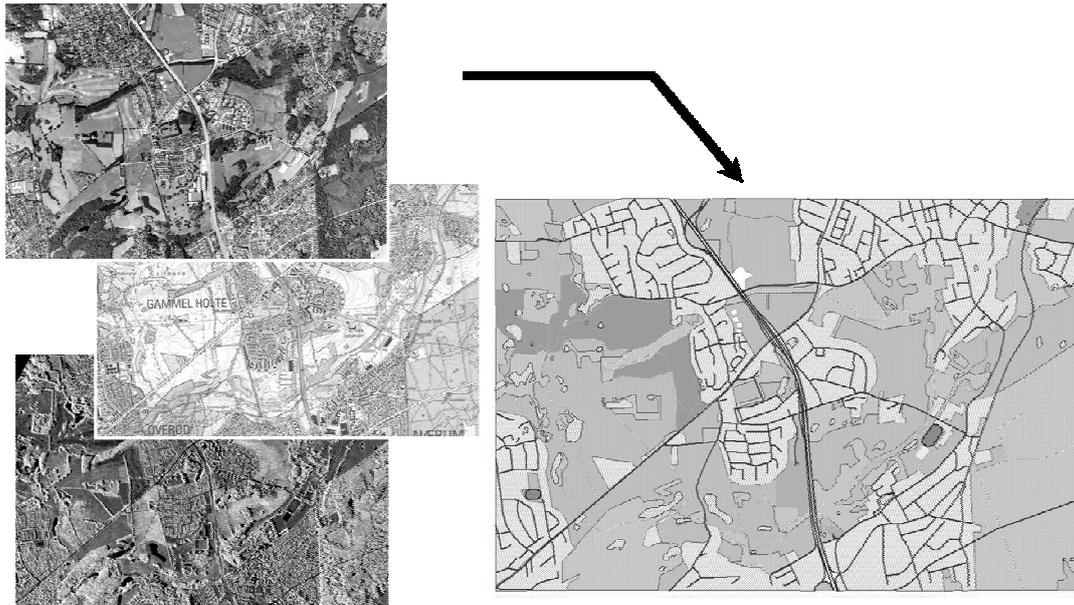


Fig. 1: From three basics (left top: optical image, left middle: topographical map, left bottom: SAR image) to the reference map (right)

Test imagery were created with the vector based Desktop GIS ArcView of ESRI. As mentioned above, there are some differences between optical and SAR image due to differences in acquisition time (Fig. 2).

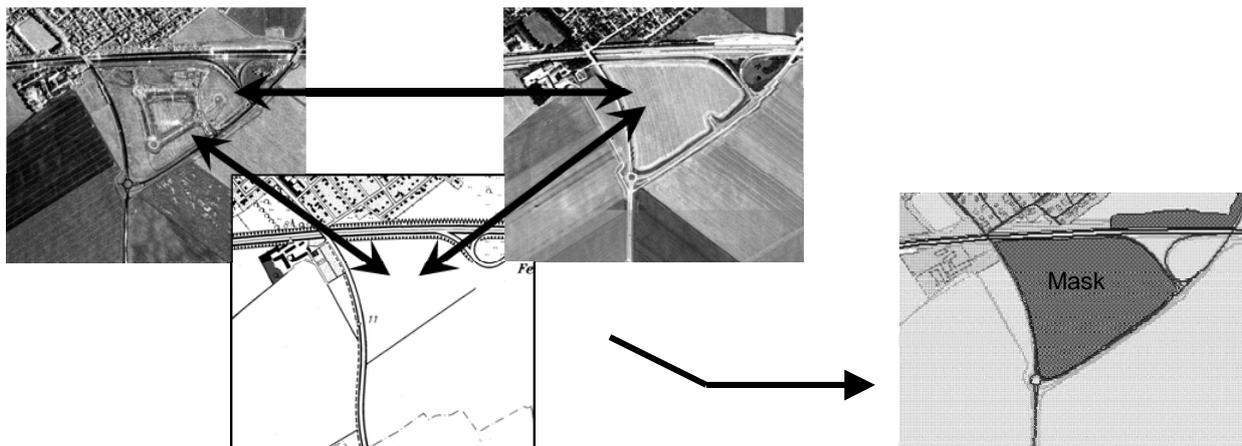


Fig. 2: Different content in topographical map, SAR and optical images (*left*); reference map with mask (*right*)

Nevertheless, to achieve equal data from both sensors, masks were created to cut out objects and terrains not clearly defined. Areas covered by the masks are not included in the analysis in order to avoid a false impression of the information content to be used in the context. Since data analysis will be conducted on raster images, the reference maps were converted into raster images with pixel sizes corresponding to optical and SAR images. This image conversion was carried out using the program ERDAS Imagine of Leica Geosystems.

3 Analysis

3.1 Basic Information

In the initial stages of analysing the interpreted data, numerous problems became obvious. One problem that needs to be dealt with is the individual interpretation style of each interpreter. As it has been previously shown by ALBERTZ (1970), the quality of image interpretations is very much affected by the level of experience of the interpreter. This is especially true for SAR imagery because interpretation of different imaging characteristics is required. The second issue is the different programs interpreters work with. Some interpreters use vector based programs with different object layers for different objects; others work with raster based programs and do not separate different layers.

To get a unitary analysis, the following basic principles of data analysis have to be predefined:

- Interpretations which were computed by participants as vector data were converted into raster images, since data analyses are conducted based on raster images.
- Raster images were separated into different layers; one layer for each object class.
- Comparisons of the results were conducted for corresponding layers.
- Results of the data analysis are percentage values. Distances and area sizes were not calculated.

3.2 Evaluation Procedure

To evaluate the interpretation results, objects have been separated into areal and linear object types, since analysis is different for both object types. Image processing for both types of analysis have been carried out with ERDAS Imagine.

Comparison of areal objects takes place with pixel accuracy. The pixels of the interpreted image are subtracted from the pixels of the reference image. Figure 3 shows one example of a built-up area analysis. On the left site a reference data set is displayed, the interpreter's one in the middle and the result of subtraction is shown on the right site. Different colours at the resulting image are defined as followed:

- Black:* Correctly interpreted area
- Dark grey:* False positively interpreted area
- Light grey:* False negatively interpreted area

Correctly interpreted areas are those which were located by interpreter as well as by the reference map; false positive areas are those parts which are located by interpreter but not by the reference map; false negative are those areas shown in the reference but not detected by the interpreter.

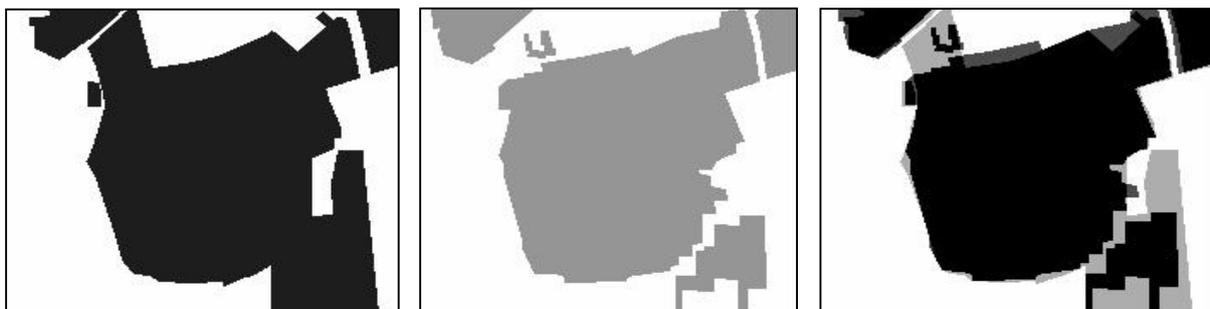


Fig. 3: Reference data (*left*); interpreted data (*middle*); result of image processing (*right*)

To compare linear objects, buffer zones have been created around reference and interpreted linear objects, as it is not significant to compare one-pixel-sized lines with pixel accuracy. To define false positively classified linear objects (located by interpreter but not in the reference), the reference object line was broadened with two adequate buffers. The result of image processing is a classification of the interpreted linear objects into correctly located, incorrectly located (both inside the buffers) and false position (outside the buffers), where the changeover from correctly to falsely located objects is buffered by an incorrectly located zone (Fig. 4 *left*).

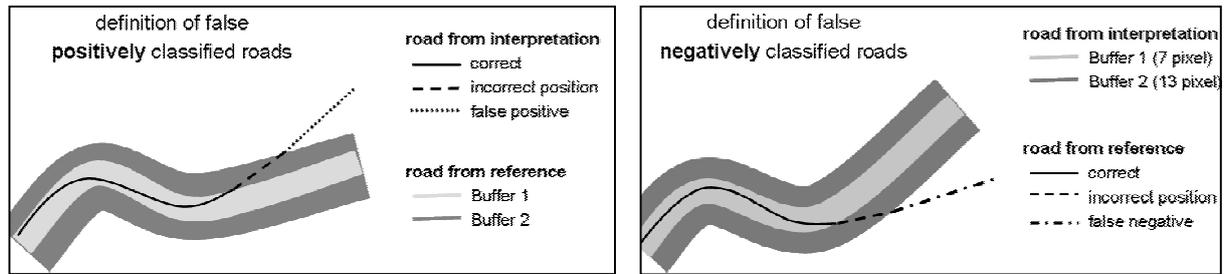


Fig. 4: Definition of false positively classified linear objects (*left*); definition of false negatively classified linear objects (*right*)

To define false negatively classified linear objects (contained in the reference map but not located by interpreter), the interpreted line was broadened with the same buffer width as before. The result is similar for correct and incorrect position (both inside the buffers) of positively classified roads, but differs to the line outside the buffers which is now false negatively classified (Fig. 4 *right*).

To achieve standardised values for analysing the quality of interpretation, the number of pixels from correctly classified objects (positively and negatively) and the number of pixels from incorrectly classified objects were averaged to give AV_{cor} and AV_{inc} respectively. To calculate the number of reference pixels, the following measure was used:

$$100\% = AV_{cor} + AV_{inc} + f_n \quad \text{where } f_n \text{ is the number of false negative pixels} \quad (1)$$

With this measure a clear diagram can be generated where reference pixels are shown as 100%. False positively classified pixels are added to 100% to display the number of all interpreted pixels (Fig. 5).

3.3 Qualitative Comparison

In addition to pixel accurate analysis, a qualitative comparison is conducted to evaluate special objects which were not detected by each interpreter, such as sport fields or land use boundaries. The qualitative comparison is only done visually. It is necessary since some interpreters provide a more detailed classification than the others. Likewise, there is no possibility to evaluate the detection of boundaries, ruins, barracks and parking lots because these detections depend on the interpreter's classification and can neither be examined pixel-by-pixel nor be approved by the topographic maps.

4 Results

The results look similar for the four different test sites. As described in section 3.2, figure 5 shows an example of a comparison with pixel accuracy.

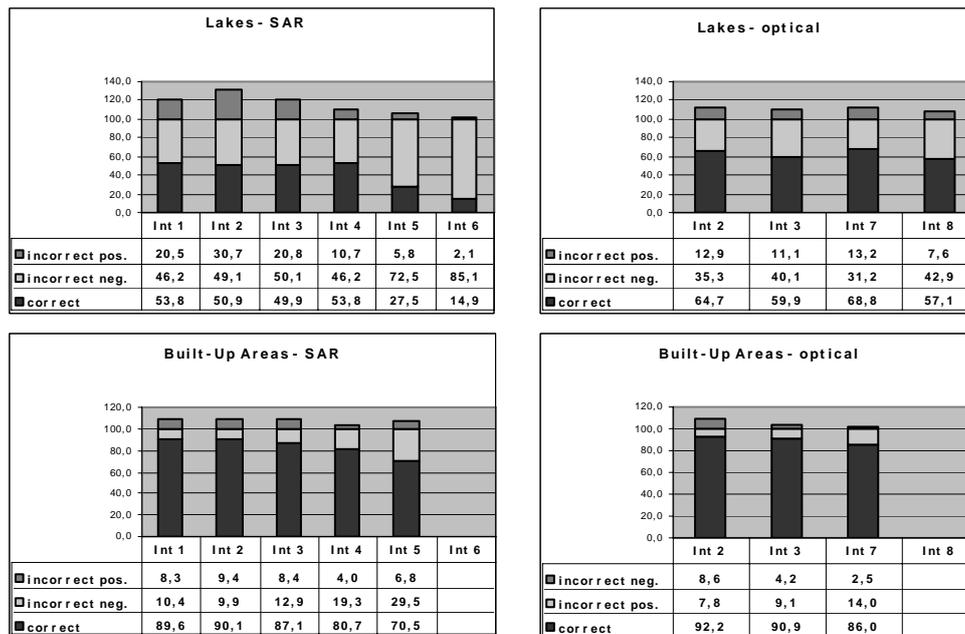


Fig. 5: Examples of pixel accurate comparison of areal objects for lakes and built-up areas of Copenhagen

It is obvious that main roads and highways, i.e. big linear objects, are detected and well located in both sensor imageries. Although it is no problem to locate big linear objects, classification appears to be much more difficult in SAR images, as railways were sometimes classified as streets. Smaller linear objects, like roads, alleys and little rivers are reliably detected in optical but not in SAR images.

While comparing areal objects, big contiguous areas are mostly well detected while small areas seem to be hardly detectable in SAR imagery, whereas they can be found in optical images. Nevertheless, big buildings can also be detected and well located in SAR, while, as before the smaller ones are not always located correctly. The same results are obtained with sport fields, only partially detected in SAR but nearly completely detected in optical imagery. Small forest areas are hardly detectable in SAR because they don't look like forest areas in the images (which may also depend on the interpreters experiences). Another problem seems to be the detection of water surfaces: big ones can be located and classified well in SAR images, but smaller ones can not be found, unlike in optical images.

5 Conclusion

To answer one of the main questions of this contest, it seems that SAR performs as well as optical sensing for large areal and linear objects but is not satisfactory with respect to smaller objects. Even though optical imagery was resampled to the pixel size of SAR sensing, it allows much more detailed analysis. This might certainly change when using modern SAR data with resolutions in the range of decimetres, as then speckle filtering could be done intensively without losing interpretability of the data. Without training the interpreter in finding railways and other objects they are not familiar with, it is nearly impossible for them arrive at the correct classification in SAR images. Due to the similarities between the human visual system and optical imaging, this is much easier with respect to optical images. The analysis shows that under the conditions set by the test regarding resolution of the data and experience of the interpreters SAR sensing by its own is not satisfactory for the mapping of small objects having a size of a few pixels in one or two dimensions.

In the next phase of the contest, automatic methods for image analysis and interpretation will be used and exciting results will be expected before starting the last phase, where data fusion takes place.

6 Acknowledgments

We would like to express our thanks to several authorities for providing data for the fusion contest, especially Intermap Corp. and Bayrisches Landesvermessungsamt München, IHR/DLR (E-SAR data), Aerosensing GmbH (AeS-1 data) as well as the DDRE (EmiSAR data). Further thanks belong to all participants of the contest for contributing their work and analysis.

7 References

- ALBERTZ, J., 1970: Sehen und Wahrnehmen bei der Luftbildinterpretation, *Bildmessung und Luftbildwesen* 38, (1970), Karlsruhe.
- HELLWICH, O., HEIPKE, C. & WESSEL, B., 2001: Sensor and Data Fusion Contest: Information for Mapping from Airborne SAR and Optical Imagery, in *International Geoscience and Remote Sensing Symposium 01*, Sydney. IEEE, 2001, vol. VI, pp. 2793-2795.
- HELLWICH, O., REIGBER, A. & LEHMANN, H., 2002: OEEPE Sensor and Data Fusion Contest: Test Imagery to Compare and Combine Airborne SAR and Optical Sensors for Mapping, in *Publikationen der DGPF*, Band 11, 2002, pp. 279-283.
- LOHMANN, P., JACOBSEN, K., PAKZAD, K. & KOCH, A., 2004: Comparative Information Extraction from SAR and optical Imagery: *IntArchPhRS*. Band XXXV, Part B3. Istanbul, 2004, pp. 535-540.

Fernerkundungsgestützte Habitateignungsmodellierung für den Rotmilan mit Hilfe eines empirischen Ansatzes

AXEL BUSCHMANN¹ & CHRISTOPH KLEINN¹

*Zusammenfassung: Der Beitrag beschreibt ein empirisches, multivariates Verfahren zur Modellierung des Habitatpotentials einer Landschaft und seine Anwendung auf den Greifvogel Rotmilan (*Milvus milvus*) im Rahmen eines noch fortdauernden Forschungsprojektes. Die Methode vergleicht die Werte sogenannter ökogeographischer Variablen (EGV) an Präsenzpositionen des Rotmilans mit den Mittelwerten der Variablen für das Gesamtuntersuchungsgebiet. Dies geschieht unter der Annahme, dass sich die Ansprüche einer Species bezogen auf die Ausprägung eines bestimmten Sets an EGV deutlich von den mittleren Bedingungen unterscheiden werden. Innerhalb der Habitateignungsanalyse wird diese ökologische Nische präzise definiert. Diejenigen EGV, welche die größte Bedeutung für die räumliche Verteilung der Greifvogel-Nistorte haben, werden identifiziert und in einer gerasterten Habitateignungs-Karte dargestellt, in der die Wahrscheinlichkeit des Vorkommens der Species für jede Landschaftszelle des Untersuchungsgebietes angezeigt wird.*

1 Einleitung

Die Erfassung der Eignung einer Landschaft, bestimmten Pflanzen- oder Tierarten als Lebensraum zu dienen, ist Gegenstand der *Habitatpotentialanalysen*. Hierbei können unter einem Habitat die gegebenen Ressourcen und Bedingungen innerhalb eines durch eine Species besetzten Gebietes verstanden werden (DETTKI et al., 2003). Die Größe des in der Habitateignungsanalyse zu erfassenden Landschaftsausschnittes richtet sich nach den Aktionsradien bzw. Territoriengrößen der jeweils untersuchten Species. Im vorliegenden Fall des Rotmilans (*Milvus milvus*) mit einem ausgedehnten home range erstreckt sich die zu erfassende Fläche über weite Landschaftsteile.

Die ökologische Erfassung von Landschaften im Rahmen von Habitateignungsanalysen untergliedert die untersuchten Gebiete in Elemente (*Patches*), welche die Landschaft aufbauen. Die *Landschaftskomposition*, d.h. das Vorkommen und die Flächenanteile bestimmter Landnutzungs-/Landbedeckungskategorien, stellt hierbei einen wichtigen Gesichtspunkt dar. Zahlreiche Landschaftsanalysen konzentrierten sich in der Vergangenheit ausschließlich auf diesen genannten Aspekt.

Darüber hinaus jedoch dürfte die *Struktur* der Landschaft ein ähnlich wichtiges Kriterium darstellen. Sie wird durch die räumliche Anordnung der Landschaftselemente, die sogenannte *Landschaftskonfiguration*, ausgedrückt und sollte in die Bewertung des Habitat-

¹ MSc Axel Buschmann, Institut für Waldinventur und Waldwachstum, Arbeitsbereich Waldinventur und Fernerkundung, Georg-August-Universität Göttingen, Büsgenweg 5, 37077 Göttingen, email: abuschm@gwdg.de
Prof. Dr. Christoph Kleinn, Institut für Waldinventur und Waldwachstum, Arbeitsbereich Waldinventur und Fernerkundung, Georg-August-Universität Göttingen, Büsgenweg 5, 37077 Göttingen, email: ckleinn@gwdg.de

potentials von Landschaften einbezogen werden. Die Erfassung von Landschaftskomposition und -struktur sollte möglichst weitgehend aus einer Perspektive heraus erfolgen, welche sich an der Wahrnehmung der essentiellen Habitatrequisiten der Species in der Landschaft orientiert. Dabei sollten möglichst objektive und quantifizierbare Kennwerte erhoben werden, wie sie beispielsweise durch landscape metrics bereitgestellt werden (für einen Überblick zum Thema siehe z.B. GUSTAFSON, 1998). Verfahren der Fernerkundung eröffnen die Möglichkeit, großflächig Landschaften mit ihren enthaltenen Elementen zu erfassen und im weiteren Verlauf verschiedene landscape metrics zu berechnen.

Der innerhalb dieser Studie eingesetzte Modellierungsansatz der Ecological-Niche Factor Analysis (ENFA) (HIRZEL et al. 2002a) wird als empirisch (DECOURSEY, 1992; KORZUKHIN et al., 1996), statistisch (SHARPE & RYKIEL, 1991) oder phänomenologisch (LEARY, 1985; PICKETT et al., 1994) bezeichnet. Die Beschreibung dieses Ansatzes sowie vorläufige Ergebnisse aus seiner Anwendung in einem fortdauernden Forschungsprojekt werden in diesem Beitrag präsentiert. Species-Daten entstammen Feldaufnahmen des Rotmilans im Untersuchungsgebiet.

2 Material und Methoden

2.1 Untersuchungsgebiet

Das Untersuchungsgebiet befindet sich im südlichen Teil des EU-Vogelschutzgebietes „V19 Unteres Eichsfeld“ in Südniedersachsen, ca. 20km östlich der Stadt Göttingen.

Das Gebiet umfasst eine Fläche von 32,5km² und ist geprägt durch intensive landwirtschaftliche Nutzung mit vorwiegend Getreide- und Hackfruchtanbau auf Ackerschlägen mittlerer bis großer Fläche. Auftretende Waldflächen sind zumeist dominiert von Buche (*Fagus sylvatica*), teilweise mit eingemischter Eiche (*Quercus* ssp.), und wenigen Fichtenbeständen (*Picea abies*).

Die Höhenlagen bewegen sich zwischen 212m und 348m ü. NN., das jährliche Temperaturmittel liegt bei 7,8°C und die durchschnittliche jährliche Niederschlagsmenge bei 680mm.

2.2 Rotmilanhorste und geographische Daten

Nestpositionen des Rotmilans wurden in der Zeit zwischen 1998 und 2002 im Untersuchungsgebiet durch lokale Ornithologen im Feld erhoben. Die kartierten Horste wurden im Projekt in ein digitales Orthophoto-Mosaik übertragen (s. Abb. 1). Aus Befragungen eines Ornithologen wurden weiterhin Präferenzen des Rotmilans hinsichtlich Arten und Alter der Brutbäume, topographischer Lage der Nistorte sowie weiterer spezieller Eigenschaften der Nestumgebung als zusätzliche Daten gesammelt.

Die geographische Datengrundlage bildeten Color-Infrarot-Luftbilder (CIR, Befliegung in 05/1993) in Verbindung mit Deutschen Grundkarten im Maßstab 1:5.000 (DGK 5). Ein digitales Orthophoto-Mosaik (geometrische Auflösung 3m) wurde produziert und eine Landnutzungs-/Landbedeckungskarte gleicher Auflösung mittels objektorientierter Klassifikation erstellt. Zusätzlich kamen ein digitales Geländehöhenmodell (DEM) mit einer Auflösung von 0,5m sowie Datensätze des ATKIS (Amtliches Topographisch Kartographisches Informationssystem) zur Straßen-Infrastruktur und Fließgewässern zum Einsatz.



Abb. 1: Orthophoto-Mosaik (CIR) des Untersuchungsgebietes mit 10 markierten Nestpositionen.

3 Ecological-Niche Factor Analysis

Das empirische Modell der Ecological-Niche Factor Analysis (ENFA) kam im Rahmen der Habitateignungsmodellierung zum Einsatz. Der entsprechende Ansatz ist in der Software BIOMAPPER (HIRZEL et al., 2002b) implementiert. Die Stärke der auf Feldbeobachtungen der untersuchten Species basierenden ENFA liegt in ihrer Genauigkeit unter realistischen Bedingungen, allerdings auf Kosten möglicher Generalisierungen der durchgeführten Schätzungen (GUISAN & ZIMMERMANN, 2000). Die ökologische Nische einer Species vor dem Hintergrund eines konkreten Referenzdatensatzes ist der Fokus dieses Modellierungsansatzes; sie wird im Rahmen der Modellierung präzise definiert (HIRZEL et al., 2002a).

Das Grundprinzip dieser multivariaten Methode liegt im Vergleich so genannter ökogeographischer Variablen (EGV) für Präsenzpositionen der Species mit den entsprechenden Mittelwerten der EGV, betrachtet über sämtliche Landschaftszellen (s. Abb. 2).

Die Landschaftskarte wird gerastert und die Ausprägungen der EGV für sämtliche Zellen werden bestimmt. Die unabhängigen EGV beschreiben die Zelleigenschaften (topographisch, ökologisch etc.), und die Präsenzdaten der Species repräsentieren die abhängige Variable (HIRZEL et al., 2002a).

Die ENFA ist auf die Identifikation derjenigen EGV ausgerichtet, welche verantwortlich für die vorgefundene Artverteilung im Untersuchungsgebiet sind. Weiterhin werden die einzelnen Variablen nach ihrer Einflussstärke in eine Rangfolge gebracht. Die Möglichkeit, räumliche und nicht-räumliche Variablen in der Analyse kombinieren zu können, stellt einen weiteren Vorzug der ENFA dar (DETKI et al., 2003).

Die ENFA basiert auf zwei fundamentalen Annahmen beim Vergleich der EGV-Werte für Präsenzpositionen der Species mit jenen des Gesamt-Sets an Landschaftszellen (globales Set). Hierbei geht es um die Annahmen, dass jede Art eine spezifische Marginalität und weiterhin auch eine charakteristische Spezialisierung aufweist. Der Begriff Marginalität drückt hierbei aus, dass die Mittelwerte der EGV für die Präsenzpositionen der Species (μ_S) sich vom jeweiligen globalen Mittelwert für die entsprechende EGV (μ_G) unterscheiden werden (HIRZEL et al., 2002a, siehe Abb. 2 links). Sie lässt sich graphisch als Abstand dieser Mittelwerte im multi-dimensionalen Merkmalsraum, der durch die verschiedenen EGV aufgespannt wird, interpre-

tieren (s. Abb. 2 rechts für einen dreidimensionalen Merkmalsraum). Die Annahme der Spezialisierung sagt aus, dass die Varianzen der EGV, über die Präsenzzellen der Species ermittelt, geringer sein werden als für das globale Set an Zellen.

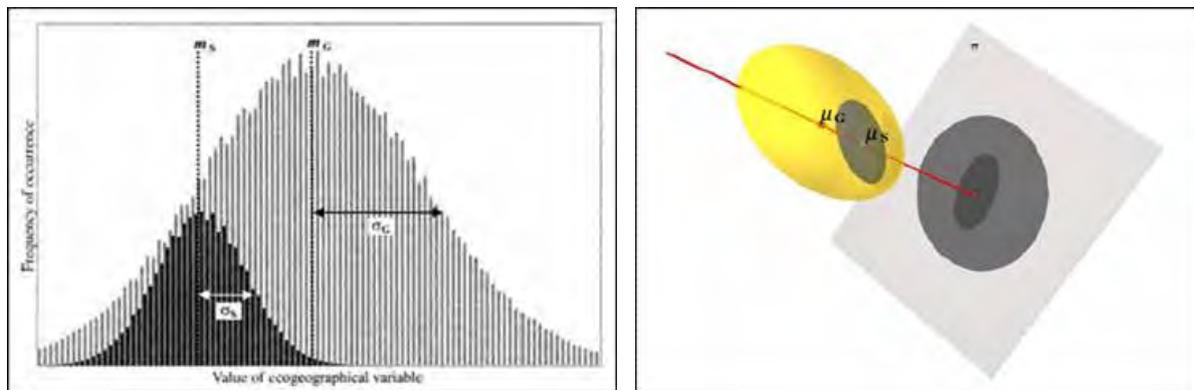


Abb. 2 (nach HIRZEL et al., 2002a): Definition der ökologischen Nische einer Art. Links: Vergleich der Verteilung von Variablenwerten einer EGV im globalen Set der Landschaftszellen (graue Balken) und an Präsenzpositionen (Nester) der untersuchten Species (schwarze Balken). Rechts: Geometrische Interpretation der ENFA; Landschaftszellen werden in einem mehrdimensionalen Merkmalsraum repräsentiert. Die gelbe Punktwolke steht für das globale Set an Zellen, der graue Ballon für dasjenige Subset an Zellen, in welchem die Species beobachtet wurde (Präsenzzellen), mit μ_G und μ_S als den entsprechenden Mittelwerten der Verteilungen.

Die ENFA ermöglicht die Bestimmung derjenigen EGV, die am stärksten zur Ausprägung der ökologischen Nische der untersuchten Art beitragen. Die Faktorenanalyse reduziert die relativ große Zahl an ursprünglichen EGV auf eine geringere Anzahl an Faktoren. Das Vorgehen ist vergleichbar demjenigen einer Hauptkomponentenanalyse (HKA). Im Fall der ENFA wird der erste Faktor so gewählt, dass er sämtliche Marginalität der Species „erklärt“, während die nachfolgenden Faktoren die Information zur Spezialisierung der Art maximieren (HIRZEL et al., 2002a).

Von entscheidender Bedeutung ist die Interpretation der abgeleiteten Faktoren, deren ökologischer Bedeutungsgehalt oftmals nicht ohne weiteres erkannt werden kann. Zu diesem Zweck werden die Beiträge der ursprünglichen EGV an den Faktoren (Faktor-ladungen) untersucht.

Anschließend wird eine Habitateignungskarte erstellt, welche für jede Landschaftszelle einen Wahrscheinlichkeitswert für das Vorkommen der Species angibt. Diese Wahrscheinlichkeit resultiert aus der relativen Position der Zelle in der Verteilung der Species für den entsprechenden Faktor (HIRZEL et al., 2002a). Für die Karte wird ein Gesamt-Habitateignungswert berechnet, der auf das Spektrum zwischen 0 und 1 standardisiert wird. Für detaillierte Informationen zur mathematischen Berechnung sei an dieser Stelle auf HIRZEL et al. (2002a) verwiesen.

4 Bruthabitatanalyse für den Rotmilan mit Hilfe der ENFA

4.1 Identifikation der EGV und Aufbereitung der Daten

Den Ausgangspunkt der Analysen im Fallbeispiel bildete die Identifikation von EGV, von denen ein Einfluss auf die Bruthabitatwahl des Rotmilans angenommen wurde. Die Bestim-

mung der Variablen basierte zum einen auf Expertenbefragungen und dem Studium von Fachliteratur. Darüber hinaus wurden Rückschlüsse vor allem aus Nestumgebungsanalysen gezogen, in deren Verlauf das Vorkommen sowie die räumliche Lage der Landschaftselemente unterschiedlicher Nutzungsklassen untersucht wurden.

Es wurden digitale Karten des Untersuchungsgebietes produziert, die jeweils Informationen zu einer EGV (z.B. Fließgewässer-Layer, Laubwald-Layer) enthielten. Für jede Rasterzelle (Größe 3x3m) des Untersuchungsgebietes wurden die ausgewählten EGV bestimmt und in separaten Daten-Layern gespeichert. Auf diese Weise wurden 9 Layer erstellt, die als Input für die ENFA zur Verfügung standen. Eine Arbeitskarte mit den kartierten Positionen der Rotmilan-Nester wurde in die BIOMAPPER-Software importiert. In diesem Fall war eine Transformation in ein Boolesches Datenformat notwendig, d.h. Rasterzellen, die einen Rotmilanhorst beinhalten, wurde der Wert 1, sämtlichen anderen Zellen des globalen Sets der Wert 0 zugewiesen.

4.2 Ökologische Interpretation der Faktoren

Die vorläufigen Resultate der ersten ENFA-Läufe zeigen, dass bereits die ersten drei ökologischen Faktoren den Hauptteil der Varianz des Datensatzes (99%) erklären. Gemäß dieser vorläufigen Ergebnisse begründen diese drei Faktoren 100% der Marginalität des Rotmilans sowie 99% seiner Spezialisierung. Bereits der Marginalitätsfaktor erklärt 86% der gesamten Spezialisierung (s. Tab. 1). Dieses verdeutlicht, dass sich die vom Rotmilan bevorzugten Bruthabitatbedingungen klar von den mittleren Bedingungen im Untersuchungsgebiet unterscheiden und die Species weiterhin eine starke Beschränkung auf dieses Range an Bedingungen zeigt. In einem statistischen Report liefert die ENFA eine Auflistung der abgeleiteten Faktoren und ihrer zugehörigen Koeffizienten (s. Tab. 1). Die ursprünglichen EGV liegen hier sortiert nach den Werten ihrer zugehörigen Koeffizienten für den Marginalitätsfaktor vor. Diese Rangfolge spiegelt die Stärke der Beiträge der EGV zu den einzelnen Faktoren wider.

Die ökologische Interpretation der Faktor-Koeffizienten zeigt die starke Bindung der Bruthabitate des Rotmilans an Randbereiche von Laubwäldern auf. Die Analyse des Marginalitätsfaktors verdeutlicht, dass der Koeffizient für die originale EGV „Distanz zu Waldrandzone“ einen hohen und zudem negativen Wert aufweist (-0,78). Dieses Resultat zeigt an, dass die Species zum einen die Wahl ihrer Nestposition in der Landschaft sehr stark von der Distanz zum Waldrand abhängig macht (verdeutlicht durch den hohen Koeffizientenwert von 0,78, s. zur Interpretation auch Abb. 3). Weiterhin lässt sich aus dem negativen Vorzeichen des Koeffizientenwertes eine Vorliebe der Art für geringe Werte der entsprechenden EGV ableiten, d.h. der Rotmilan bevorzugt kurze Distanzen zum Waldrand. Es zeigt sich ferner

Tab. 1: Erklärte Varianz durch die ersten drei ökologischen Faktoren und Koeffizienten-Werte für die neun wichtigsten initialen Variablen.

Factor 1 (86%)	Factor 2 (11%)	Factor 3 (2%)
Distanz zu Waldrandzone(-0,78)	Distanz zu Fließgewässer(-0,64)	Distanz zu Siedlung(0,60)
Hangneigung(0,35)	Höhenlage(0,55)	Hangrichtung(0,43)
Distanz zu Straße/Weg(-0,34)	Distanz zu Ackerland(-0,28)	Distanz zu Ackerland(0,38)
Hangrichtung(0,29)	Hangrichtung(0,27)	Distanz zu Fließgewässer(-0,34)
Distanz zu Fließgewässer(-0,22)	Distanz zu Siedlung(-0,20)	Distanz zu Straße/Weg(0,33)
Distanz zu Siedlung(-0,11)	Distanz zu Grünland(0,19)	Hangneigung(-0,25)
Distanz zu Grünland(-0,08)	Distanz zu Waldrandzone(0,18)	Distanz zu Grünland(-0,14)
Distanz zu Ackerland(0,07)	Hangneigung(-0,16)	Höhenlage(0,12)
Höhenlage(0,02)	Distanz zu Straße/Weg(0,09)	Distanz zu Waldrandzone(-0,03)

eine Bindung an Geländelagen mit Hangneigungen (der Wert von 0,35 zeigt eine geringere Bedeutung dieser EGV im Vergleich mit „Distanz zu Waldrandzone“ an). In diesem Fall wird durch das positive Vorzeichen des Koeffizienten erkennbar, dass die Species größere Werte, d.h. hier stärkere Hangneigungen, der entsprechenden EGV präferiert.

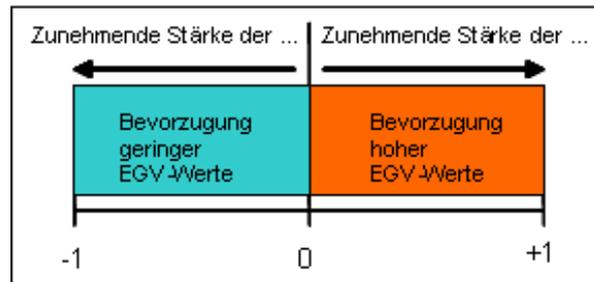


Abb. 3: Prinzip der ökologischen Interpretation der Faktor-Koeffizienten.

Beide Resultate wurden im Rahmen von Feldbeobachtungen bestätigt, welche zeigten, dass der Greifvogel seine Nester beinahe ohne Ausnahme direkt in Waldrandbereichen anlegt und in wiederholten Fällen zumindest leichte Hanglagen am Nistort bevorzugt, die ihm das Einfliegen in den Horst erleichtern. Die (schwächere) Präferenz für nahegelegene Straßen-Infrastruktur kann als gewisse Toleranz gegenüber menschlichen Einflüssen in der Nestumgebung interpretiert werden. Ähnliche Beobachtungen wurden bereits in früheren Untersuchungen gemacht (siehe z.B. KLENKE & ULBRICHT, 2000), hier bezogen auf die Distanzen zu menschlichen Siedlungsbereichen – allerdings stets unter der Bedingung der Einhaltung eines gewissen Mindestabstandes zu entsprechenden Strukturen.

Die Interpretation der Spezialisierungsfaktoren (hier beschränkt auf Faktor 2 als dem ersten Spezialisierungsfaktor, da die nachfolgenden Faktoren nur noch sehr wenig an Spezialisierung erklären) zeigt eine verhältnismäßig starke Beziehung zu den beobachteten Ranges von Abständen zu Fließgewässern („Distanz zu Fließgewässer“=-0,64) und der Höhenlage („Höhenlage“=0,55). Diese Ergebnisse werden aktuell weiter analysiert.

4.3 Habitateignungskarte

Als Hauptprodukt liefert die ENFA eine flächendeckende Darstellung des Bruthabitatpotentials der untersuchten Landschaft für den Rotmilan. Diese Habitateignungskarte (s. Abb. 4) illustriert für jede Landschaftszelle die Wahrscheinlichkeit, dass diese als Nistort durch den Rotmilan gewählt wird. Die Habitateignungswerte der Zellen setzen sich zusammen aus den individuellen Punktzahlen für jeden der innerhalb der ENFA abgeleiteten Faktoren. Der Marginalität und Spezialisierung werden in diesem Zusammenhang gleiche Gewichtungen zugeordnet.

Die Karte bildet die Habitateignungswerte der einzelnen Landschaftszellen, die als Wahrscheinlichkeitsangaben zwischen 0 und 1 vorliegen, über Farbwerte ab (zwecks besserer Visualisierung wird vorangehend eine Transformation der Werte auf ein Spektrum zwischen 0 und 100 vorgenommen). Je heller die Farbwerte der einzelnen Zellen, um so höher wird ihre Habitateignung eingeschätzt. Um verschiedene Grade der Habitateignung definieren zu können und geeignete von ungeeigneten Zellen zu unterscheiden, sollte ein Schwellenwert festgelegt werden, welcher im gegebenen Fall bei 0,5 bzw. 50 lag.

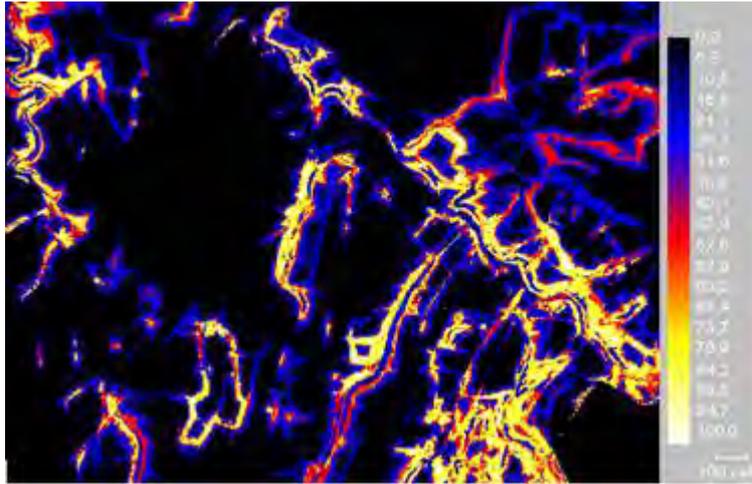


Abb. 4: Habitatauswertungskarte des Untersuchungsgebietes.

Die Karte illustriert deutlich die im Rahmen der Faktorenanalyse ermittelte dominante Bedeutung der EGV „Distanz zu Waldrandzone“. Sämtliche Waldrandbereiche sind durch hohe oder sehr hohe Habitatauswertungswerte gekennzeichnet. Die auftretenden Differenzierungen (hellgelbe bis weiße Einfärbung) bezüglich der Habitatqualität innerhalb dieser Bereiche hoher Eignung sind dabei bedingt durch den Grad der Ausprägung der weiteren unter 4.2 als einflussreich ermittelten Variablen.

5 Diskussion und zukünftige Forschungsaktivitäten

Die aufgeführten Resultate entstammen einem laufenden Forschungsprojekt und stellen daher vorläufige Ergebnisse dar. Allerdings lassen sich bereits einige Schlussfolgerungen ziehen, speziell bezüglich des Potentials der ENFA für Habitatauswertungsmodellierungen für den Rotmilan. Die Methode erscheint als geeignet für diese Art von Analysen und sie produziert vielversprechende Resultate, sogar bei ausschließlicher Berücksichtigung nur weniger EGV, die bisher in die Auswertungen einbezogen wurden.

Im weiteren Projektverlauf wird die Einbeziehung einer größeren Zahl von EGV in die ENFA angestrebt, um genauere Rückschlüsse auf die essentiellen Habitatrequisiten des Rotmilans ziehen zu können. Hierzu ist geplant, neben den bisherig berücksichtigten topographischen und distanzbezogenen Variablen weiterhin solche Kenngrößen einzubeziehen, welche Aussagen zur Landschaftskomposition und zur räumlichen Ausprägung und Anordnung der einzelnen Landschaftselemente ermöglichen. Letzteres soll über die Berücksichtigung von Landschaftsstrukturindices (landscape metrics) realisiert werden, um die Präferenzen des Rotmilans für bestimmte räumliche Charakteristika und Verteilungsmuster von Landschaftselementen quantifizieren und somit in die Analysen einbeziehen zu können. Auch wird das Untersuchungsgebiet vergrößert, um eine höhere Anzahl an Rotmilanhorsten in die Auswertungen einzuschließen und so eine verlässlichere Interpretierbarkeit der Resultate zu erzielen.

Es zeigen sich – wie bei allen Analysetechniken – einige Schwachpunkte des Verfahrens. Hier ist die Möglichkeit zu nennen, dass eine Variable nicht aufgrund ihrer intrinsischen Bedeutung mit einem Faktor korreliert, sondern vielmehr mit einer anderen relevanten Variablen, was oftmals schwer auszumachen ist (HIRZEL et al. 2002a). Solch fälschliche Schlussfolgerungen können in Ansätzen wie der ENFA auftreten, welche nicht auf die Aufdeckung von Ursache-Wirkungs-Beziehungen ausgelegt sind, sondern ausschließlich deskriptiven

Charakter haben. Weiterhin gilt es zu beachten, dass die Ergebnisse vom globalen Set an Zellen abhängen, d.h. vom Untersuchungsgebiet als dem Referenzdatensatz in der Bestimmung von Marginalität und Spezialisierung der untersuchten Species.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass das Verfahren der ENFA zur Analyse der Habitataignung von Landschaften auf Basis der beschriebenen Erfahrungen ein überzeugendes Potential aufweist.

Literaturverzeichnis

- BEGON, M., HARPER, J.L. & TOWNSEND, C.R., 1996: Ecology. Blackwell Science. Oxford, UK.
- DECOURSEY, D.G., 1992: Developing models with more detail: do more algorithms give more truth? *Weed Technol.* **6**:709-715.
- DETKI, H., LÖFSTRAND, R. & EDENIUS, L., 2003: Modeling habitat suitability for moose in coastal Northern Sweden: Empirical vs. process-oriented approaches. *Ambio* **33** (8):549-556.
- GUISAN, A. & ZIMMERMANN, N.E., 2000: Predictive habitat distribution models in ecology. *Ecological Modelling* **135**:147-186.
- GUSTAFSON, E.J., 1998: Quantifying landscape spatial pattern: What is the state of the art? *Ecosystems* (**1998**) **1**:143-156.
- HIRZEL, A.H., HAUSSER, J., CHESSEL, D. & PERRIN, N., 2002a: Ecological-niche factor analysis: How to compute habitat-suitability maps without absence data? *Ecology* **83**:2027-2036.
- HIRZEL, A.H., HAUSSER, J. & PERRIN, N., 2002b: Biomapper 3.1. Lausanne, Lab. for Conservation Biology. URL: <http://www.unil.ch/biomapper>.
- HUTCHINSON, G.E., 1957: Concluding remarks. Cold Spring Harbour Symposium on Quantitative Biology **22**:415-427.
- KLENKE, R., & ULBRICHT, J., 2000: Beeinflussen Zerschneidungen die Verteilung von Greifvögeln im Raum? In: STUBBE, M., and A. STUBBE (Eds.), Populationsökologie von Greifvogel- und Eulenarten (Band 4). Wissenschaftliche Beiträge – Gesellschaft für Wildtier- und Jagdforschung. Martin-Luther-Universität Halle Wittenberg. Halle/Saale 2000. pp. 69-99.

Untersuchungen zur Eignung der digitalen Luftbildkamera Vexcel UltraCamD für forstliche und landschaftsökologische Anwendungen

HANS-JÖRG FUCHS¹, UTA FRICKE¹, PAUL MAGDON¹, DANIEL PADBERG¹,
MARTIN SIEWERT¹ & KAI BÖTTCHER²

Zusammenfassung: In den letzten Jahren wurden bemerkenswerte Fortschritte in der Entwicklung digitaler optischer Sensoren für großformatige Luftbildkameras erzielt. Ein Beispiel ist die von der Firma Vexcel Imaging entwickelte digitale Luftbildkamera UltraCamD, die bereits operational für fotogrammetrische Anwendungen eingesetzt wird. Im Jahr 2004 wurde eine digitale Befliegung des Müritz-Nationalparks in Mecklenburg-Vorpommern mit der UltraCamD in einer Flughöhe von ca. 2200 m durchgeführt. Mit Hilfe eines digitalen fotogrammetrischen Systems wurden multispektrale Orthofotos, digitale Stereomodelle und dreidimensionale Oberflächenmodelle erstellt, welche die Grundlage für weitere Analysen waren. Am Beispiel einer Fallstudie wurden aus den digitalen Bildinhalten Attribute wie Baumhöhe, Baumkronendimensionen, Baumart und Vitalität ermittelt. Die thematische und geometrische Genauigkeit der aus den digitalen Bildern erfassten Baum- und Bestandesmerkmale wurde näher untersucht. Als Referenz standen Messungen einer Total-Station, eines differenziellen GPS und zeitnah zur Befliegung durchgeführte Feldaufnahmen zur Verfügung.

1 Einleitung

Vorteile der direkten digitalen Bildaufzeichnung mit flugzeuggestützten digitalen Matrixkameras gegenüber analogen Messkameras liegen in dem Verzicht auf Entwicklung und Scannen der Filmemulsionen, der höheren radiometrischen Auflösung, dem Einsatz multispektraler Kanäle und der Möglichkeit zur Kalibrierung der spektralen Sensitivität. Im Vergleich zu einer Analog/Digital -Wandlung mittels Filmscanner wird über geringere Informationsverluste und ein besseres Signal/Rausch-Verhältnis berichtet (LEBERL et al. 2003).

Nachteile in der Verwendung der neuen Technik liegen sowohl in den Folgekosten zur langfristigen Archivierung und Verarbeitung der digitalen Daten als auch in der zur Zeit begrenzten Verfügbarkeit von Software, die den höheren Informationsgehalt der digitalen Bilder erschließt.

In den letzten Jahren ist in Forstwirtschaft und Umweltkontrolle ein erhöhter Bedarf an Inventurdaten zu beobachten. Dem stehen begrenzte finanzielle Mittel gegenüber, so dass zunehmend Fernerkundungsdaten für Wald- und Landschaftsinventuren eingesetzt werden. Gleichzeitig ist die Automatisierung der traditionellen Auswertungsmethoden wie visueller (manueller) Photointerpretation und Photogrammetrie ein intensiver Forschungsbereich, der nicht auf Stadtsiedlungen begrenzt ist.

¹ Institut für Waldinventur und Waldwachstum, Fakultät für Forstwissenschaften und Waldökologie, Georg-August-Universität Göttingen, Büsgenweg 5, 37077 Göttingen, hfuchs@gwdg.de, ufricke@gwdg.de, pmagdon@gwdg.de, dpadber@gwdg.de, msiewer@gwdg.de

² Landesamt für Forsten und Großschutzgebiete Mecklenburg- Vorpommern, Dezernat 33, Sachgebiet Fernerkundung, Zeppelinstraße 3, 19061 Schwerin, k.boettcher@lfq.mvnet.de

Die automatische Erkennung von Bäumen aus digitalen Bildaufzeichnungen eröffnet neue Wege der Informationsgewinnung in Waldbeständen. Diese Möglichkeiten liegen nicht nur in einer schnelleren Verfügbarkeit, sondern auch in einer neuen Informationsqualität auf lokaler Ebene (GOUGEON & LECKIE 2003).

Ziel der vorliegenden Fallstudie ist die Ableitung von Attributen wie Baumhöhe, Baumart, Kronenschirmfläche und Vitalitätszustand aus multispektralen Matrixkameraaufzeichnungen der UltraCamD (Vexcel Imaging). Die thematische und geometrische Qualität wird im Vergleich zu Feldaufnahmen bewertet. Diese Grundlagen sollen in einem weiterführenden Schritt zu einem automatischen Extraktionsverfahren von Baumattributen mit einer objektbasierten Klassifizierung führen.

2 Untersuchungsgebiet

Das Untersuchungsgebiet befindet sich im Müritz-Nationalpark in Mecklenburg-Vorpommern nördlich der Bahnstrecke von Neustrelitz nach Waren (Abb. 1). Das Gelände mit Höhenunterschieden von ca. 20 m liegt nahe der Endmoräne der Weichselvereisung im Pommerschen Sander (LFG 2003). Im Jahr 2000 wurde hier eine Waldmonitoringfläche (ca. 28.5 ha) eingerichtet. Der Waldbestand besteht aus einem mehrstufigen Traubeneichen-Buchen-Mischbestand, der aus Pflanzung hervorgegangen ist (Tab. 1).

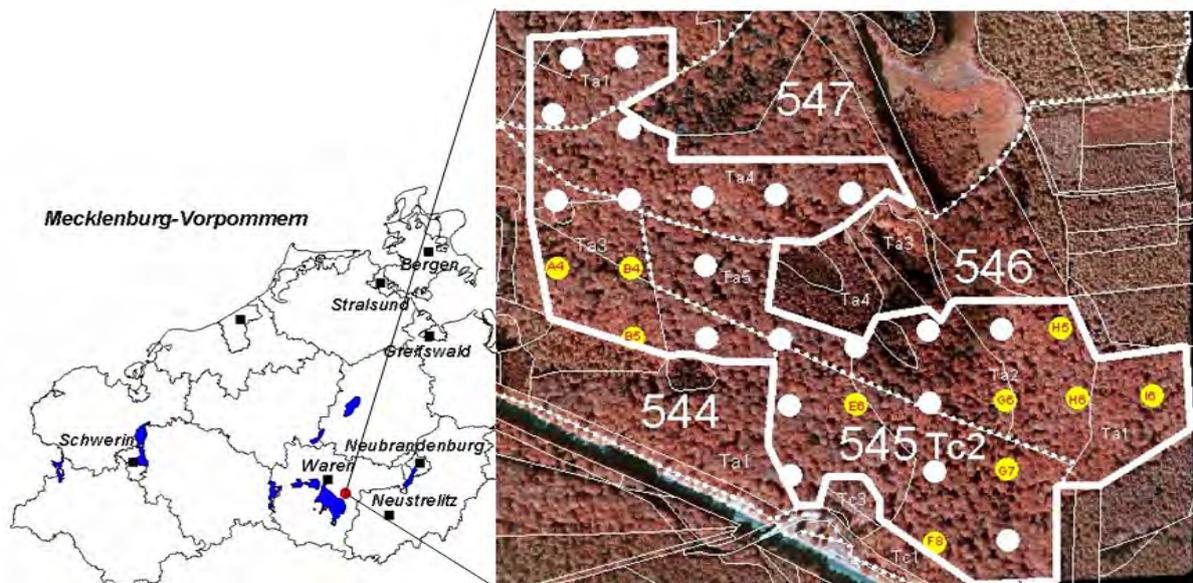


Abb. 1: Ausschnitt aus dem Orthofoto im Bereich der Monitoringfläche (weiß umrandet); überlagert mit den Abteilungsgrenzen der Forstgrundkarte (weiß gepunktet), Stichprobenpunkte für Vitalitätsuntersuchungen (gelb); die Beiträge 4.1-4.2 beziehen sich ausschließlich auf Unterabteilung 545 Tc2

Tab. 1: Bestandesdaten der Monitoringfläche aus dem Datenspeicher Wald (LFG MV 2004).

Abteilung	Oberstand	Alter	Unterstand	Alter	Mittelhöhe	Mittendurchmesser
544 a3	Eiche/Buche	120 / 120	Buche	41/ 17j.	29,5 m	32,7 cm
545 c2	Eiche/Buche	130 / 130	Buche	47j.	30 m	39,8 / 45,8 cm
546 a1	Eiche/Buche	130	Buche	66j.	26,5 m	35,8 cm
546 a2	Eiche/Buche	125/125	Birke/Buche	71/15j.	28 m	39,8 / 36,8 / 28,9 cm

3 Methoden

3.1 Feldaufnahmen

Die Feldaufnahmen wurden im August 2004 zeitnah zur Befliegung durchgeführt und beschränken sich auf die Teilfläche Abt. 545c2. Die Referenzerhebungen für die Untersuchungen zur Vitalität der Eichen wurden vom Müritz-Nationalpark durchgeführt und orientieren sich an dem Verfahren der europäischen Waldzustandserfassung (UN-EC 2004). Sämtliche Lage- und Höhenpunkte wurden mit der Totalstation GTS 700 der Firma Topcon im Landeskoordinatensystem eingemessen. Als Referenz dienten topographische Fest- und Höhenpunkte des Landes Mecklenburg-Vorpommern. Die Auswahl der Bäume orientierte sich an dem Stichprobenetz der Nationalpark-Verwaltung. An jedem Stichprobenpunkt innerhalb der Teilfläche wurden drei Eichen und drei Buchen nach folgenden Kriterien ausgewählt: 1. die Baumkronen müssen im Digitalbild sichtbar sein, 2. keine abgestorbenen Bäume, 3. möglichst starke Variation in Kronenform und -größe, 4. Kronen vollständig innerhalb der Teilfläche, 5. die Baumhöhe sollte terrestrisch von mehreren Seiten messbar sein. Wie aus diesen Kriterien ersichtlich, handelt es sich hierbei um eine subjektive Auswahl, die einem systematischen Muster folgt. Insgesamt wurden 27 Buchen und 27 Eichen ausgewählt.

3.1.1 Tachymetrische Geländeaufnahme

Ziel der Messungen war die Erstellung eines digitalen Geländemodells (DGM) mit einer Schrittweite von 10m. Das Gelände wurde streifenweise in Nord-Süd Richtung aufgenommen. Dazu wurden im Abstand von 30m Geraden abgesteckt. Die Aufnahme erfolgte entlang der Fluchten sowie parallel dazu. In besonders stark profilierten Bereichen wurde die Punktdichte erhöht. Insgesamt wurden 1480 Geländepunkte auf einer Fläche von 8,68ha gemessen. Zur Kontrolle wurde die tachymetrische Aufnahme mit differentiellen GPS-Messungen der Stichprobenpunkte des Monitoring-Programmes verglichen. Die Abweichungen lagen bei $RMS_x = 0,54m$, $RMS_y = 0,46m$ und $RMS_{xy} = 0,71m$.

Es liegen uns keine konkreten Genauigkeitsangaben zu den differentiellen GPS-Messungen der Forsterwaltung vor. Es ist jedoch davon auszugehen, dass der RMS_{xy} der tachymetrischen Geländeaufnahme geringer als die hier bestimmten Lagefehler ist.

3.1.2 Kronenablotung

Mit Hilfe eines in unserem Institut entwickelten Kronenspiegels wurde die von einer Baumkrone überschirmte Fläche horizontal auf den Boden projiziert. Diese Fläche wird im Folgenden als Kronenschirmfläche bezeichnet. Jede Kronenschirmfläche wird mit acht Punkten definiert. Die Reihenfolge der Punkte ist festgelegt, wobei der erste Punkt immer vom Stammfuß aus in Richtung Norden liegt und die folgenden Punkte jeweils um 45° versetzt angepeilt werden. Die Koordinaten der Polygonpunkte wurden direkt mit der Totalstation erfasst.

3.1.3 Baumhöhenmessung

Die Baumhöhe wurde nach dem trigonometrischen Prinzip mit dem Ultraschall-Höhenmesser Vertex III der Firma Haglöf Sweden AB ermittelt. Für jeden Baum wurde die Höhe aus vier Richtungen (Nord, Süd, Ost, West) gemessen und zusätzlich der Brusthöhendurchmesser (BHD) registriert.

3.2 Bildauswertung

Die Befliegung wurde im Auftrag des Landesamtes für Forsten und Großschutzgebiete Mecklenburg-Vorpommern von der Firma IFMS durchgeführt. Die technischen Daten der digitalen Luftbildkamera UltraCamD und des Bildfluges werden in Tab. 2 wiedergegeben. Die UltraCamD besteht aus einem Satz von 9 mittelformatigen CCD-Sensoren, die zu einem großformatigen panchromatischen Bild zusammengesetzt werden. Die multispektralen Bildkanäle werden mit vier zusätzlichen CCD-Sensoren mit einer geringeren geometrischen Auflösung registriert und mit dem panchromatischen Bild fusioniert. Die radiometrische Auflösung beträgt 12 bit wird aber mit 16 bit gespeichert (LERBERL, et. al., 2003).

Tab. 2: Technische Daten der Matrixkamera UltraCamD und des Bildfluges.

Matrixkamera	Panchromatisches Bildformat	11500x7500, 103,5 x 67,5 mm
	Multispektrales (R,G,B,NIR) Bildformat	2400 x 3680
	Brennweite (panchrom. / multispektral)	101,4 mm / 101,4 mm,
	Radiometrische Auflösung	12 bit (registriert mit 16 bit)
	Physische Pixelgröße (panchrom. / multispektral)	9 x 9µm / 28,125 x 28,125 µm
	Spektralbereiche	
	Band 3	Blau 390 – 530 nm
	Band 2	Grün 470 – 660 nm
	Band 1	Rot 570 – 690 nm
Band 4	NIR 670 – 940 nm	
Bildflug	Längs-/Querüberdeckung	80% / 30%
	Bodenauflösung	12,8 cm
	Flughöhe	Ca. 2200 m
	Aufnahmedatum / -zeit	3.9.2004, 13:55h

Als photogrammetrisches Auswertungssystem wurde die Software Leica Photogrammetry Suite (LPS) mit Stereoanalyst 1.0 und Imagine 8.7 (LEICA GEOSYSTEMS) eingesetzt.

Die Orientierung eines Blockes aus vier digitalen Bildern basiert auf einer Bündelausgleichung unter Verwendung von sechs Passpunkten. Die Koordinaten der Passpunkte wurden aus der tachymetrischen Geländeaufnahme (s. Kap. 3.1.1) und photogrammetrisch aus einem Bildflug des Landesvermessungsamtes im Jahr 2002 bestimmt. Als Ergebnis der Triangulation bleiben die mittleren quadratischen Lage- und Höhenfehler unter 10cm.

Das digitale Oberflächenmodell (DOM) wurde mit Hilfe einer automatischen Bildkorrelation mit Schrittweite von 20cm erstellt und liegt der Berechnung des multispektralen digitalen Orthophotos mit vier Kanälen und einer Pixelgröße von 13cm in Bodenauflösung zu Grunde.

Die Differenz aus photogrammetrischem DOM und terrestrischem Geländemodell (DGM) ergibt ein normalisiertes digitales Oberflächenmodell (NDOM). Zur photogrammetrischen Baumhöhenmessung wird der maximale Wert des NDOM innerhalb der terrestrisch gemessenen Kronenpolygone bestimmt.

Die spektrale Analyse zur Baumartenerkennung beruht auf dem Mittelwert der Grauwerte innerhalb der im Gelände abgeloteten Kronenpolygone. Zur Charakterisierung der spektralen Veränderung in Folge von Blattverlust wurden terrestrisch beobachtete Eichen in den Digi-

talbildern identifiziert und deren Kronenschirmflächen im Stereomodus kartiert. Zur Bildanalyse werden zusätzliche Kanäle berechnet:

Tab 3: Zusätzliche Bildkanäle zur Bildverbesserung.

Bezeichnung	Symbol
Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)	$NDVI = \frac{NIR - ROT}{NIR + ROT}$
Vegetationsindex (VI)	$VI = NIR - ROT$
Textur Variance	$Variance^3 = \frac{\sum (x_{ij} - M)^2}{n - 1}$
Hauptkomponenten der vier Bänder des digitalen Orthofotos	$PC1, PC2, PC3, PC4$

4 Ergebnisse

4.1 Baumhöhe und Kronenschirmfläche

Beim Vergleich von terrestrisch und photogrammetrisch gemessenen Baumhöhen wurde eine unterständige Buche als Extremwert ausgeschlossen. Mit Ausnahme von zwei Buchen und einer Eiche konnten im digitalen Luftbild alle Bäume mit Hilfe der Felddaten eindeutig identifiziert und deren Kronenschirmfläche im Stereomodus kartiert werden.

Die mittlere Standardabweichung der vierfachen Wiederholung jeder Baumhöhenmessung im Gelände aus verschiedenen Richtungen beträgt bei Buche und Eiche 0,9m.

Die statistischen Kennwerte der Höhenmessungen belegen eine systematische Unterschätzung der Mittelhöhen im digitalen Luftbild (Tab. 4). Diese wird bestätigt durch negative mittlere arithmetischen Fehler (Tab. 5) und Ergebnisse der Regressionsanalyse (Abb. 2).

Bei der Kartierung im Luftbild werden die Kronenschirmflächen der Buchen tendenziell unterschätzt, während bei den Eichen keine wesentlichen Unterschiede festgestellt werden. Die Bestimmtheitsmaße der linearen Regressionsanalyse für Buche und Eiche sind niedriger als erwartet. Die Regressionsmodelle sind jedoch zur Ableitung von Bestandesmittelhöhen und mittleren Kronenschirmflächen aus digitalen Luftbildmessungen geeignet.

³ wobei x_{ij} = Grauwert in Zeile i und Spalte j, n = Anzahl Pixel im Suchfenster, $M = \frac{\sum x_{ij}}{n}$

Tab. 4: Beschreibende Statistik der Baumhöhen- und Kronenschirmflächenmessungen, N = Anzahl, Mean = arithmetischer Mittelwert, SD = Standardabweichung.

		Baumhöhe					Kronenschirmfläche				
	Messung	N	Mean [m]	Min. [m]	Max. [m]	SD [m]	N	Mean [m ²]	Min. [m ²]	Max. [m ²]	SD [m ²]
Buche	Gelände	26	30,6	27,4	33,9	1,7	27	96,8	16,6	198,2	39,6
	Luftbild	26	29,3	26,6	32,2	1,6	25	83,8	14,6	181,6	41,8
Eiche	Gelände	27	29,6	26,6	33,4	1,7	27	56,5	20,4	96,2	22,7
	Luftbild	27	28,7	26,0	32,2	1,5	26	62,6	11,5	183,4	38,0

Tab 5: Statistische Kennwerte der Abweichungen zwischen terrestrischer und photogrammetrischer Baumhöhen- bzw. Kronenschirmflächenmessung, N = Anzahl, RMS = mittlerer quadratischer Fehler, MAF = mittlerer absoluter Fehler, Mean = mittlerer arithmetischer Fehler, SD = Standardabweichung.

	Baumhöhe					Kronenschirmfläche				
	N	RMS [m]	MAF [m]	Mean [m]	SD [m]	N	RMS [m ²]	MAF [m ²]	Mean [m ²]	SD [m ²]
Buche	26	1,5	1,4	-1,2	1,6	25	34,2	24,0	-15,6	31,0
Eiche	27	1,5	1,4	-0,9	1,2	26	22,3	13,0	4,8	22,3

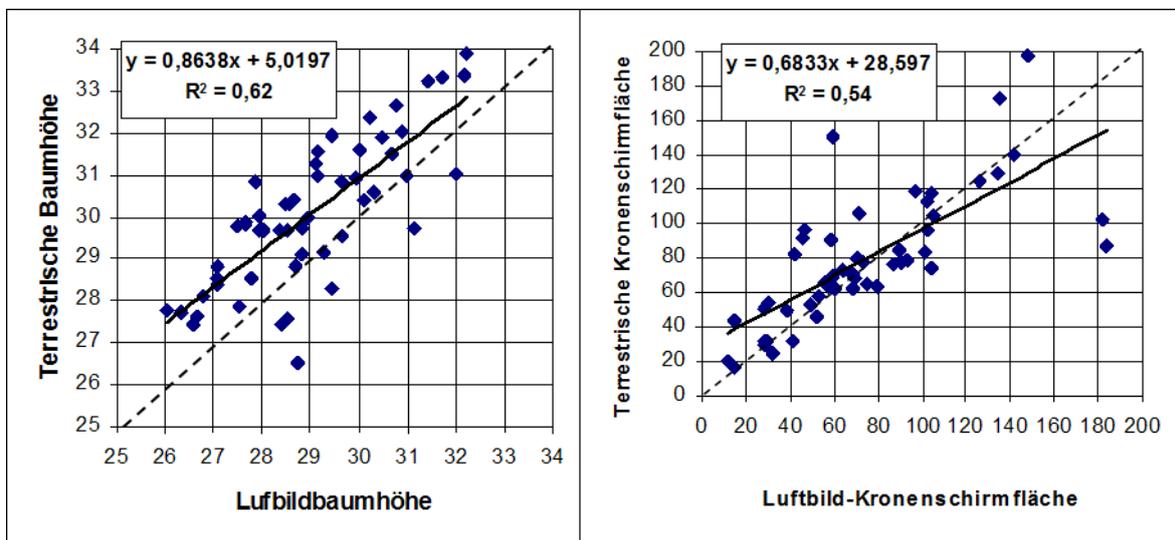


Abb. 2: Lineare Regressionsmodelle (durchgezogene Linie) der terrestrischen Messungen als abhängige Variable und Luftbildmessungen als unabhängige Variable im Vergleich zu einer optimalen Übereinstimmung mit $y = x$ (gestrichelte Linie). (Buchen und Eichen zusammengefasst).

4.2 Baumartenerkennung

Im Folgenden werden quantitative Unterschiede zwischen Buchen und Eichen, welche sich aus dem digitalen Ortholuftbild ableiten lassen, beschrieben.

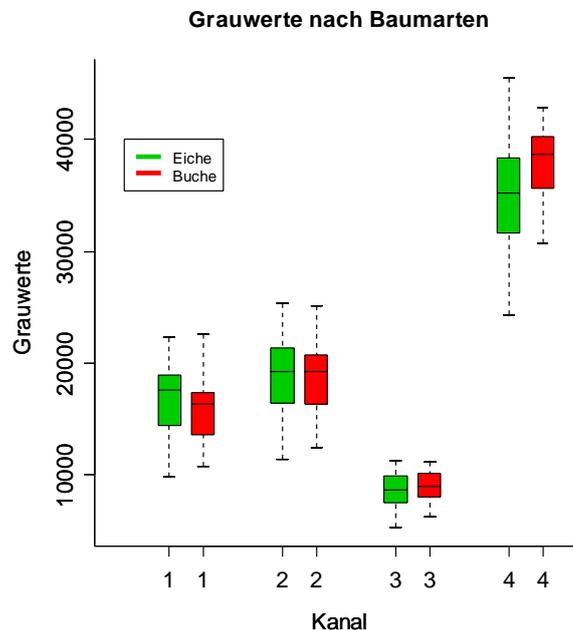


Abb. 3: Boxplot der Grauwerte der 4 Bänder des digitalen Orthophotos nach Baumarten getrennt.

Wie aus Abb. 3 hervorgeht, gibt es nur geringe Unterschiede im sichtbaren Bereich des elektromagnetischen Spektrums (blau, grün und rot). Deutliche Unterschiede sind im nahen Infrarot zu beobachten. Hier werden auch die höchsten Grauwerte registriert, was sich mit der allgemeinen Aussage deckt, dass Vegetation am stärksten im Bereich des nahen Infrarot reflektiert. Die vermuteten Unterschiede im nahen Infrarot wurden mit Hilfe des t-Testes verifiziert.

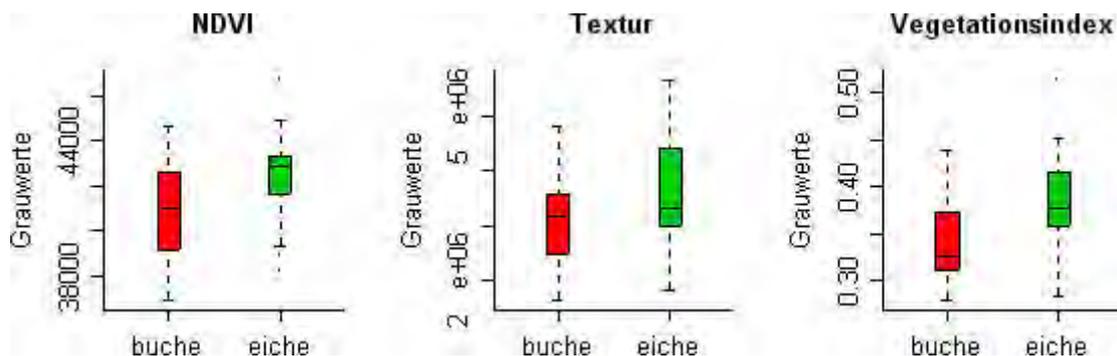


Abb. 4: Boxplot der Grauwerte der zusätzlichen Bildkanäle NDVI, Textur und VI

Wie es Abb. 4 zu entnehmen ist, sind die Unterschiede in allen drei zusätzlichen Kanälen deutlich ausgeprägt. Dies bestätigt auch der durchgeführte t-Test. Zusammenfassend sind spektrale Unterschiede zwischen Buchen und Eichen im digitalen Orthophoto zu erkennen und diese lassen sich auch quantifizieren.

4.3 Vitalitätszustand

Werden die mittleren Grauwerte der im Luftbild manuell kartierten Eichenkronen gegen die jeweils im Gelände beobachteten Blattverluste (BV) aufgetragen, so ergibt sich für keines der vier originalen Bänder des digitalen Orthobildes eine eindeutige Korrelation. Ähnlich verhält es sich bei Verwendung des NDVI des Orthobildes. Da gerade die Beziehung zwischen Vitalitätszustand und Reflektion für den infraroten Bereich schon vielfach bestätigt wurde, wird vermutet, dass weitere Faktoren wie z.B. Chlorose der Blätter diese überlagern.

Der Vegetationsindex VI und die zweite und dritte Hauptkomponente (PC2 und PC3) lassen hingegen eine Abnahme der Reflektion mit zunehmenden Blattverlust erkennen (Abb. 5, 6 und 7). Auch FUCHS (2003) hebt hervor, dass sich die PC2 bei der Diskriminanzanalyse zur Trennung von Kronenverlichtungsstufen bei der Eiche als vorteilhaft erwies. Ein generell bei Vitalitätsuntersuchungen auftretendes Problem ist die geringe Datengrundlage in den Klassen mit hohem Blattverlust.

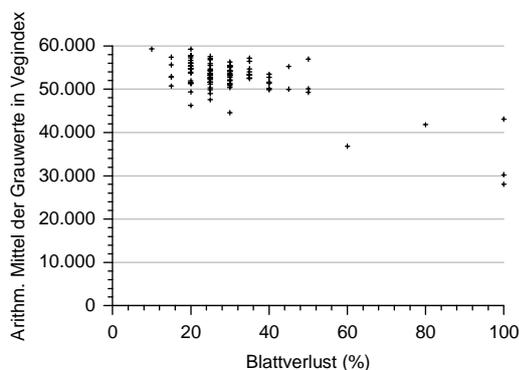


Abb. 5: Mittlere Grauwerte des Vegetationsindex (NIR-ROT) für 94 Luftbild sichtbare Eichen über dem terrestrisch geschätztem Blattverlust (in 5%-Stufen).

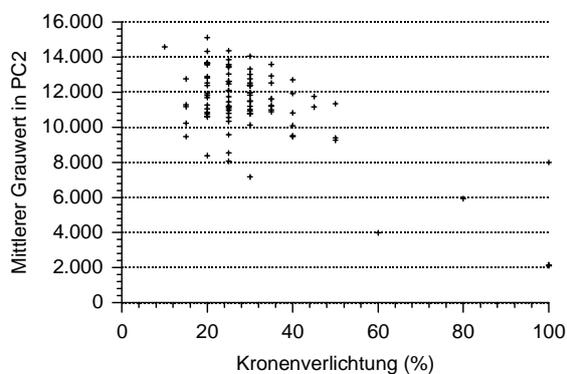


Abb. 6: Mittlere Grauwerte der 2. Hauptkomponente des digitalen Orthofotos für Eichen über terrestrisch geschätztem Blattverlust

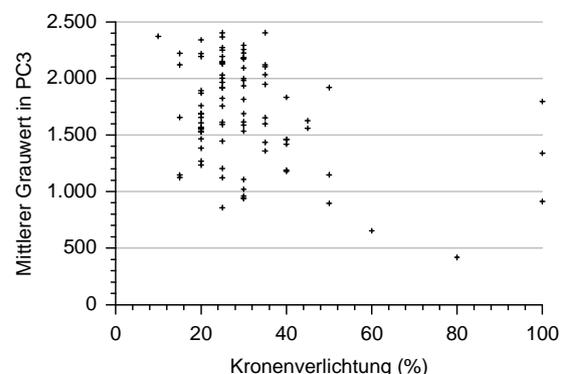


Abb. 7: Mittlere Grauwerte der 3. Hauptkomponente des digitalen Orthofotos für Eichen über terrestrisch geschätztem Blattverlust.

5 Schlussfolgerungen

Die Ergebnisse dieser Studie zeigen, dass höchstauflösende digitale Aufnahmen der Luftbildkamera UltraCamD erfolgreich für die Schätzung von Baumhöhe, Kronenschirmfläche, Baumart und Vitalität eingesetzt werden können.

Die digitalen Oberflächenmodelle aus Bildkorrelation führen zu einer systematischen Unterschätzung der Luftbildbaumhöhen gegenüber der trigonometrischen Baumhöhenmessung im Gelände. Gleiche Tendenzen und Fehlergrößen nennen andere Autoren für Laserscanning-Auswertungen (z.B. GAVEAU & HILL 2003). Die Messfehler der terrestrischen Höhenmes-

sung von Laubbäumen in der Vegetationszeit nach dem trigonometrischen Prinzip liegen selbst bei Verwendung eines Ultraschall-Höhenmessers im Bereich von einem Meter. Sind bereits qualitativ hochwertige Geländemodelle vorhanden, so können aus den digitalen Luftbildern Bestandesmittelhöhen abgeleitet werden, die forstlichen Genauigkeitsanforderungen genügen.

Die Untersuchungen bestätigen verbesserte radiometrische, spektrale und geometrische Eigenschaften der digitalen Luftbilder. Bei der Interpretation von Baumarten als auch Vegetationsschäden ist der infrarote Kanal NIR unverzichtbar.

Dennoch sind Interpreten beim Betrachten eines digitalen Echtfarben-Orthobildes in der Lage Buchen und Eichen zu unterscheiden, da sie über die Fähigkeit verfügen, Strukturen innerhalb der Baumkronen wahrzunehmen, die quantitativ als Textur beschrieben werden. Die hier dargestellten Unterschiede sind ermutigend im Hinblick auf eine automatisierte, objektorientierte Klassifizierung von Baumarten und Vegetationsschäden.

6 Literatur

- FUCHS, H.-J., 2003: Methodische Ansätze zur Erfassung von Waldbäumen mittels digitaler Luftbildauswertung. Diss. Univ. Göttingen.
- GAVEAU, D.L.A. & HILL, R.A., 2003: Quantifying canopy height underestimation by laser pulse penetration in small-footprint airborne laser scanning data. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 29, 5: 650-657.
- GOUGEON, F. & LECKIE, D.G., 2003: Forest information extraction from high spatial resolution images using an individual tree crown approach, Information report BC-X396, Canadian Forest Service, British Columbia.
- LANDESANSTALT FÜR FORSTEN UND GROßSCHUTZGEBIETE (LFG) (2003): Forstliche Standortskartierung in Mecklenburg-Vorpommern, Teil A Wuchsgebiete und Wuchsbezirke, Bd. II: Wuchsgebiete.
- LEBERL, F., GRUBER, M. PONTICELLI, M., BERNOEGGER, S. & PERKO, R., 2003: The Ultra-Cam large format aerial digital camera system. *Proceedings of the American Society for Photogrammetry & Remote Sensing*, 5-9 May, 2003, Anchorage, Alaska.
- POULIOT, D.A, KING, D.J., BELL, F.W. & PITT, D.G., 2002: Automated tree crown detection and delineation in high-resolution digital camera imagery of coniferous forest regeneration. - *Remote Sensing of Environment*, 82: 322-334.
- UN/ECE, 2004: Manual on methods and criteria for harmonized sampling, assessment, monitoring and analysis of the effects of air pollution on forests. Part II. Visual assessment of crown condition. http://www.icp-forests.org/pdf/Chapt2_compl2004.pdf.

Erfassung von Veränderungen der Gehölzstrukturen (1979-1999) im Offenlandbereich der Stadt Göttingen mittels Luftbildern und Felderhebungen

CHRISTOPH KLEINN¹, STEFAN KUNTH¹ TIM EXNER², UWE SCHEIBLER²

Zusammenfassung: Gehölzstrukturen in der offenen, landwirtschaftlich geprägten Landschaft besitzen eine hohe ökologische und landschaftsästhetische Bedeutung. Über ihre Entwicklung innerhalb der vergangenen Jahrzehnte ist allerdings wenig belegt.

Die vorliegende Untersuchung erfasst diese Veränderungen durch eine Auswertung von Luftbildern aus den Jahren 1979 und 1999 für den Offenlandbereich der Stadt Göttingen, wobei 9 Gehölzklassen unterschieden werden. Die Veränderungen wurden aus systematisch verteilten Luftbild-Probeflächen visuell interpretiert.

Mit derzeit (2005) laufende Feldaufnahmen mittels Feld GIS und dGPS (Leica GS 20) werden diese Veränderungsanalyse bis in die Gegenwart hinein ergänzen.

Die Studie erfolgte in Kooperation zwischen der Kreisgruppe Göttingen des BUND und der Georg-August-Universität Göttingen unter Beteiligung der Stadt Göttingen.

1 Einleitung und Zielsetzung

Gehölzstrukturen – insbesondere Hecken- und Feldgehölze – haben hinsichtlich der Biotopvernetzung und der Erhaltung der Biodiversität in offenen Agrarlandschaften eine sehr große landschaftsökologische und landschaftsästhetische Bedeutung. In der Auseinandersetzung über das „Ausräumen“ der Landschaft und mögliche Auswirkungen auf den Naturhaushalt fehlt aber eine wissenschaftlich fundierte Diskussions-Grundlage, d.h. eine nachvollziehbare Dokumentation und Kartierung der Zustände zu verschiedenen Zeitpunkten.

Die Fernerkundung ist für eine solche Aufgabenstellung ideal. In dieser Studie soll deshalb die Entwicklung der Hecken- und Feldgehölzstrukturen innerhalb der vergangenen 25 Jahre erfasst und analysiert werden. Mittelfristig können diese Grundlagendaten Teil eines Landschaftsinformationssystems bilden, welches wiederum eine Grundlage für die Entwicklungsplanung des ländlichen Raumes sein kann.

Planung und Durchführung der Studie erfolgte in enger Kooperation zwischen der Kreisgruppe Göttingen des BUND und dem Institut für Waldinventur und Waldwachstum der Georg-August-Universität Göttingen.

2 Material und Methoden

Für das Jahr 1979 lagen Luftbildkarten im Blattschnitt der DGK 5 (2x2 km) vor, die aus schwarz-weiß Luftbildern erstellt wurden. Für 1999 kauften wir Echtfarb-Orthophotokacheln, die eine Flächenabdeckung von jeweils 500x500 m aufweisen (Tab. 1).

¹ Institut für Waldwachstum und Waldinventur, Universität Göttingen, Büsgenweg 5, 37077 Göttingen, email: IWW@uni-forst.gwdg.de, homepage: <http://www.uni-forst.gwdg.de/forst/iww/iww.htm>

² BUND Kreisgruppe Göttingen, Geiststraße 2, 37073 Göttingen, email: mail@bund-goettingen.de, homepage: <http://www.bund-goettingen.de/>

Zu beiden Zeitpunkten (1979 und 1999) erfolgte eine visuelle Interpretation, bei welcher 9 Klassen von Gehölzstrukturen unterschieden wurden (Tab. 2).

Tab. 1: Verwendetes Luftbildmaterial

Aufnahmedatum	Bildart	Bodenauflösung in m	Anzahl
1979	s/w Luftbildkarten im DGK5 Blattschnitt	0,64	140 Luftbildkarten
30.04.1999	Echtfarb Orthophotos im DGK5 Blattschnitt	0,10	64 Orthophoto- kacheln

Tab. 2: Landschaftselemente der Luftbildinterpretation (aus EXNER, 2003).

Landschaftselement	Mindestfläche	Maximalfläche
Gebüsch, Gehölzgruppe incl. Einzelsträucher	keine Mindestgröße	10m Länge
Hecke	keine Mindestbreite, 10m Länge	12m Breite
Feldgehölz	12m Breite, 12m Länge (144m ²)	50m Breite und gleichzeitig Länge über 50m
Einzelbäume, Baumreihen	keine Mindestgröße	
Obstbestände	keine Mindestgröße	
Verbuschungsflächen / Brachen	keine Mindestgröße	
Laubwald (Gehölzanpflanzungen/ waldartige Strukturen) mit dominantem Laubholzanteil	50m Breite und gleichzeitig Länge über 50m	
Kleingärten, Grünanlagen	keine Mindestgröße	
Koniferenbestand (Nadelbaumkulturen und Einzelbäume (Ortsrand))	keine Mindestgröße	
Waldränder		

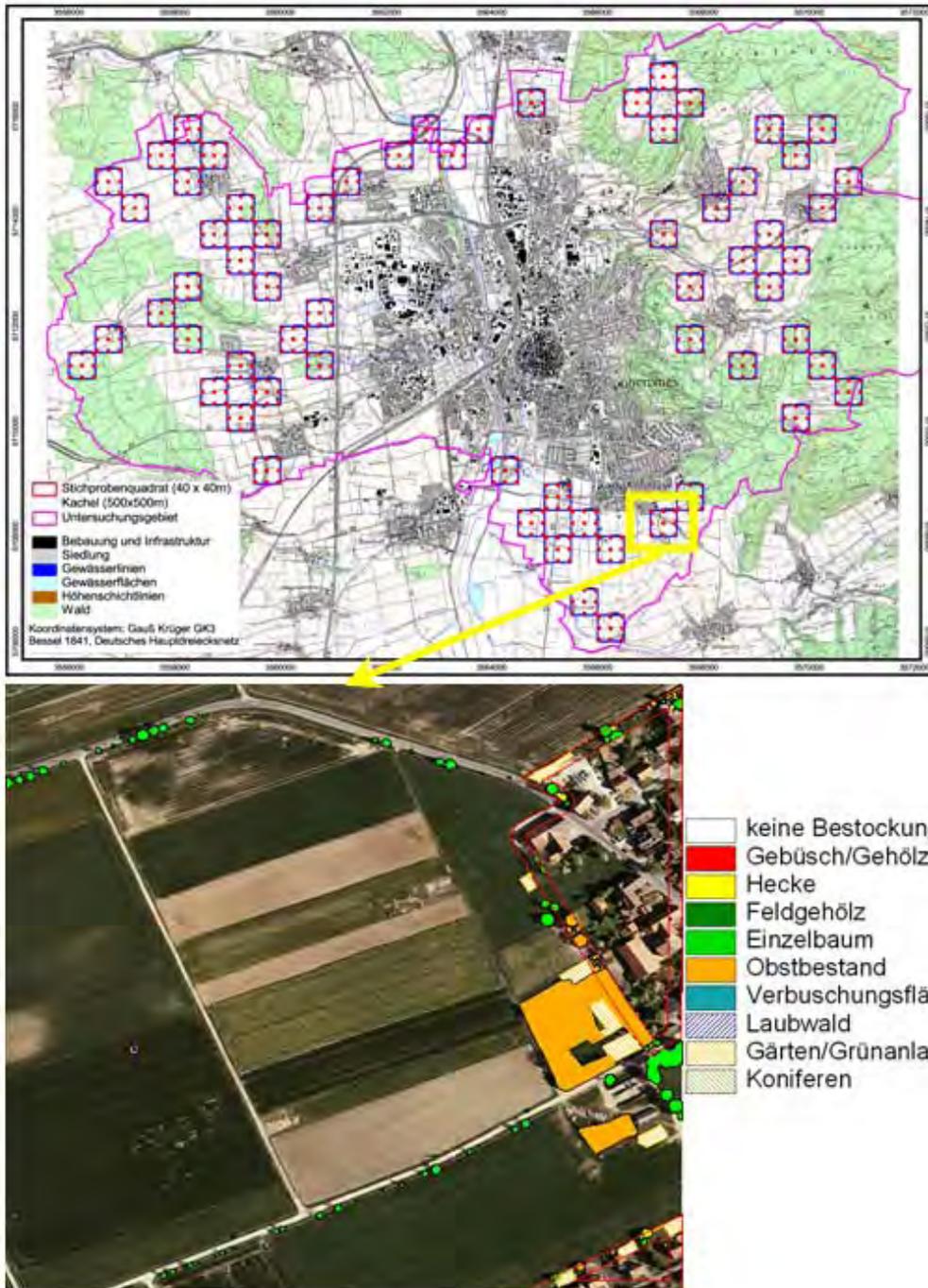


Abb. 1: Das Untersuchungsgebiet und die Lage der Stichprobenflächen (oben) und Beispiel einer Stichprobenkachel (500 x 500 m) der Luftbildkartierung für das Jahr 1999.

Wegen (bekannten) Unterschieden in der Intensität der landwirtschaftlichen Nutzung erfolgte für die Auswertung eine Unterteilung (Stratifizierung) des Untersuchungsgebietes in 4 Teilbereiche (Nord, Ost, Süd und West). Abb. 1 gibt einen Überblick, oben mit einer Übersichtskarte, unten Beispiel einer solchen Kachel.

Die Erfassung der Veränderungen erfolgte dabei nicht über eine vollflächige Interpretation, sondern aus Stichproben. Hierfür wurden auf einem systematischen Raster Probeflächen ausgewählt und deren Gehölz-Kartierungen verschritten. Als Luftbild-Probefläche dienten dabei die 500m x 500m Kacheln der 1999er Orthophotokarte, für welche dann die

entsprechenden Ausschnitte aus den 1979er Luftbildern interpretiert werden. Die Lage der für die Veränderungsanalyse interpretierten Stichproben-Kacheln ist in Abb. 1 ersichtlich. Die Stichproben erlauben dann eine statistisch basierte Schätzung der Veränderungen auf der Gesamtfläche.

3 Ergebnisse

Die hier dargestellten Ergebnisse beschreiben die Entwicklung der Gehölzflächen zwischen 1979 und 1999, die terrestrischen Aufnahmen in 2005 laufen derzeit noch und konnten noch nicht ausgewertet werden.

Die Ergebnisse sind in Abb. 2 zusammenfassend und in Tab. 3 für die vier Teilgebiete dargestellt.

Insgesamt können wir eine Flächenzunahme von Gehölzstrukturen im Offenland der Stadt Göttingen feststellen. Diese pauschale Aussage bedarf jedoch einer genaueren Analyse bezüglich der Veränderungen, welche innerhalb der einzelnen Gehölzklassen stattgefunden haben.

Obstbestände, Hecken oder Gärten bzw. Grünanlagen weisen keine größeren Flächenveränderungen auf. Veränderungen ergeben sich insbesondere für Verbuschungsflächen, die um geschätzte 323'709m² abnahmen und für Laubwald, der gleichzeitig um geschätzte 329351 m² zunahm. Alle anderen Klassen zeigen auf das Gesamtgebiet bezogen eine Zunahme ihrer Flächengrößen.

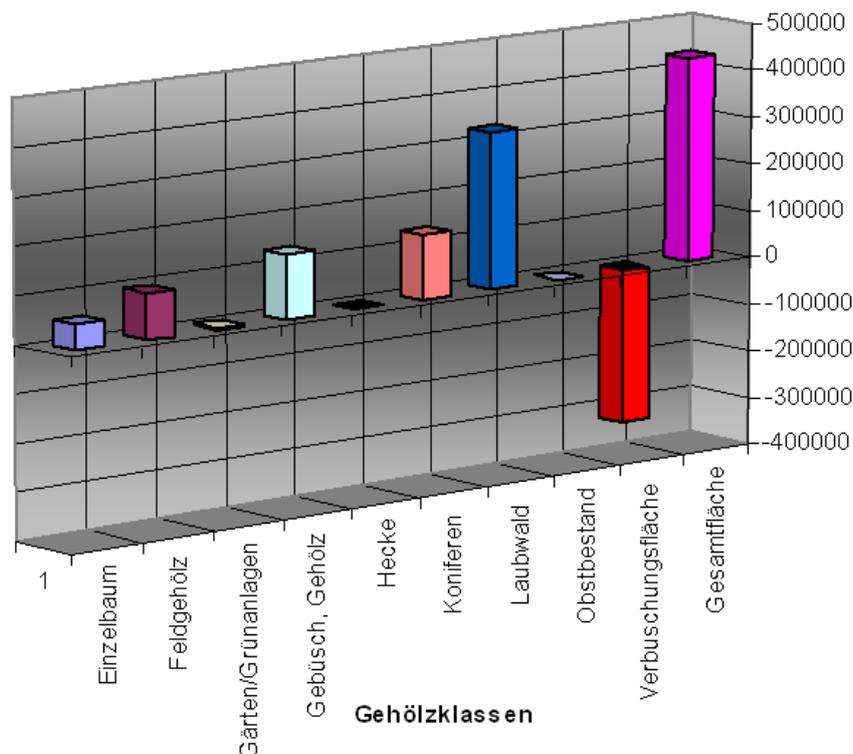


Abb. 2: Flächenveränderung der Gehölzklassen zwischen 1979 und 1999.

Tab. 3: Flächenveränderungen der Gehölzklassen zwischen 1979 und 1999 in den .

Klasse	Teilgebiet				Gesamtfläche
	Nord	Ost	Süd	West	
Einzelbaum	6225,5	13340,7	34718,1	308,7	54593,1
Feldgehölz	-2950,2	-57038,5	159485,9	-3180,8	96316,3
Gärten/Grünanlagen	145,6	3712,1	4439,1	-4154,2	4142,6
Gebüsch, Gehölz	6589,7	8822,0	88644,9	30365,5	134422,1
Hecke	8269,3	-2607,3	31306,4	-37804,0	-835,6
Koniferen	2542,0	74439,2	50540,7	8369,2	135891,1
Laubwald	36734,5	139491,5	705439,7	-552314,6	329351,1
Obstbestand	0,0	-13613,5	32847,2	-18476,4	757,2
Verbuschungsfläche	17141,0	-237168,3	-9743,7	-93937,9	-323708,8
Gesamtfläche	74697,4	-70622,0	1097678,2	-670824,4	430929,2

4 Ausblick

Die dargestellten Arbeiten sind Teil eines noch laufenden Projektes, welches mit der Durchführung einer terrestrischen Inventur im Jahre 2005 abgeschlossen werden wird. In dieser Inventur erfolgt erneut eine Kartierung der Gehölzstrukturen auf den Stichprobenflächen. Zusätzlich interessieren jedoch weitere Attribute wie Grünvolumen, Artenzusammensetzung und Biomasse. Hierfür erfolgt auch eine weitere Unterteilung der erfassten Klassen. Insbesondere die Klassen ‚Hecke‘ sowie ‚Gebüsch/Gehölz‘ werden durch die feinere Abstufung in Strauch, Strauchhecke, Baum bzw. Feldgehölz aufgegliedert.

Die terrestrische Inventur wird mit aktuellen Echtfarb-Luftbildern mit einer Bodenauflösung von ca. 0,05m ergänzt werden. Diese Luftbilder sollen als Stereomodelle eingerichtet werden. Daraus werden die Höhen der Gehölze extrahiert, so dass für jedes Gehölz ein digitales Oberflächenmodell (DOM) zur Verfügung steht, aus dem die absolute Höhe mit hoher Genauigkeit abgeleitet werden kann, welche als Eingangsgröße für die Errechnung des Grünvolumens dienen wird (KLEINN et al., 2005).

Die terrestrische Vermessung erfolgt als Stichprobenaufnahme innerhalb der für die Veränderungsanalyse verwendeten Luftbildprobenflächen von der Größe einer Orthophotokachel. Innerhalb einer solchen Orthophotokachel (500x500 m) werden 9 quadratische Probenflächen der Größe 40m x 40m systematisch angelegt (Abb. 3), vermessen und nach Tab. 4 klassifiziert. Es handelt sich also um ein zweistufiges Stichprobenverfahren, in welchem die Orthophotokacheln als Primäreinheiten gelten, innerhalb derer in systematischer Weise Sekundäreinheiten ausgewählt werden. Neben der Flächengröße erheben wir dendrometrische Variablen zur genaueren thematischen Beschreibung der Gehölzstrukturen.

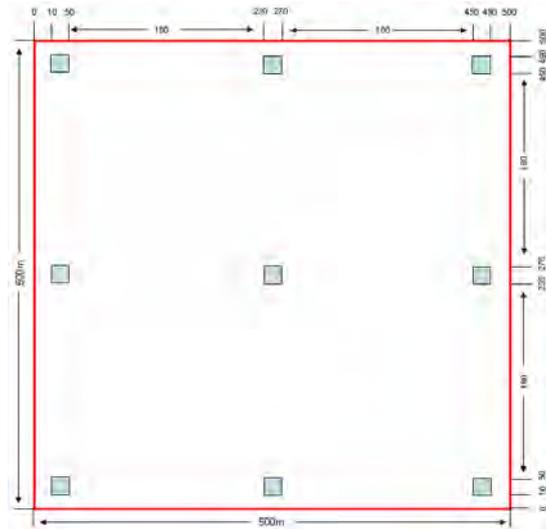


Abb. 3: Lage der quadratischen Stichprobenflächen der terrestrischen Inventur.

Tab. 4: Landschaftselemente der terrestrischen Inventur.

Landschaftselement	Beschreibung
Baumhecke	Hecke über 1,30m Höhe, Bäume mit BHD > 7cm sind enthalten und werden nicht separat aufgenommen
Einzelbaum / Baumgruppe / Baumreihe	Solitärbaum, unabhängig davon, ob er sich mit weiteren Solitärbäumen in einer Weise vergesellschaftet.
Einzelstrauch	Solitärstrauch über 1,30m Höhe, pflanzenartig, aus <u>einem</u> Zentrum gewachsen
Feldgehölz	Baumgruppe ohne flächendeckenden Unterbewuchs Lediglich vereinzelt können Sträucher enthalten sein, KEIN Waldinnenklima
Strauchhecke	Hecke über 1,30m Höhe, Bäume mit BHD < 7cm können enthalten sein
Ufergehölz	Baum- oder Strauchhecke, die an mind. einer Seite von einem Gewässer begleitet wird.
Vorwald	Sukzessionsfläche (Vorstadium zum Sekundärwald)

Eine Verknüpfung der im Gelände erhobenen dendrometrischen Parameter mit den aus dem Luftbild gewonnen aktuellen und historischen Daten ist für die Schätzung der verholzten Biomasse Gegenstand eines weiteren laufenden Teilprojektes.

5 Dank

Wir danken den Mitarbeitern des Fachdienstes Vermessung Stadt Göttingen für wichtige Diskussionen und für die Bereitstellung von Luftbildern. Die BINGO Umweltlotterie Niedersachsen hat dieses Projekt teilfinanziert, wofür die Autoren danken.

6 Literatur

- EXNER, T. 2003: Hecken und Feldgehölze im Stadtgebiet Göttingen, unveröffentlichter Projektbericht, 16 S.
- KLEINN, C. & KUNTH, S. 2005: Feldgehölzkartierungen mit Hilfe moderner Vermessungsgeräte - am Beispiel eines Untersuchungsgebietes in der Gemeinde Weilerbach -, im Auftrag der Forstlichen Versuchsanstalt Rheinland-Pfalz in Trippstadt, unveröffentlichter Projektbericht, 58 S.

Urbanes Grün – Erfassung, Analyse und Bewertung aus Fernerkundungsdaten

MATTHIAS MÖLLER¹ & THOMAS BLASCHKE²

Zusammenfassung: Fernerkundungsdaten werden schon lange für die Erfassung und für das Monitoring städtischen Grünraums eingesetzt. Dieser Beitrag stellt am Beispiel der amerikanischen Stadt Tempe, Arizona, einen neuen, an der Sicht der Bewohner orientierten Ansatz vor. Dabei werden aus einer Gebäudeflächenabgrenzung und einer Vegetationsklassifikation mit kombinierten GIS- und Bildverarbeitungs-methoden relative Grünanteile an konzentrischen Kreisringen um die detektierten Gebäude zu einem Index zusammenfasst.

1. Ausgangsfragestellung

Städte sind die Wachstumsregionen unserer modernen Gesellschaft weltweit. Hier konzentrieren sich die Menschen; derzeit wohnen über 50% der Weltbevölkerung in städtischen Gebieten mit stark zunehmender Tendenz (UNITED NATIONS, 2002). Unsere modernen Städte sind Funktionsräume, die auf Effizienz, ökonomische Wertschöpfung und Wachstum optimiert sind. Dabei verlieren sie mehr und mehr die Nähe zur Natur, einerseits durch künstliche Baustoffe wie Beton, Teer oder Ziegel. Andererseits werden natürliche Elemente wie Bäume, Büsche und Grasflächen weitgehend eliminiert, weil Grund und Boden ‚wertvoll‘ sind und bessere Profite bei baulicher Nutzung versprechen.

Nichtsdestotrotz ist der Mensch ein Wesen, das sich aus einer natürlichen Umgebung erst vor entwicklungsgeschichtlich gesehen kurzer Zeit zum modernen Menschen entwickelt hat und braucht für das individuelle Wohlfühlen diese Natur um sich herum. Insbesondere Bäume, bevorzugt Baumgruppen, Büsche und größere Rasenflächen sind für dieses Wohlfühlen wichtig. Gleichzeitig erfüllt diese Art der Vegetation auch andere Aufgaben. Hier ist insbesondere die stadtklimatologisch positive Wirkung zu nennen, aber auch das Filtern von Stäuben aus der Luft durch Vegetation ist für eine gesunde Stadt von großer Bedeutung. Neben übergeordneten raumplanerischen Überlegungen ist dies auch für die Bewertung von Wohnstandorten entscheidend. Ausgangspunkt dieser Untersuchung war eine Studie in der Stadt Salzburg (SCHÖPFER et al., 2005), wo Wohnraumqualitäten aus Sicht der Bewohner ermittelt und das „Grünerleben“ modelliert wurde. In dieser österreichischen Studie konnten Katasterdaten genutzt werden, die z.B. in den USA aber auch in vielen anderen Ländern nicht zur Verfügung stehen. Daher wurde hier ein Weg beschritten, zunächst die Einzelgebäude aus den Fernerkundungsdaten zu extrahieren und diese anschließend mittels GIS-Operationen mit den klassifizierten Grünflächen zu verknüpfen und zu analysieren

2. Ansatz zur Ermittlung von urbanem Grün

Eine Bestandsaufnahme des städtischen Grüns ist von großer Bedeutung für die Beurteilung städtischer Lebensqualität und ist eine essentielle Grundlage für zukünftige Planungen. Die

¹ Dr. Matthias Möller, International Institute for Sustainability, Arizona State University, PO Box 873211, Tempe, AZ 85287-3211, USA, Tel.: 001 480 965 0987
e-mail: matthias.moeller@asu.edu

² PD. Dr. Thomas Blaschke, Zentrum für Geoinformatik, Universität Salzburg, Hellbrunnerstr. 34, 5020 Salzburg, Österreich, Tel.: e-mail: thomas.blaschke@sbg.ac.at

Erfassung und Bewertung von urbanem Grün mit Hilfe von Fernerkundungsdaten ist eine probate Methode (DE LANGE & WESSELS, 2000; MÖLLER, 2003). Häufig wird dabei ein Vegetationsindex berechnet, der über einen Schwellwert in Vegetation/nicht Vegetation unterscheidet. Der resultierende Wert (prozentualer Anteil) wird berechnet, indem über eine Flächeneinheit gemittelt wird.

In dieser Untersuchung wird im ersten Teil eine Methode zur Erfassung urbaner Objekte aus digitalisierten Echtfarben-Ortholuftbildern vorgestellt. Dabei wird eine auf Bildsegmentierung beruhende objekt-basierte Klassifikation durchgeführt. Zugrunde liegt die Hypothese, dass hochauflösende Daten einer gewissen Regionalisierung bedürfen (BLASCHKE & STROBL, 2001) wie sie unbewusst der menschliche Interpret vornimmt (PINZ, 1994, LANG, 2005). Eine automatische Analyse und Klassifikation von hoch auflösenden Fernerkundungsdaten ausschließlich auf multispektralen Charakteristiken der Einzelpixel erscheint problematisch. Die vielen unterschiedlichen Ausprägungen verschiedener Bildobjekte gerade in urbanen Gebieten führen zu einem inhomogenen Gesamten. Es tritt der so genannte „Salz und Pfeffer Effekt“ auf. Zwar bestehen verschiedenste, meist Kernel-basierte Verfahren der Glättung sowie eine große Anzahl von Texturparametern, die in einer Klassifikation eingebaut werden können, doch wird hier die explizite Regionalisierung zu Bildobjekten über Bildsegmentierung bevorzugt. Das menschliche Auge unterscheidet mit hoher Güte diese Objekte nicht nur auf der Basis von Farbinformationen, sondern auch aufgrund der Form, der Größe, der Textur, der Nachbarschaftsbeziehungen und des Kontextes. Ein der menschlichen Wahrnehmung und der menschlichen Bilderkennung nachempfunderer Ansatz wird verfolgt, indem das Bild zunächst in homogene Objekte zerlegt (segmentiert) wird und die Primitive (Kandidaten für Bildobjekte, siehe BURNETT & BLASCHKE, 2003) anschließend zu Bildobjekten klassifiziert werden. Diese Klassifikation kann anhand der o.g. Parameter in Form einer bestmöglichen Objektbeschreibung erfolgen. Aus der Klassifikation werden die Klassen Gebäude und Vegetation für den zweiten Teil der Untersuchung benötigt. Hauptsächlich mit GIS-gestützten Methoden wird der Anteil an Vegetation, der jedes einzelne Gebäude umgibt, in unterschiedlichen Abstandsringen analysiert.

So kann einzig auf Basis von Echtfarbenbilddaten ein robuster Index eingeführt werden, der Anteile von Vegetation individuell für jedes Gebäude und damit auch direkt für die dort lebenden oder arbeitenden Menschen angibt.

3. Daten und Datenverarbeitung

3.1 Testgebiet

Als Untersuchungsgebiet wurde ein 2 x 2km großer Ausschnitt der Stadt Tempe, Arizona, USA, verwendet (Abb. 1). Es handelt sich um ein relativ altes Siedlungsgebiet mit einem in Teilen für die Region vergleichsweise hohen Grad an Bewässerung. Die Wasserrechte stammen noch aus der Zeit, als das Land landwirtschaftlich genutzt wurde. Das Gebiet wird einmal in der Woche kontrolliert geflutet und das Wasser versickert anschließend zum großen Teil im Boden. Die Vegetation kann sich in diesen Bewässerungsbereichen also sehr gut entfalten.

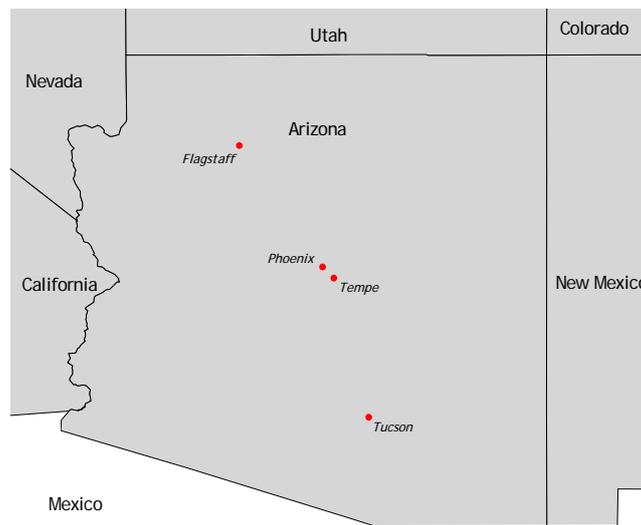


Abb. 1: Lage der Stadt Tempe im Bundesstaat Arizona, USA

3.2 Vegetationsindex

Aus den Echtfarbenbildern wurde zunächst ein normalisierter Vegetationsindex abgeleitet. Da die Information des infraroten Spektrums fehlt, wurde ein Normalized Differenced Vegetation Index (NDVI) berechnet, der den Reflexionsunterschied von Grün zu Rot ausnutzt.

3.3 Objekt-basierte Bildauswertung

Zusammen mit den Echtfarben-Orthobildern gingen diese Daten in eine objekt-basierte Bildauswertung ein. Zunächst wurden weitgehend homogene Bildobjekte, Segmente berechnet. Dabei wurde darauf geachtet, dass die Bildobjekte die später zu klassifizierenden Objekte in ihrer jeweiligen Form bestmöglich repräsentieren. Der in diesem Ansatz verwendete Algorithmus geht auf die Software eCognition zurück (BAATZ & SCHÄPE, 2000). Es handelt sich um eine Bildsegmentierung auf mehreren Ebenen. Die Ebenen sind dadurch gekennzeichnet, dass sie zueinander in einer direkten Beziehung (relation) stehen. Somit „weiß“ ein Objekt auf einer höheren Ebene, welche Segmente auf den darunter liegenden Ebenen in ihre enthalten sind und umgekehrt. Diese aus objekt-orientierten Programmiersprachen bekannten Vererbungsregeln oder „Eltern-Kind“ Beziehungen können auch bei der späteren Festlegung der die Klassen beschreibenden Parameter genutzt werden.

Im nächsten Schritt wurden die Klassen definiert und bestmöglich beschrieben. Dabei wurden nicht nur die spektralen Eigenschaften, sondern auch Nachbarschaftsbeziehungen, Texturmaße und die Form beschreibende Parameter (z.B. Größe, Kompaktheit) für eine Unterscheidung herangezogen. Tabelle 1 stellt eine Verteilung der letztlich verwendeten Klassen dar. Unterklassen wie „Rotes Gebäude“ spiegeln die Schwierigkeiten durch das Fehlen eines echten Infrarotkanals und die Umgehung durch eine Kombination aus spektralen und geometrischen Charakteristika der Objekte wieder. Das Ergebnis der Klassifikation ist mit 82% und einem Kappa Index von $\kappa=0.762$ sehr genau.

Tab. 1: Klassifikationsergebnis

Hauptklasse	Unterklasse	Fläche in ha
Gebäude	Rotes Gebäude	0.24
	Weißes Gebäude	26.44
	Dunkles Gebäude	38.02
Boden	Versiegelte Flächen	113.45
	Parkplatz	13.26
	Roter Boden/Sport	0.84
	Offener Boden	68.30
Vegetation	Rasenflächen	55.76
	Bäume, Büsche	82.70
Wasser		0.75

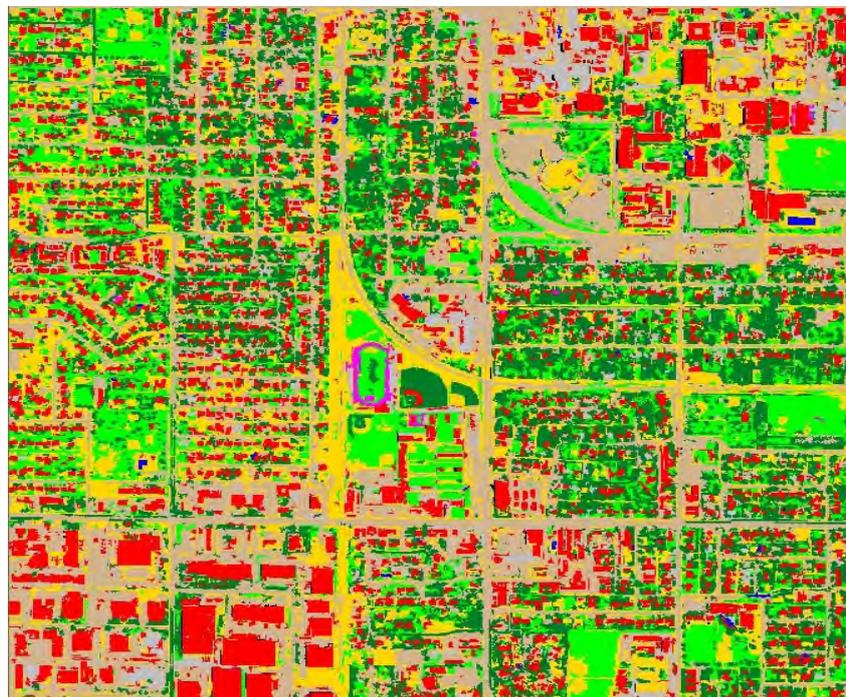


Abb. 2: Klassifikationsergebnis 2 x 2km großer Ausschnitt, Tempe, AZ
 rot: Gebäude; orange, braun: versiegelter und offener Boden;
 hellgrün, dunkelgrün: Rasenflächen, Büsche und Bäume

4. GIS gestützte Auswertung der Orthobildklassifikation

Nach Abschluss der Klassifikation werden die resultierenden klassifizierten Gebäude bzw. deren Grundrisse extrahiert und gesondert behandelt. Der Mittelpunkt eines Gebäudes wird am besten durch das Zentroid, den Flächenschwerpunkt, dargestellt. Ausgehend von diesem Punkt wurden anschließend für jedes Gebäude individuell zehn Kreisringe berechnet. Jeder dieser Ringe hat einen Abstand von jeweils 10m zu seinem direkten Nachbarn. Mit Hilfe der GIS-Operation ‚overlay‘ wurden dann die Anteile der jeweiligen Vegetationsklassen an der Fläche der Kreisringen prozentual berechnet.

5. Ergebnisse und Diskussion

In dieser Untersuchung für die Stadt Tempe in Arizona wurde ein kombinierter Fernerkundungs- und GIS-Ansatz gewählt, der die individuelle Wohnperspektive in den Mittelpunkt stellt. Der Ansatz baut in gewisser Weise auf dem Grünraumindex von SCHÖPFER et al. (2005) auf mit zwei wesentlichen Unterschieden: Er kommt ohne externe GIS-Daten aus, indem die notwendigen Gebäudegrundrisse aus den Fernerkundungsdaten selbst abgeleitet werden. In der GIS-Analyse werden konzentrische Kreise, dafür Vegetationsanteile berechnet und ein neuer Index erstellt. Dieser Index liefert eine Maßeinheit für den Anteil von Vegetation in unterschiedlichen Kreisringen um Gebäude.

Der Ansatz kann ausschließlich aus Echtfarben Orthobilddaten oder - falls vorhanden - aus CIR-Orthobildern oder hochauflösenden Satellitendaten (z.B. Ikonos II, Orbview, Quickbird) abgeleitet werden und bedarf keiner zusätzlichen Informationen. Für die Autoren ist diese Studie ein weiterer Baustein in einer Argumentationskette für die Anwendung von objektbasierten Bildverarbeitungsmethoden in Kombination mit sehr hoch auflösenden Fernerkundungsdaten.

Danksagungen

Wir danken der Firma Definiens Imaging, München, für die großzügige Unterstützung mit ihrer Software eCognition. Dieser Aufsatz ist das Ergebnis eines Austauschprogramms von Wissenschaftlern, welches durch das Land Salzburg gefördert und finanziert wurde.

Literaturverzeichnis

- BLASCHKE, T. & J. STROBL, 2001: What`s wrong with pixels? Some recent developments interfacing remote sensing and GIS. In: GIS Zeitschrift für Geoinformationssysteme (6), S. 12-17.
- BURNETT, C. & BLASCHKE, T., 2003: A multi-scale segmentation / object relationship modelling methodology for landscape analysis. In: Ecological Modelling 168 (3), p. 233-249.
- LANG, S., 2005: Image Objects and Landscape Objects Interpretation, Hierarchical Representation and Significance. Dissertation an der Naturwissenschaftlichen Fakultät der Universität Salzburg.
- DE LANGE, N. & WESSELS, K., 2000: Aufbau eines Grünflächeninformationssystems für die Stadt Osnabrück. In de Lange, N. (Hrsg.): Geoinformationssysteme in der Stadt- und Umweltplanung. Fallbeispiele aus Osnabrück, Osnabrück: Rasch, S. 49-64.
- MÖLLER, M., 2003: Urbanes Umweltmonitoring mit digitalen Flugzeugscannerdaten. Buch mit CD, Wichmann, Karlsruhe, 126 S.

PINZ, A., 1994: Bildverstehen. Springer, Wien.

SCHÖPFER, E., LANG, S. & BLASCHKE, T., 2005: A “Green Index” incorporating remote sensing and citizen’s perception of green space. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and spatial information sciences, Vol. No. XXXVII-5/W1, Tempe, Arizona, USA, p. 1-6.

UNITED NATIONS (UN) (2002): World Urbanization Prospects. The 2001 revision Data Tables and Highlights. ESA/P/WP.173. <http://www.un.org/esa/population/publications/wup2001/wup2001dh.pdf> (besucht am 22. Juni 2005)

Integration aktueller Kamerasensorik in optischen Messsystemen

ROBERT GODDING¹

Zusammenfassung: Die Konzeption digitaler optischer Messsysteme erfordert die Nutzung aktueller Kamerahardware. Der folgende Beitrag gibt einen Überblick über die momentan verfügbare Kameratechnik und diskutiert Vor- und Nachteile verschiedener Standards. Verschiedene Messsysteme werden mit ihren Anforderungen und den gewählten Lösungen vorgestellt. Ergänzend wird gezeigt, dass für die Lösung von speziellen Aufgaben nach wie vor spezielle Hardwareanordnungen notwendig sein können. Beispielfhaft wird ein High-Speed-Kamerasystem beschrieben, mit dem bei einer Aufnahme-frequenz von bis zu 500Hz beliebig lange Sequenzen aufgenommen und ausgewertet werden können.

1. Einleitung

Die aktuellen Entwicklungen in der digitalen Kameratechnik führen zu ständig neuen Kamerälösungen, die sich u. a. bezüglich Sensortechnik (CCD / CMOS), Auflösung, Datenschnittstelle (CameraLink, IEEE1394 Firewire A/B, USB1.0/2.0, Fast Ethernet) unterscheiden. Für fast alle dieser Kriterien lassen sich Vor- und Nachteile in der Anwendung nennen. Bei der Auswahl von Kameras für den Aufbau optischer Messsysteme sind zusätzlich Fragen hinsichtlich der geometrischen Stabilität der Kamerakomponenten, der einfachen Wartbarkeit, der einfachen und flexiblen Softwareanbindung sowie der Zukunftssicherheit zu klären. Im Zuge der Entwicklung neuer Generationen von vorhandenen sowie der Einführung von neuen Messsystemen wurden bei der AICON 3D-Systems GmbH umfangreiche Überlegungen hinsichtlich der zu verwendenden Komponenten angestellt. Dabei befasst sich der folgende Beitrag ausschließlich mit Online-Messsystemen, der weite Bereich der Kameras für photogrammetrische Offline-Systeme wird hier nicht berücksichtigt.

2. Digitale Online-Kameras

Der Bereich der kommerziell verfügbaren Kameras für den Aufbau von Online-Messsystemen hat sich in den letzten Jahren kontinuierlich vergrößert und dabei auch stark verändert. Während noch vor etwa 5 Jahren der größte Anteil der Kameras mit CCD-Sensoren ausgestattet war, arbeiten heute mehr und mehr Kameras mit CMOS-Sensoren. Stark verändert hat sich auch die Möglichkeit der Anbindung der Kameras an die Auswerterechner. Während vor einiger Zeit noch viele Kameras analog ausgelesen und die Signale mit einem Framgrabber digitalisiert wurden (z. B. nach der CCIR-Norm), sind in der industriellen Messtechnik heute überwiegend voll digital arbeitende Kameras zu finden. Dabei wurde auch die Auflösung der Kameras kontinuierlich erhöht, so dass Kameras mit 1,3MPixel-Sensoren heute schon als Standard zu beschreiben und höher auflösende Kameras vielfach verfügbar sind. Zusätzlich wurden die Schnittstellen zwischen Kameras und Rechnern vereinheitlicht, was eine einfachere Integration verschiedener Kameras ermöglicht.

¹ Robert Godding, AICON 3D Systems GmbH, Biberweg 30C, 38114 Braunschweig, Tel. ++49 531 5800058, e-mail: robert.godding@aicon.de

2.1 Sensoren

CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor)- Sensoren haben in weiten Bereichen bereits die bekannten CCD (Charge Coupled Device)- Sensoren abgelöst. Das gilt sowohl für den Bereich der industriellen Online-Kameras, viel mehr aber noch im Bereich der Consumer-Kameras bzw. der professioneller Digitalkameras für photographische (und photogrammetrischen Offline-) Anwendungen. Während vor einiger Zeit die Auflösung, Qualität und geometrische Stabilität der CMOS-Sensoren für photogrammetrische Zwecke nicht ausreichend war, hat sich dieses Bild grundlegend gewandelt. Geometrische Probleme, gerade bei bewegten Objekten, treten durch den Einsatz eines sog. Rolling Shutter auf. Dabei erfolgt die Integration und Belichtung auf dem Sensor zeilenweise mit entsprechendem Zeitversatz, was Verzerrungen zur Folge hat. Dieses Verhalten kann durch einen Global Shutter, bei dem eine gleichzeitige Belichtung aller Pixel erfolgt, völlig vermieden werden. Auch die radiometrische Qualität hat sich sehr verbessert. Die CMOS-spezifischen Effekte wie z. B. Fixed Pattern Noise können durch umfangreiche Verbesserung der Kameraelektronik und entsprechende Signalkorrekturen weitgehend unterdrückt werden und fallen für eine große Anzahl von Applikationen nicht mehr ins Gewicht. Außerdem können bei CMOS Sensoren einzelne Pixel oder Bildbereiche sehr schnell angesprochen werden, was man z.B. bei der Beobachtung schnellerer Bewegungen ausnutzen kann. Außerdem sollte nicht außer Acht gelassen werden, dass CMOS-Sensoren erheblich preiswerter als CCD-Sensoren sind. Dieser Effekt schlägt sich natürlich auch auf den Preis eines Messsystems mit einer großen Anzahl von Kameras nieder (s. Kap 3.3).

Die geometrische Stabilität der Sensoren und ihrer Aufnahme in den Kameras lässt sich mit entsprechenden Verfahren nachweisen (GODDING & LUHMANN, 2004). Umfangreiche Messungen an verschiedenen Test- und Kalibrierkörpern geben Aufschluss über die erreichbare Genauigkeit unterschiedlicher Kameras und lassen sich als wichtige Zusatzinformation zur Auswahl geeigneter Kameras verwenden.

2.2 Kamera-Rechner-Interfaces

Für die Datenübertragung von Kameras zu Rechner haben sich einige Standards etabliert, die über unterschiedliche Vor- und Nachteile verfügen. Einen Überblick über die wichtigsten Eigenschaften gibt Tabelle 1 (GAILER, 2004). Neben der möglichen Datenrate, die sicher übertragen werden muss, spielen bei der Auswahl einer geeigneten Übertragungsart auch folgende Punkte eine Rolle:

- Industrietauglichkeit von Steckern und Kabeln
- Aufwand für die Implementierung von Systemen mit mehreren Kameras
- Nutzung mit möglichst vielen Rechnerplattformen
- Wartungsfreundlichkeit und Ausfallsicherheit

Unter Berücksichtigung dieser Anforderungen hat sich die Nutzung des IEEE1394 Standards (Firewire) als sehr vorteilhaft erwiesen. Die Systeme können mit einem handelsüblichen Notebook betrieben werden, Zusatzhardware ist nicht erforderlich. Stecker und Kabel sind in ausreichend hoher Qualität verfügbar, ein Aufbau von Systemen mit größerer Anzahl von Kameras ist problemlos möglich. Auch die Datenraten des momentan verwendeten IEEE1394a Standards sind für die weitaus meisten Anwendungen hoch genug; eine Verbesserung in diesem Punkt ergibt sich zwangsläufig durch die momentan bereits weit vorangeschrittene Entwicklung von IEEE1394b, wobei hier mindestens eine Verdopplung der Datenrate erreicht wird. Auch hier zeigt sich einer der Vorteile der Verwendung standardisierter Systeme. Verbesserungen hinsichtlich der Datenübertragung werden von dritter Stelle unter Berücksichtigung einer weitgehenden Kompatibilität zu vorhandenen Versionen durchge-

führt, so dass eine Aufrüstung durch den Systemhersteller mit geringem Aufwand durchzuführen ist.

Tab. 1: Unterschiedliche Standards zur Bildübertragung

	CameraLink	IEEE1394a	IEEE1394b	USB 2.0	Gigabit Ethernet
Datenrate	640MBytes/ s	32 Mbytes/s	> 64 Mbytes/s	48Mbytes/s	60Mbytes/s
Hardware	Framegrabber	Hubs, Standardkabel 1394a	Hubs, Standardkabel 1394b	Hubs, Standardkabel	Netzwerktechnik
Kabellänge	10m , optische Weglänge möglich	Standard 5m - 10m, mit Hubs 70m, optische Weglänge möglich	100m, optische Weglänge möglich	Standard 5m - 10m, mit Hubs 30m	100m, mit Hubs nahezu unbegrenzt
Anzahl Kameras	1 / Grabber	Bis zu 63	Je nach Ausführung	Bis zu 127	unbegrenzt
Stecker	Industriestecker	Consumer, Industriestecker verfügbar	in Entwicklung	Consumer	Industriestecker
Kabeladern	10 - 30	4 - 6	6 - 8	4	8

2.3 Softwareintegration

Der zuletzt genannte Vorteil gilt natürlich auch für die Treibersoftware der angeschlossenen Kameras. Für Firewire-Kameras wurde ein Standard definiert (DCAM), nach dem die Kameras ansprechbar sind. Darauf aufbauend gibt es Erweiterungen, die die besonderen Möglichkeiten industrieller Kameras noch besser nutzen lassen (Advanced DCAM) sowie Entwicklungswerkzeuge zur einfachen Integration in eigene Applikationen. Die Treiber- und Entwicklungssoftware wird von den einzelnen Herstellern weiter gepflegt und entwickelt, auch hier muss von den Systemherstellern wenig Arbeit investiert werden. Voraussetzung für eine reibungslose Integration verschiedener Treiber bzw. von Updates ist natürlich eine entsprechende Einbindung in die Anwendungssoftware. Dazu ist in den AICON-Bibliotheken eine hardwareunabhängige Schicht mit allgemeinen Kamerabefehlen implementiert, die dann über entsprechende Schnittstellen mit den unterschiedlichen Treibern kommuniziert. Alle hardware-spezifischen Parameter (z. B. Auflösung, Gain, Offset, Betriebsmodi) sind vollständig getrennt von den eigentlichen photogrammetrischen Daten in speziellen Initialisierungsdateien abgelegt. Die Anwendungssoftware kann aus diesem Grunde mit jeder beliebigen Hardware arbeiten, wenn denn die Treiberanbindung bekannt ist. Dies ermöglicht zum einen eine sehr rasche Anpassung an neuere Versionen vorhandener oder auch an gänzlich neue Treiber, zum anderen aber auch den Betrieb von Mehrkamerasystemen mit einer variablen Anzahl von Kameras. Alle der im Folgenden vorgestellten Messsysteme werden von strukturell gleichen Initialisierungsdateien gesteuert und sind damit von der Art der Hardware vollkommen unabhängig.

3. Standard-Messsysteme

Die mit industriellen Online-Kameras ausgerüsteten AICON-Systeme unterscheiden sich – bedingt durch ihren Anwendungsbereich - hinsichtlich der Anzahl der verwendeten Kameras

und den verwendeten photogrammetrischen Algorithmen. Für die Ausstattung aller Standard-Messsysteme hat man sich bei der AICON GmbH für Nutzung von IEEE1394-Kameras der Firma Allied Vision entschieden. Neben den oben beschriebenen Kriterien dienen für diese Entscheidung noch andere Gesichtspunkte wie schnelle Verfügbarkeit, gute technische Unterstützung und langfristige Modellpolitik. Im Folgenden wird ein kurzer Überblick über die wichtigsten Systeme gegeben.

3.1 ProCam

Bei ProCam handelt es sich um einen handgeführten Messtaster, der sich an einem Referenzpunktfeld orientiert (Abb. 1). Dieses Referenzpunktfeld, das entweder in einem Raum ortsfest oder auf CFK-Panels portabel durch retroreflektierende Marken signalisiert ist, wird durch die Kamera beobachtet. Über einen räumlichen Rückwärtsschnitt wird die Position der Kamera bestimmt und dann bei bekannten Kalibrierparametern die Position der Tastspitze bestimmt (BÖSEMANN & SCHNEIDER, 2001). Da das System handgehalten betrieben wird, sind hier neben den oben bereits beschriebenen Parametern die Größe und das Gewicht der eingesetzten Kamera von erheblicher Bedeutung. Außerdem muss das Kabel zur Signalübertragung und Spannungsversorgung so dünn wie möglich sein, um ein störungsfreies Arbeiten zu ermöglichen. Der Einsatz einer kleinen CMOS-IEEE1394-Kamera mit einer Auflösung von 1300 x 1000 Pixel bietet sich hier an. Zusätzlich zur Kamera wird für die Beleuchtung der retroreflektierenden Messmarken ein IR-Ringlicht eingesetzt. Die Kamerakonstruktion erlaubt, dass die zur Versorgung des Blitzes notwendige Spannung ebenfalls durch das Firewire-Kabel geleitet wird und vom Hirose-Anschluss der Kamera an die Beleuchtung weitergegeben wird. Die Kamera selbst sitzt in einem sehr stabilen Rahmen, durch den der Bezug zwischen Kamera und Tastspitze definiert ist. Das System kann aufgrund der Kameraspezifikation mit einem Notebook betrieben werden, so dass man ein hochgradig portables System zur Koordinatenmessung hat.



Abb. 1: AICON ProCam

3.2 TraceCamM

Mit identischen Kameras und Beleuchtungstechnik ausgerüstet ist das System TraceCamM; hier verrichten 4 Kameras des oben beschriebenen Typs ihren Dienst (Abb. 2). Das System dient zur Beobachtung niederfrequenter Bewegungen (bis zu 10Hz) und zur Positionierung von Objekten. Als Beispiel sei hier die Positionierung von Dummies vor einem Crashtest genannt. Da die beobachteten Objekte in Bewegung sind, müssen die Kameras streng synchron ausgelöst werden, was durch eine Broadcast-Funktion sichergestellt wird. Die Kamerabilder

kommen dann bei der Auslösung zunächst in einen kamerainternen Zwischenspeicher, aus dem sie dann sequentiell ausgelesen werden. Die Kameras selber sitzen auf einer hochstabilen CFK-Plattform und werden mit gängigen Verfahren kalibriert (GODDING, 1993), d.h. die inneren und relativen Orientierungen sind bekannt. Mit diesen bekannten Parametern ist es dann möglich, durch Vorwärtsschnitte die Objektkoordinaten zu bestimmen.



Abb. 2: TraceCamM zur Dummypositionierung

Durch die flexible Softwareanbindung der Kameras über die bereits erwähnten Initialisierungsdateien ist man natürlich nicht auf die feste Anordnung mit 4 Kameras beschränkt. Es ist - in Abhängigkeit von der Applikation - theoretisch möglich, bis zu 63 Kameras von der Software anzusteuern (dann allerdings bei entsprechend geringeren Aufnahmefrequenzen). Die Kameras können frei positioniert werden, um beliebige Objekte zum messen.

3.3 TubeInspect

Bei TubeInspect handelt es sich um eine Messzelle mit 16 Kameras (TubeinspectS mit 10 Kameras), die zur Inspektion von zylindrischen Rohren (z. B. Hydraulikleitungen, Abgasrohre) dient (Abb. 3). Hauptzweck des Systems ist der Ersatz mechanischer Lehren (BÖSEMANN



Abb. 3: TubeInspect

1996). Auch hier kommen die gleichen Kameras wie in Kap. 3.1 und 3.2 zum Einsatz, die Verbindung zum Steuerrechner erfolgt mit einem einzigen Anschlusskabel. Innerhalb der Messzelle werden die Signale und die Spannungsversorgung dann mit entsprechenden Hubs auf die Einzelkameras aufgeteilt. Da die Rohre im Durchlicht beobachtet werden, ist eine aktive Beleuchtung kameraseitig nicht notwendig. Mit der Kameraauflösung von 1300 x 1000

Pixel ist es möglich, Rohre mit einem kleinsten Durchmesser von etwa 4mm mit einer Genauigkeit von etwa 0.1mm zu vermessen. Auch bei TubeInspect ist eine streng synchrone Auslösung aller Kameras sehr wichtig, da die eingelegten Rohre teilweise recht flexibel sind und sich während der Aufnahme durchaus bewegen können.

Die Bestimmung der Rohre erfolgt durch eine Konstruktion finiter Zylinder im Objektraum, resultierend aus den Kamerabeobachtungen. Aus den Zylindern wiederum können andere relevante Daten wie Biegepunkte, Biegewinkel und Manteltoleranzen abgeleitet werden. Das System ist bei einer großen Anzahl von Anwendern im täglichen Einsatz, womit sich die Industrietauglichkeit der verwendeten Firewire-Technologie zeigt.

4. TraceCamF

Nicht alle Aufgaben lassen sich mit der oben genannten Technik lösen. Insbesondere bei Anwendungen, die eine sehr hohe Verarbeitungsgeschwindigkeit bzw. sehr hohe Datenraten erfordern sind die oben beschriebenen Kameratechniken nicht mehr leistungsfähig genug. Zu diesen Aufgaben zählt vor allem die Beobachtung und Messung von schnell bewegten Objekten, wobei auch hier noch Unterschiede beachtet werden müssen. Handelsübliche Hochgeschwindigkeitskameras mit Frequenzen von bis zu mehr als 1000Hz, wie sie z. B. im Crashversuch eingesetzt werden, können in der Regel nur für sehr kurze Sequenzen genutzt werden, da die Bilder in den Kameras zwischengespeichert und dann anschließend ausgelesen werden. Die Aufnahmezeit ist damit abhängig von der Sensorauflösung, der Aufnahmefrequenz und dem vorhandenen Speicher. Es gibt nun aber hochdynamische Aufgabenstellungen, die eine wesentlich längere Aufnahmezeit erfordern. Als Beispiel sei hier die Beobachtung von Radbewegung während realer Testfahrten bei sehr hohen Geschwindigkeiten oder auf verschiedenen Untergründen genannt. Hier ist eine Speicherung der Bilder nicht mehr möglich, aber auch nicht unbedingt notwendig.

Für diese Anwendungen wurde im Forschungszentrum der Daimler Chrysler AG in Ulm ein Kamerakzept entwickelt, welches von AICON in Zusammenarbeit mit Daimler-Chrysler übernommen und nun weiterentwickelt und unter dem Namen TraceCamF vertrieben wird. Ergebnis der Entwicklung ist eine spezielle intelligente Kamera (Abb. 4). Eine handelsübliche Hochgeschwindigkeitskamera (Vosskühler CMC-1300) mit Aufnahmefrequenzen von bis zu 500Hz und einem CMOS-Sensor mit einer Auflösung von 1300 x 1000 Pixel wird über eine CameraLink-Schnittstelle mit einem FPGA (Field Programmable Gate Array) direkt gekoppelt. Zusätzlich verfügt das System über einen sehr lichtstarken LED-Blitz mit einer Lichtleistung von 300W (WIORA & BABROU, 2004). Alle Komponenten werden über einen kamerainternen Linux-Recher gesteuert. Das FPGA ist in der Lage, eine Echtzeitbildverarbeitung in der Aufnahmefrequenz durchzuführen, d. h. im Wesentlichen werden die Bildkoordinaten der aufgenommenen Targets sofort gemessen. Die Bilder selbst werden nicht weiter genutzt, die gemessenen Koordinaten werden über TCP/IP an den externen Steuerrechner (der normalerweise wiederum ein Notebook mit Microsoft Windows Betriebssystem ist) weitergegeben.



Abb. 4: TraceCamF zur Messung hochdynamischer Vorgänge



Abb. 5: Messung von Radbewegungen (Wheelwatch)

Während der Bildaufnahme kann parallel auf dem Steuerrechner bereits die endgültige Verarbeitung der Daten erfolgen (Decodierung der codierten Marken, Berechnung der Objektinformation). Diese Vorgehensweise ermöglicht es, nahezu beliebig lange Sequenzen aufzunehmen. Mehrere Kameras können untereinander streng synchronisiert werden, was zum einen Vorwärtsschnitte erst ermöglicht, zum anderen aber auch wichtig ist, um unabhängige Einzelereignisse (z. B. gleichzeitige Beobachtungen an allen vier Rädern eines Fahrzeugs) miteinander zu vergleichen. Außerdem kann das System über externe Ereignisse getriggert werden. Dies bietet die Möglichkeit, die Kameras innerhalb eines Multi-Sensorsystems zu integrieren um komplexe Tests (z. B. an Prüfständen) durchführen zu können. Eine erste Anwendung des Systems ist die oben beschriebene Beobachtung von Radbewegungen (Wheelwatch, Abb. 5).

5. Literaturverzeichnis

- BÖSEMANN, W., 1996: The optical tube measurement system OLM – photogrammetric methods used for industrial automation and process control – International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol 31, B5: S. 55 - 58
- BÖSEMANN, W. & SCHNEIDER, C.-T., 2001: Online 3D measurement using inverse photogrammetry. – In: Videometrics and Optical Methods for 3D Shape Measurement, Proc. SPIE, 4309, S. 288-293
- GAILER, P. 2004: Analog, CameraLink, Firewire or USB. - Laser+Photonik, September 2004, S. 40-43
- GODDING, R., 1993: Ein photogrammetrisches Verfahren zur Überprüfung und Kalibrierung digitaler Bildaufnahmesysteme. - Zeitschrift für Photogrammetrie und Fernerkundung, Heft 2/1993: 82-90.
- LUHMANN, TH. & GODDING, R. 2004: Messgenauigkeit und Kameramodellierung – Kernfragen der Industriephotogrammetrie. – Photogrammetrie- Fernerkundung- Geoinformation (PFG) Heft 1/2004, S. 13-21.
- WIORA, G. & BABROU, P. (2004). WheelWatch - Berührungslose Hochgeschwindigkeitsmessung der Radbewegung am fahrenden Fahrzeug. In G. Gerlach, Hrsg., Sensoren und Messsysteme 2004. VDI/VDE.

Eine neue, hochauflösende Mittelformatkamera für die digitale Nahbereichsphotogrammetrie

DIRK RIEKE-ZAPP¹, ANDRÉ OLDANI² & JÜRGEN PEIPE³

Zusammenfassung: Es wird über Testmessungen mit einer Mittelformatkamera der Firma ALPA of Switzerland berichtet, an die digitale Rückteile adaptiert werden können. Erste Versuche mit einem 22 Megapixel Leaf Valeo Wi Rückteil zeigen eine hohe Genauigkeit der Objektrekonstruktion, überprüft an kalibrierten Längenmaßen eines Testfeldes (nach VDI/VDE Richtlinie 2634).

1 Einleitung

In der Nahbereichsphotogrammetrie wird für die digitale Bildaufnahme schon seit einiger Zeit auf handelsübliche Kameras zurückgegriffen, die nicht speziell für die Anforderungen der Photogrammetrie entwickelt wurden. Dies hat dazu geführt, dass jede Kamera, die auf dem Markt vorgestellt wird, für den Photogrammeter ein potenzielles Messinstrument darstellt. Die digitale Kameratechnik schreitet schnell voran, die Marktpräsenz von Kameras wird immer kürzer. Der technische Fortschritt in der Fotografie umfasst: Leichtgängige Autofokusobjektive, Zoomobjektive, Retrofokuskonstruktionen, Bildstabilisatoren und viele andere Ausstattungsmerkmale, die für die Aufnahme von Messbildern nicht notwendig sind oder sich sogar negativ auf das Genauigkeitspotenzial auswirken. Die hohen Anforderungen des Photogrammeters an die optische und mechanische Qualität von digitalen Kameras können mit handelsüblichen Geräten nur schwer erfüllt werden. Ziel ist es deshalb, handelsübliche Digitalkameras durch mechanische Anpassung oder mit Hilfe von numerischen Korrekturmodellen „photogrammetrietauglich“ zu machen. Das beste Ausgangsmaterial ist in diesem Fall eine Kamera, die mit möglichst wenigen Anpassungen als Messgerät eingesetzt werden kann. Die in diesem Bericht untersuchte ALPA 12 WA ist eine Kamera, bei der vom Hersteller sehr viel Wert auf mechanische und optische Präzision gelegt wird. In Kombination mit einem digitalen Kamerarückteil und einem für die digitale Fotografie optimierten Objektiv erfüllt sie die Grundvoraussetzungen, die der Photogrammeter an eine handelsübliche, digitale Kamera stellen kann.

2 Das Aufnahmesystem

2.1 Die Kamera – ALPA 12 WA

Die ALPA 12 WA ist das Herzstück einer ALPA Aufnahmeeinheit (Abb. 1, Tab. 1). Die Kamera besitzt zwei Auflagebereiche, in denen wahlweise das Objektiv oder ein Rückteil eingesetzt und über Klemmen fixiert werden können. Beide Auflagen sind identisch, so dass man Objektiv und Rückteil von vorne nach hinten tauschen kann. Das quadratische Design der Auflage erlaubt außerdem das Ansetzen von Objektiv oder Rückteil in vier, um jeweils 100 Gon gedrehten, Positionen. An die ALPA Kameras können Film- oder Digitalrückteile ver-

¹ Dr. (USA) Dirk Rieke-Zapp, Institut für Geologie, Universität Bern, Baltzerstr. 3, CH-3012 Bern, e-mail: zapp@geo.unibe.ch

² André Oldani, ALPA of Switzerland, Neptunstr. 96, CH-8032, Zürich, e-mail: alpa@alpa.ch

³ Jürgen Peipe, Universität der Bundeswehr, D-85577 Neubiberg, e-mail: j-k.peipe@unibw-muenchen.de

schiedener Hersteller bis zum Format 6x9 angesetzt werden. Die effektive Bildgröße dieses Formats schwankt je nach Hersteller zwischen 56 x 82 und 56 x 84 mm.



Abb. 1: ALPA 12 WA Kamerakörper von vorne (links) und mit angesetztem Sucher und Objektiv (rechts)

Bei Verwendung eines Objektivs mit einem Bildkreis, der größer ist als das Aufnahmeformat, kann das Objektiv so auf der Auflageplatte montiert werden, dass die Hauptpunktage um einen festen Betrag verschoben ist. Man erhält damit eine Kamera mit fixem Shift, ähnlich den früheren Aufnahmekammern P31 und P32 von WILD Heerbrugg.

Tab. 1: Spezifikationen der ALPA 12 WA

Material	Aluminium
Horizontierung	2 Röhrenlibellen, 1 Dosenlibelle
Sucher	120° Sichtfeld
Handgriffe	Palisander oder Birnbaum
Abmessungen (Kamerakörper)	180 x 120 x 48 mm
Gewicht (Kamerakörper je nach Ausstattung)	560-580 g
<i>Gewicht mit Schneider Apo-Digital 5.6/35 mm XL, Leaf Valeo 22 Wi und Sucher</i>	1260-1280 g

Auf der Oberseite der Kamera lässt sich der Sucher befestigen. Im Gegensatz zu den üblichen high-end Digitalkameras besitzt die Kamera keinen Spiegel im Strahlengang. Dies hat den Vorteil, dass der Abstand zwischen Hinterlinsenscheitel des Objektivs und der Bildebene nicht durch eine Retrofokuskonstruktion verlängert werden muss, um Platz für einen Spiegel zu schaffen. Im Gegensatz zu solchen Objektiven für Spiegelreflexkameras besitzen die an der ALPA verwendeten Objektive eine symmetrische Konstruktion, was zu einer geringeren radial-symmetrischen Verzeichnung und zu einer Verbesserung der Bildqualität führt. Zudem sind die Objektive kleiner und leichter als retrofokale Objektive.

Neben der ALPA 12 WA gibt es noch zwei weitere ALPA Modelle. Die ALPA 12 SWA erlaubt zusätzlich ein stufenloses Shiften des Objektivs um bis zu 25 mm. Diese Verstellung ist jedoch nicht stabil genug für photogrammetrische Anforderungen. Die ALPA 12 TC ist eine sehr kompakte und leichte Version der ALPA 12 WA. Allen ALPA Kameras ist gemein, dass

kein Entfernungs- oder Belichtungsmesser eingebaut ist. Der Zentralverschluss befindet sich im Objektiv und die Auslösung erfolgt am Objektiv oder über einen Fernauslöser, der je nach Verschlusstyp mechanisch oder elektrisch angesteuert werden kann. Die kürzeste Verschlusszeit, die mit einer ALPA und einem serienmäßigen Verschluss zur Zeit erreicht werden kann, beträgt 1/500 s.

2.2 Objektive

Viele Objektive, die sich an der ALPA verwenden lassen, sind ursprünglich für größere Formate als 6x9 gerechnet worden. Sie weisen entsprechend große Bildkreise von teilweise mehr als 200 mm auf, von welchen die ALPA immer den leistungsfähigsten, zentralen Bereich verwenden kann.

Besonders interessant für die digitale Fotografie sind die Apo-Digitare der Jos. Schneider Optische Werke GmbH, Bad Kreuznach. Diese Objektive sind für digitale Bildsensoren optimiert und weisen einen Bildkreis zwischen 60 und 120 mm auf. Sie besitzen ein hohes Auflösungsvermögen bis zum Bildrand. Das Farbspektrum ist bis in das nahe Infrarot korrigiert. Brennweiten zwischen 24 und 210 mm sind verfügbar. Ein Bildkreis von 60 mm deckt bereits die Bildfläche üblicher digitaler Rückteile ab. Für diesen Test wurde mit einem Apo-Digitar 5.6/35 mm XL Weitwinkel fotografiert (Abb. 2). Das Objektiv besitzt bei Blende 11 einen Bildkreis von 90 mm.



Abb. 2: Schneider Apo-Digitar 5.6/35 mm XL mit Copal 0 Verschluss

2.3 Digitales Kamerarückteil

An der ALPA 12 WA wurde ein Leaf Valeo Wi Digitalrückteil mit 22 Megapixeln angesetzt (Abb. 3). Der Sensor in dem Rückteil stammt von der Firma DALSA und wird auch in Rückteilen anderer Hersteller eingesetzt. Die Rohdaten werden mit 16 Bit Farbtiefe in ungefähr 40 MB großen Dateien gespeichert. Das Leaf Valeo Wi kann Daten entweder auf einer adaptierbaren Festplatte speichern oder über eine Firewire Verbindung direkt auf einem Computer ablegen. Für diesen Versuch wurde die zweite Speichervariante gewählt. Dabei wird das Rückteil über die Firewire Verbindung auch mit Strom versorgt. Das Leaf Valeo Wi ist mit verschiedenen Kameraanschlüssen lieferbar. Für den Test stand ein Rückteil mit Hasselblad V-Anschluss zur Verfügung, welches über eine Adapterplatte an die ALPA angesetzt wurde. Zusätzlich sind Adaptionen von Digitalrückteilen mit Hasselblad H1, Mamiya 645 AFD und Contax 645 Anschluss an der ALPA möglich. Die Größe des Sensors erreicht mit 48 x 36 mm

fast das so genannte 6x4.5 Format. Die effektive Bildgröße dieses Formats schwankt je nach Kamerahersteller zwischen 55 x 41 und 56 x 40.5 mm. Mittelformatkameras, die speziell auf solche digitalen Rückteile abgestimmt sind, besitzen fast ausschließlich das 6x4.5 Format. Für größere Sensoren fehlen in der Zukunft somit die entsprechenden Kameras, während an der ALPA noch Spielraum für Sensoren bis zu einem Format von 84 x 84 mm vorhanden ist. Die Leaf Bilddateien können mit einer eigenen Software in übliche Bildformate umgewandelt werden. Die Dateien lassen sich auch mit dem Rohdaten-Konverter von Adobe Photoshop CS2 umwandeln.



Sensortyp	CCD
Sensorgroße	48 x 36 mm
Pixelgröße	5344 x 4008 Pixel
ISO	8.9 x 8.9 µm
Farbtiefe	25 – 200
Bildfrequenz	16 Bit
Rohdaten pro Bild	1.2 s pro Bild
Speicher	40 MB
Anschlüsse	10/20/30 GB Festplatte, Firewire
Gewicht	Firewire, Bluetooth
	450 g

Abb. 3: ALPA 12 WA mit angesetztem Leaf Valeo 22 Wi (links). Spezifikationen des Leaf Valeo 22 Wi Digitalrückteils (rechts)

3 Testmessungen

3.1 Testfeld

Empfehlungen zur Abnahme und Überwachung photogrammetrischer 3D-Messsysteme sind in der VDI/VDE Richtlinie 2634 enthalten, und zwar in Blatt 1 "Optische 3D-Messsysteme - Bildgebende Systeme mit punktförmiger Antastung" (LUHMANN & WENDT, 2000; VDI/VDE, 2002). Getestet werden mobile 3D-Messsysteme, bestehend aus einer oder mehreren Kameras und einem PC/Notebook mit Software zur Bildmessung, Bildorientierung und 3D-Objektrekonstruktion. Die vorgeschlagene Prozedur basiert auf der photogrammetrischen Vermessung eines räumlichen Testfeldes, in dem mindestens sieben Messlinien zu untersuchen sind, entlang derer Maßstäbe mit Messmarken zu platzieren sind (Abb. 4).

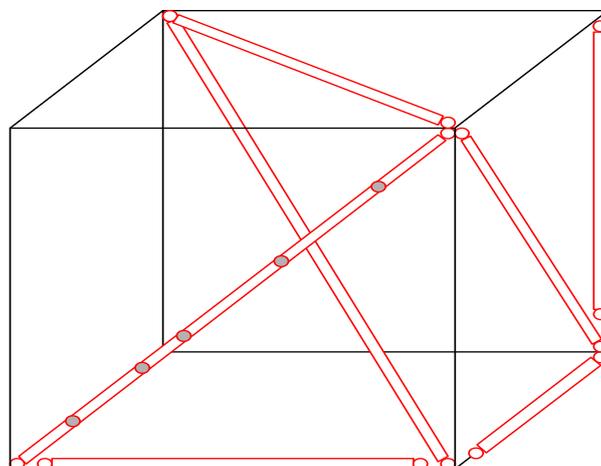


Abb. 4: Empfehlung für die Anordnung der Messlinien (aus LUHMANN & WENDT, 2000)

Auf jeder Messlinie sind mindestens fünf, zum Beispiel vom Deutschen Kalibrierdienst (DKD) kalibrierte Abstände zwischen den Messmarken (Testlängen) mit den photogrammetrisch ermittelten Werten zu vergleichen. Die Differenzen zwischen gemessenen und kalibrierten Werten sind die Längenmessabweichungen. Die maximal zulässige Längenmessabweichung, die im gesamten Messvolumen für jede beliebige Anordnung der Testlängen eingehalten werden muss, ist das Kriterium für die Qualität des eingesetzten Messsystems. Einzelheiten zum Aufbau des Testfeldes und zur Durchführung der Messungen sind der VDI/VDE Richtlinie zu entnehmen (VDI/VDE, 2002).

Das für diesen Bericht verwendete Testfeld wurde bei der Firma AICON 3D Systems in Braunschweig installiert (Abb. 5). Es enthält insgesamt 173 kreisförmige Zielmarken, 33 davon befinden sich auf sieben kalibrierten Maßstäben. Die Längenmessabweichungen werden an 58 Teststrecken ermittelt.



Abb. 5: Testfeld bei AICON 3D Systems, Braunschweig

3.2 Bildaufnahme und Auswertung

Es wurden 91 Messbilder des Prüfkörpers bei Raumtemperatur in einem Rundumverband aufgenommen. Dabei wurde die Kamera mehrmals um die optische Achse gewälzt, um die Bestimmung der inneren Orientierung sicherzustellen. Für den Test wurde das Schneider Apo-Digital 5.6/35 mm XL mit Copal 0 Verschluss (Abb. 2) an einer ALPA 12 WA (Abb. 1) verwendet. Bezogen auf das verwendete Digitalrückteil ergibt sich ein diagonaler Öffnungswinkel von 79° . Dieser Winkel entspricht ungefähr dem eines 24/25 mm Weitwinkelobjektivs an einer Kleinbildkamera. Für diesen Test wurde die Entfernungseinstellung auf 2 m, die Blende auf den Wert 11 und die Belichtungszeit auf 1 s eingestellt. Die Kamera wurde auf einem Stativ befestigt und die digitalen Bilder wurden über eine Firewire Verbindung in einem Laptop gespeichert. Der Sensor wurde auf 25 ISO eingestellt. Die Bilddaten wurden mit Leaf Software ohne Nachschärfen konvertiert. Die Kalibrierung wurde mit dem Bündelausgleichungsprogramm DPA Pro der Firma AICON vorgenommen. Der mittlere Bildmaßstab beträgt 1: 95. Die Systemfestlegung basiert auf einem Referenzmaßstab, der in der Mitte des Testkörpers platziert wurde.

4 Ergebnisse

In der Bündelausgleichung wurden die Parameter der inneren Orientierung (Kamerakonstante und Hauptpunktlage), die radial-symmetrische und tangentielle Verzeichnung sowie Affinität und Scherung durch Simultankalibrierung ermittelt. Hauptpunktlage und Kamerakonstante variieren signifikant im Bildverband. Die Auswertung wurde deshalb mit bildvarianter innerer Orientierung gerechnet. Die Hauptpunktlage variiert um ± 1.5 Pixel auf dem Sensor. Es lässt sich erkennen, dass sich die Hauptpunktlage vor allem bei den Kantungen der Kamera verändert. Für die letzten 53 Bilder des Verbandes wurde die Kamera nicht mehr gekantet. Die Hauptpunktlage variiert für diese Bilder nur noch um ± 0.5 Pixel. Die Kamerakonstante variiert im ganzen Bildverband um ± 1.2 Pixel. Die maximale radial-symmetrische Verzeichnung beträgt am Bildrand bei einer Bildhöhe von 30 mm weniger als 0.1 mm (Abb. 6).

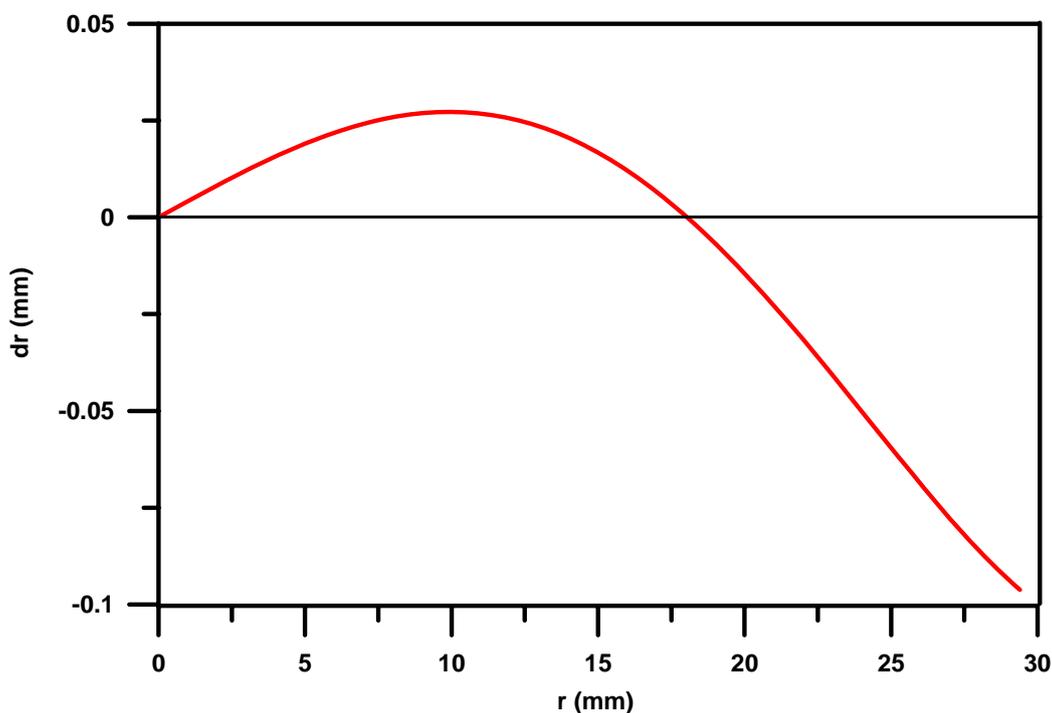


Abb. 6: Radial-symmetrische Verzeichnung (dr) des Schneider Apo-Digital 5.6/35 mm XL in Abhängigkeit von der Bildhöhe (r)

Der sehr gute visuelle Qualitätseindruck der Bilder spiegelt sich in einer Bildmessgenauigkeit (σ_0) von $0.24 \mu\text{m}$, beziehungsweise 0.027 Pixel, wider. Sie ist besser als für andere handelsübliche Kameras, die einem ähnlichen Test unterzogen wurden (PEIPE & YU, 2004). Die Längenmessabweichungen im Objektraum zeigen ebenfalls relativ gute Werte. Sie bewegen sich in einem Bereich von -0.053 bis $+0.057$ mm. Die Spanne der Abweichungen beträgt somit 0.110 mm. Ohne Korrekturparameter für Scherung und Affinität nehmen die Längenmessabweichungen allerdings stark zu.

Die Bilder wurden in der Leaf Software in TIFF Dateien konvertiert. Eine Konvertierung der Rohdaten in dieser Software führt zu sichtbar besseren Bildresultaten als eine Konvertierung mit Photoshop CS2. Vergleicht man die Messgenauigkeit von gut messbaren Punkten in TIFF Bildern aus Photoshop CS2 und aus der Originalsoftware, ergeben sich Unterschiede von $\pm 0.2 \mu\text{m}$. Außerdem werden die Leaf Bilder in Photoshop CS2 an allen Rändern um jeweils 4 Pixel beschnitten.

5 Diskussion und Ausblick

Die Ergebnisse der Bündelblockausgleichung zeigen, dass mit der ALPA 12 WA in der getesteten Konfiguration eine hohe Genauigkeit am Objekt erreicht wird. Die variable innere Orientierung lässt sich zum Großteil auf Verschiebungen innerhalb des Rückteils und der Kameraanschlüsse zurückführen. Die Verbindung zwischen Digitalrückteil und Kamera erschien etwas „wackelig“. Bessere Ergebnisse lassen sich vermutlich mit einer anderen Adaption des Rückteils erreichen. Ein stabilerer Rückteiladapter ist für Digitalrückteile mit Mamiya 645 AFD und Hasselblad H1 Anschluss verfügbar. Ein solcher Adapter wird in zukünftigen Tests zum Einsatz kommen. Mit dieser Maßnahme sollte das vorhandene Genauigkeitspotenzial noch besser genutzt werden können. Eine weitere Möglichkeit zur Genauigkeitssteigerung besteht darin, den Schneckengang zur Entfernungseinstellung im Objektiv auszubauen, um sicher zu stellen, dass die Linsen im Objektiv nicht verstellt werden. Diese Überlegungen setzen voraus, dass der Sensor fest im Rückteil fixiert ist, sich nicht thermisch ausdehnt und dass die Klemmen der ALPA eine stabile Einheit von Kamera, Objektiv und Rückteil herstellen.

Eine Konvertierung der digitalen Rohdaten in der Originalsoftware von Leaf ist einer schnelleren Konvertierung in Photoshop CS2 vorzuziehen. Optimale Bildqualität und Bildmessgenauigkeit sind nur mit der Rohdatenkonvertierung in der Originalsoftware sichergestellt.

Der Testaufbau mit dem Leaf Valeo Wi Rückteil ist nur bedingt für den Einsatz in der Praxis geeignet. An das Rückteil lässt sich für mobile Messungen eine Festplatte ansetzen. Maximale Mobilität und Aufnahmen ohne Stativ ermöglicht das neue Leaf Aptus Rückteil. Es erlaubt den Einschub von Compact Flash Speicherkarten für die Bildspeicherung und besitzt ein 60 x 70 mm großes TFT Display auf der Rückseite, an dem Bilder direkt kontrolliert und Einstellungen vorgenommen werden können. Der Sensor im Aptus ist der gleiche wie im Valeo. Die maximale Empfindlichkeit, die am Aptus eingestellt werden kann, soll in Zukunft 400 ISO betragen. Damit lassen sich auch bei schlechteren Lichtbedingungen Aufnahmen aus der freien Hand machen.

Weitere Tests mit der ALPA 12 WA sind geplant, um die Genauigkeit im Objektraum zu steigern, verschiedene Objektive und Rückteile zu testen und um die Freihandtauglichkeit der Kamera zu untersuchen. Der modulare Aufbau der Kamera erlaubt auch den Einsatz der ALPA als terrestrische Messkammer mit oder ohne Shift des Objektivs sowie die Verwendung als Luftbildkamera. Diese Anwendungsbereiche sind Bestandteil weiterer Untersuchungen.

6 Dank

Die Autoren danken der Firma AICON 3D Systems GmbH aus Braunschweig für die Unterstützung bei der Durchführung der Kalibrierungsmessungen sowie der Firma GraphicArt aus Bern für die Bereitstellung verschiedener digitaler Kamerarückteile.

7 Literaturverzeichnis

- LUHMANN, T. & WENDT, K., 2000: Recommendations for an acceptance and verification test of optical 3D measurement systems. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, **33** (B5): 493-499.
- PEIPE, J. & YU, Q., 2004: Wie viele Pixel braucht der Mensch? Kameras und ihre Anwendung. *Photogrammetrie Laserscanning Optische 3D-Messtechnik, Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2004* (Hrsg. T. LUHMANN): 116-123.

VDI/VDE, 2002: VDI Entwurf /VDE Richtlinie 2634 Blatt 1, Optische 3D-Messsysteme mit punktförmiger Antastung. 10 S., Beuth Verlag, Berlin.

Erfahrungen mit einem neuen vollautomatischen Verfahren zur Orientierung digitaler Bilder

THOMAS LÄBE¹ & WOLFGANG FÖRSTNER²

Zusammenfassung: Der Aufsatz präsentiert ein neues vollautomatisches Verfahren zur relativen Orientierung mehrerer digitaler Bilder kalibrierter Kameras. Es nutzt die in den letzten Jahren neu entwickelten Algorithmen im Bereich der Merkmalsextraktion und der Bildgeometrie und erfordert weder das Anbringen von künstlichen Zielmarken noch die Angabe von Näherungswerten. Es basiert auf automatisch extrahierten Punkten, die mit dem von D. Lowe (2004) vorgeschlagenen Verfahren zur Extraktion skaleninvarianter Bildmerkmale berechnet werden. Diese ermöglichen eine Punktzuordnung auch bei stark konvergenten Aufnahmen. Für die Bestimmung von Näherungswerten der abschließenden Bündelausgleichung wird bei der relativen Orientierung der Bildpaare das direkte Lösungsverfahren von D. Nister (2004) verwendet. Der Aufsatz diskutiert die praktischen Erfahrungen mit den verwendeten Algorithmen anhand von Beispieldatensätzen sowohl von Innenraum- als auch von Außenaufnahmen.

1 Einleitung

Die Orientierung von Bildern ist eine der grundlegenden Aufgaben der Photogrammetrie und ihre Automatisierung schon lange Forschungsthema. Für Luftbildverbände kann die Automatisierung der Orientierung als gelöst gelten. Verfahren sind kommerziell verfügbar (HATS von Helava/Leica, Phodis-AT von Zeiss, ISDM von Intergraph, MATCH-AT von INPHO). POLLEFEYS (1999) hat wohl als erster ein vollautomatisches Orientierungsverfahren vorgestellt, das von den digitalen Bildern ausgehend die Orientierungsdaten bestimmt, zudem keine Kenntnis über die Kalibrierung voraussetzt. HAO & MAYER (2003) verfolgen das gleiche Ziel. Angeregt durch die Aufgaben der ISPRS Arbeitsgruppe III/1 „Image Orientation“ (<http://www.ipb.uni-bonn.de/isprs/wg.html>) haben wir uns das Ziel gesetzt, ein System für die automatische Bild-Orientierung zu entwickeln, das von einem Nicht-Spezialisten bedienbar ist. Die Anforderungen an ein solches System sind hoch:

1. Das System soll Bilder kalibrierter wie unkalibrierter Kameras verarbeiten können.
2. Die Definition und Messung von Passformation soll flexibel sein.
3. Das System soll den Benutzer ggf. auf eine schwache Blockgeometrie hinweisen und ihm auf Wunsch Empfehlungen für weitere Aufnahmen machen.
4. Das System sollte echtzeitfähig sein.

Wir haben im Herbst 2004 mit der Realisierung eines Systems zur vollautomatischen Bestimmung der frei gelagerten Orientierung von Bildern kalibrierter Kameras begonnen. Wir wollen das Verfahren hier vorstellen und über erste Erfahrungen berichten.

¹ Dipl.-Inform.(FH) Thomas Läbe, Institut für Photogrammetrie, Universität Bonn, Nussallee 15, 53115 Bonn, e-mail: laebe@ipb.uni-bonn.de

² Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Förstner, Institut für Photogrammetrie, Universität Bonn, Nussallee 15, 53115 Bonn, e-mail: wf@ipb.uni-bonn.de

2 Beschreibung des Verfahrens

Eine Übersicht über das verwendete Verfahren zeigt Abb. 1. Als Eingabe dienen mehrere Digitalbilder. Die Kalibrierung wird als bekannt vorausgesetzt. Bei Verzeichnung sind die Bilder vorab zu entzerren. Das Verfahren bestimmt zunächst alle relative Orientierungen, transformiert sie in ein gemeinsames Koordinatensystem und gleicht alle unbekannt orientierungsparameter und Objektpunktkoordinaten abschließend in einer freien Bündelausgleichung aus. Ergebnis ist ein relativ orientierter Bildverband. Die verwendeten Algorithmen werden im folgenden einzeln erläutert.

2.1 Merkmalsextraktion

Der erste Schritt einer automatischen Orientierung besteht in der automatischen Extraktion von Bildmerkmalen und der automatischen Zuordnung, die jedem Bilddetail eine eigene Nummer zuweist. Da wir das Verfahren auf relative orientierte Bildpaare stützen, verwenden wir als Bildmerkmale punktartige Bildstrukturen. Wir verwenden den Punktoperator, der von D. LOWE (2004) vorgeschlagen wurde. Er erfüllt eine für die Punktzuordnung uneingeschränkter Orientierungen wesentliche Voraussetzung: er ist rotations- und skaleninvariant.

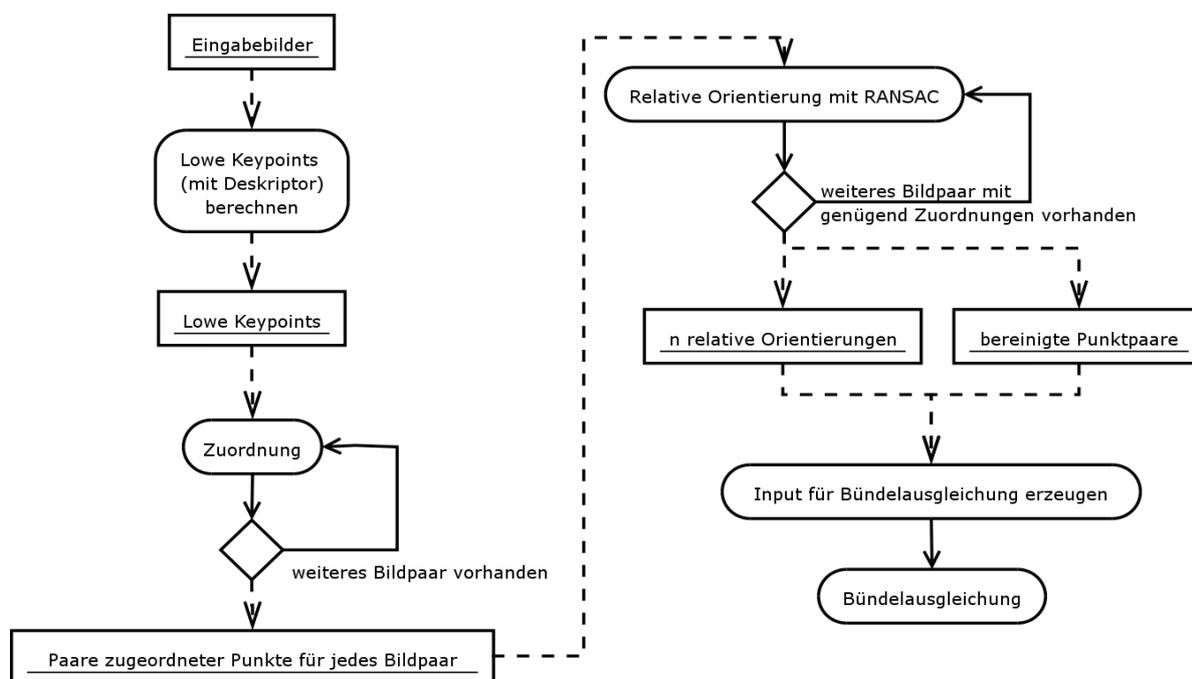


Abb. 1: UML-Aktivitätsdiagramm zum Gesamtverfahren zur automatischen relativen Orientierung mehrerer digitaler Bilder. Die einzelnen Bearbeitungsschritte werden in Kapitel 2 erläutert.

Er beschreibt die Umgebung jeden Punktes mit rotations- und skaleninvarianten Merkmalen, sog. SIFT-Merkmalen („Scale-Invariant Feature Transform“). Dieser Deskriptor beschreibt die Umgebung mit 16 Richtungshistogrammen und enthält 128 Werte im Wertebereich 0 bis 255. Da sich die projektive Verzerrung der Bilder zueinander lokal fast immer sehr gut durch ein Rotation und Skalierung approximieren lässt, erlaubt die Verwendung von SIFT-Merkmalen eine fast beliebige Anordnung der Kamerastandpunkte und Blickrichtungen, sofern genügend homologe Punkte auf den Bildpaaren vorhanden sind. Dies ist ein wichtiger Vorteil gegenüber Verfahren, die eine einfache Punktextraktion mit anschließender Berechnung des Korrelationskoeffizienten oder einer Kleinste-Quadrate-Zuordnung ("LSM") benutzen. Sol-

che Verfahren funktionieren nur zuverlässig, falls z. B. keine zu große (z.B. 15°) Drehung der Bilder relativ zueinander vorhanden ist (vgl. den Ansatz von HAO & MAYER (2004)).

2.2 Zuordnung

Wir nehmen an, dass keine Vorabinformation über die gegenseitige Lage der Bilder im Raum vorliegt. Daher wird die Zuordnung homologer Punkte für *jedes* mögliche Bildpaar berechnet. Als Gütemaß für die Zuordnung zweier Punkte verwenden wir den euklidischen Abstand ihrer Deskriptor-Vektoren (LOWE, 2004). Je kleiner der Abstand der Deskriptor-Vektoren ist, um so wahrscheinlicher ist es, dass es sich um ein homologes Punktepaar handelt. Da diese Berechnung für ein einzelnes Paar sehr effizient ist, kann sie für alle Punktepaare durchgeführt werden, was bei den gegebenen Voraussetzungen auch erforderlich ist. Für die Zuordnung bieten sich 2 mögliche Strategien an:

Zuordnungsstrategie I: Für jeden Punkt im ersten Bild eines Bildpaars werden die beiden besten Zuordnungen im zweiten Bild gesucht. Ist das Gütemaß des zweitbesten um einen gewissen Prozentsatz (z.B. 60%) schlechter als das Gütemaß des besten Punktes, dann wird die Zuordnung des besten als sicher angenommen und weiter verarbeitet.

Zuordnungsstrategie II: Alle Zuordnungen, deren Gütemaß eine gewisse Schwelle unterschreitet, werden zunächst angenommen. Ergeben sich für einen Punkt mehr als n homologe Punkte im anderen Bild, dann gelten diese Zuordnungen als zu unsicher und werden gelöscht.

Strategie I hat den Vorteil, dass sie recht sicher ist; sie liefert aber nur maximal eine Zuordnung für einen Punkt im ersten Bild, würde daher evtl. zu wenig Punktepaare liefern. Strategie II sollte sich bei Bildern mit wiederholenden Strukturen (z. B. Fenstern bei Fassadenaufnahmen) bewähren, da es hier der nachfolgenden relativen Orientierung überlassen werden kann, welche von den von den n Zuordnungen eines Punktes sich als richtig erweist. Die Beurteilung der beiden Strategien wird anhand von Experimenten im Abschnitt 3 vorgenommen.

Der Schwellwert für die Gütemaße in bei Zuordnungsstrategie I ist relativ leicht zu setzen, da er gut interpretierbar ist. Aber auch für Strategie II kann man die Schwelle für den maximalen Abstand zweier Deskriptoren unabhängig vom Bildmaterial setzen, da die Merkmale des Deskriptors immer im Wertebereich 0 bis 255 liegen. Den Schwellwert kann man recht einfach aus dem Histogramm des Gütemaßes von guten Zuordnungen ablesen, s. das Histogramm Abb. 2 aus mehreren gerechneten Beispielen.

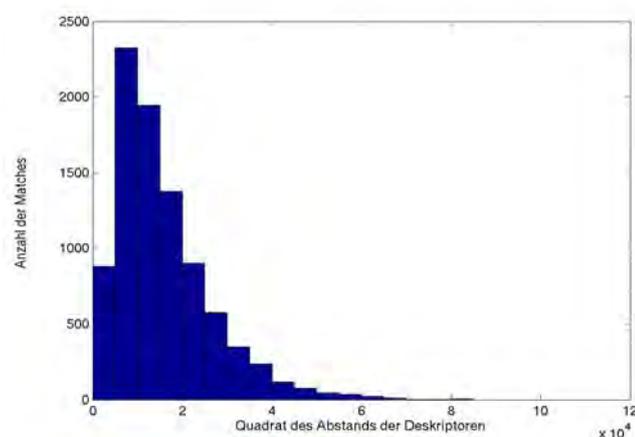


Abb. 2: Verteilung des Quadrates der Abstände der Deskriptoren der extrahierten korrekten Bildpunktepaare. Sie wurden mit Strategie I bestimmt und durch die gesamte Orientierungsbestimmung aus 37 Bildpaaren aus 3 Datensätzen bestätigt. Ein sinnvoller Schwellwert liegt danach ca. zwischen ca. 6×10^4 und 8×10^4 .

2.3 Relative Orientierung der Bildpaare

Für jedes Bildpaar, für das genügend Kandidaten für homologe Punkte gefunden wurden, wird nun eine relative Orientierung berechnet. Da bei der Zuordnung mit einer u. U. hohen Ausreißerquote (z.B. 60% oder mehr) zu rechnen ist, muss ein robustes Verfahren, das zudem ohne gegebene Näherungswerte arbeitet, eingesetzt werden. Wir benutzen dazu das RANSAC-Verfahren ("Random Sample Consensus") nach FISCHLER & BOLLES (1981), das zufällig 5 Kandidaten für Zuordnungen auswählt, die relative Orientierung berechnet und mit Hilfe der übrigen Punkte die Qualität dieser Lösung aus der Einhaltung der Koplanaritätsbedingungen bestimmt und unter allen Versuchen die beste Lösung ausgewählt. Das Verfahren enthält im Kern die vor kurzem von D. NISTER (2004) gefundene direkte Lösung der relativen Orientierung aus 5 Punktepaaren. Das Ergebnis ist prinzipiell nicht eindeutig, man erhält maximal 10 verschiedene Lösungen. In der Praxis treten meist 4 oder 6 Lösungen auf. Einige können zusätzlich aufgrund der Bedingung, dass alle Objektpunkte vor den Kameras liegen, ausgeschlossen werden. Für die übrigen Lösungen wird die Qualität bestimmt. Die Anzahl der Versuche, die man durchführen sollte, hängt von der erwarteten Ausreißerquote und der Wahrscheinlichkeit ab, mit der eine richtige Lösung gefunden werden soll. Beispielweise beträgt die Anzahl der Versuche bei 60% Ausreißerquote und 95% Wahrscheinlichkeit für eine richtige Lösung 292 (MCGLONE, 2004, S. 107). Aufgrund der ermittelten relativen Orientierung kann jetzt die Liste der Zuordnungskandidaten bereinigt werden, indem alle Zuordnungen gelöscht werden, die die Lösung nicht unterstützen. Das Ergebnis dieses Schrittes sind insgesamt also photogrammetrische Modelle von Bildpaaren mit den Parametern der relativen Orientierungen mit dazugehörigen als richtig betrachteten Korrespondenzen.

2.4 Bündelausgleichung

Der abschließende Schritt des Orientierungsverfahrens ist eine Bündelausgleichung. Zunächst werden die photogrammetrischen Modelle der Bildpaare in ein einheitliches Koordinatensystem transformiert. Auf der Basis der Korrespondenzen aller Bildpaare kann man entscheiden, welche Modelle verwendet werden können. Das Koordinatensystem der besten relativen Orientierung, d. i. diejenige mit der größten Zahl q korrespondierender Punkte, wird als Objektkoordinatensystem verwendet. Die übrigen Bilder werden sukzessive in den bestehenden Bildverband integriert. Dazu dient ein photogrammetrisches Modell, das das neue Bild und ein bereits orientiertes Bild enthält. Gemeinsame Objektpunkte im bestehenden Bildverband und in dem aktuellen photogrammetrischen Modell dienen der Maßstabsübertragung. Finden sich keine entsprechenden Dreifach-Punkte, so muss ein anderes photogrammetrisches Modell benutzt werden.

Vor der Integration eines neuen Bildes werden die Dreifach-Punkte auch auf Konsistenz geprüft. Denn die Zuordnung von drei Punkten in drei Bildern kann falsch sein, obwohl alle drei Koplanaritätsbedingungen erfüllt sind. Hierfür wird ein Vorschlag aus (MCGLONE, 2004, S. 268) benutzt. Er basiert auf dem Schnitt von vier Ebenen im Raum, die durch die Projektionsstrahlen der drei Beobachtungen gehen und durch die Epipolarlinien definiert sind. Sind die drei Beobachtungen homolog, so schneiden sich diese vier Ebenen in einem Punkt. Dies kann durch einen statistischen Test geprüft werden, ohne dass der 3D-Punkt bestimmt werden muss. Es werden also so lange Bilder hinzugefügt, bis alle Bilder in das Gesamtsystem transformiert worden sind oder keine relativen Orientierungen, die als Anschluss benutzt werden können, mehr vorhanden sind. Im diesem Fall kann nur ein Teil der Bilder gemeinsam orientiert werden. Anschließend werden Näherungswerte für die Objektkoordinaten durch räumlichen Vorwärtsschnitt berechnet. Um die nachfolgende Bündelausgleichung effizient in Bezug auf Rechenzeit und Speicherbedarf zu halten, kann an dieser Stelle noch eine Ausdünnung der Punkte durchgeführt werden. Hierfür teilen wir die Bilder in Bereiche ("patches") auf, in

denen wir pro Bereich ein Mindestanzahl von Punkten - falls vorhanden - garantieren. Es werden zunächst alle möglichen 2-fach-, dann 3-fach-Punkte u.s.w. gelöscht, so dass die Geometrie wesentlich stabilisierenden Mehrfachpunkte möglichst erhalten bleiben. Die abschließende Bündelausgleichung erlaubt eine Beurteilung des Ergebnisses durch Analyse der Genauigkeiten.

Das Programm ist im wesentlichen in MATLAB implementiert. Auch für die Bündelausgleichung benutzen wir eigene, in MATLAB geschriebene Software. Der Punktoperator sowie die beiden Zuordnungsverfahren sind in C geschrieben. Für den Vorwärtsschnitt benutzen wir noch eine eigene Java-Bibliothek.

3 Ergebnisse

3.1 Beispiele

Das Verfahren ist mit vielen Datensätzen, die hier aus Platzgründen nicht alle dargestellt werden können, getestet worden. Wir haben für diese Tests Consumer-Digitalkameras eingesetzt, die nicht für photogrammetrische Zwecke gebaut worden sind, die unter bestimmten Bedingungen jedoch eine stabile innere Orientierung aufweisen (LÄBE & FÖRSTNER, 2004). Angaben über 7 Datensätze sind in Tab. 1 zu finden.

Die Abb. 3, Abb. 4 und Abb. 5 zeigen das Ergebnis der Orientierungsbestimmung als 3D-Visualisierung der Datensätze 5, 6 und 7. Abb. 3 und Abb. 4 sind Aufnahmen einer Karte an einer Wand und zeigen deutlich, dass der Algorithmus mit Drehungen der Kamera (jeweils ca. 90°-Drehungen bei Abb. 3) und mit verschiedenen Skalen (Abb. 4) umgehen kann.

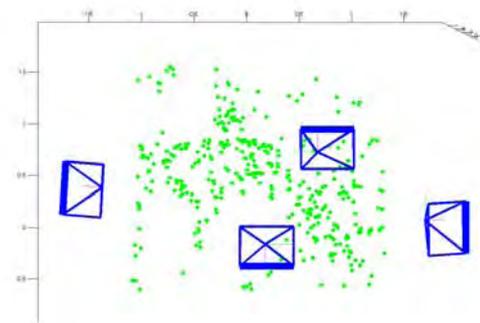


Abb. 3: 3D-Visualisierung der Kamerastandorte und Objektpunkte des Datensatz 5 (Bilder mit 3 Megapixel, 1. Pyramidenstufe, Kamera: HP 435)

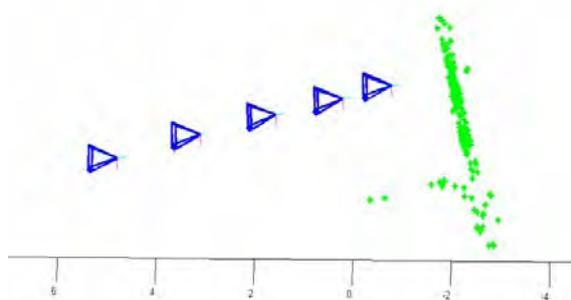


Abb. 4: 3D-Visualisierung der Kamerastandorte und Objektpunkte des Datensatz 6 (Bilder mit 3 Megapixel, 1. Pyramidenstufe, Kamera: HP 435)

Unsere Erfahrung zeigt, dass nicht so sehr die Aufnahmeanordnung (genügend Überlappung vorausgesetzt) für den Erfolg des Verfahrens eine entscheidende Rolle spielt, sondern vor allem die Textur auf den aufgenommenen Objekten. Sie ist im Idealfall sehr vielfältig, wie beispielsweise auf Postern oder Gemälden mit vielen Details. Datensatz 5 beinhaltet 429 Objektpunkte (von 1579 vor der Ausdünnung für die Bündelausgleichung), Datensatz 6 254 Punkte (von 1153). Abb. 5 zeigt, dass auch große Blöcke gerechnet werden können. Dieser Datensatz enthält 32 Bilder und 3000 Objektkoordinaten.

3.2 Vergleich der zwei Zuordnungsstrategien

Die im Kapitel 2 beschriebenen Zuordnungsstrategien I (Prüfung des Erst- und Zweitbesten) und II (Schwellwertverfahren) wurden bei 6 verschiedenen Datensätzen auf ihren praktischen Nutzen hin evaluiert. Dabei wurden jeweils die beiden Strategien mit 2 verschiedenen Parametern (60% bzw. 80% Unterschied bei Strategie I, Zulassen von $n = 2$ bzw. $n = 4$ mehrfachen Zuordnungen bei Strategie II) untersucht. Die Ergebnisse sind in Tab. 2 zu finden. Die Daten zeigen deutlich, dass Strategie I in der Lage ist, Zuordnungen mit sehr geringer Ausreißerzahl zu liefern. Bei 60% Unterschied zwischen bester und zweitbesten Zuordnung liegt die Ausreißerquote sogar unter 10%; allerdings werden in den meisten Fällen so wenig Punktpaare geliefert, dass keine Orientierung möglich ist. Daher ist Strategie I mit 60% nicht allgemein einsetzbar. Strategie II liefert durchweg höhere Ausreißerquoten, aber auch durchweg mehr Zuordnungen. Vergleicht man die *richtigen* Zuordnungen miteinander, so stellt man fest, dass Strategie II, $n = 2$ bis auf Datensatz 2 weniger richtige Zuordnungen ergibt als Strategie I, 80%. Der Vergleich mit $n = 4$ ergibt in 4 Fällen eine ähnliche Anzahl an richtigen Zuordnungen, einmal sind es weniger (Datensatz 5) und einmal deutlich mehr (Datensatz 2 mit sich wiederholenden Strukturen bei einem Metallgitter). Benutzt man Strategie II, dann sollte man $n = 4$ (oder zumindest $n > 2$) wählen, denn bei $n = 4$ zeigen sich in allen Fällen eine höhere Anzahl von richtigen Zuordnungen, wobei die Ausreißerquoten allerdings ebenfalls etwas steigen. Dies kann aber durch eine höhere Anzahl von Versuchen des RANSAC-Algorithmus ausgeglichen werden.

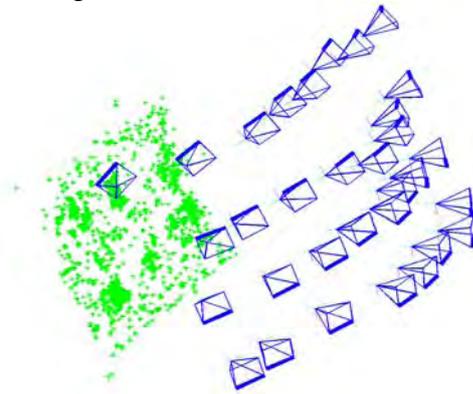


Abb. 5: Datensatz 7 mit 32 Bildern und 3000 zur Orientierung benutzten Objektpunkten

Tab. 1: Angaben über die verwendeten Testdatensätze. Bilder der Pyramidenstufe 1 besitzen die halbe Originalauflösung.

Datensatz	Kamera	Auflösung in Megapixel	Pyramidenstufe	# Bilder	Szene
1	HP 435	3	2.	6	Bürotisch
2	HP 435	3	2.	3	Regelmäßiges Metallgitter an der Wand und Stuhl
3a	HP 435	3	1.	4	Großes Foto und Karton
3b			2.		
4a	Canon EOS1 Ds	11	2.	4	Hausfassade mit großem Abstand zwischen den Bildern
4b			3.		
5	HP 435	3	1.	4	Karte an der Wand
6	HP 435	3	1.	5	Karte an der Wand
7	HP 435	3	1.	32	Kartons und Bücher auf dem Boden

Da von den bis zu n^2 photogrammetrischen Modellen der n Bilder nur die $n-1$ besten für die Bestimmung der Näherungswerte verwendet werden, stören die hohen Ausreißerquoten das Verfahren i. a. nicht. Bei Datensatz 4 ist zu beachten, dass es durch den großen Aufnahmeabstand sehr schwierig ist, im Bildtripel gemeinsame Punkte (mit 3 Beobachtungen) zu finden, so dass dieser Datensatz generell schwierig zu orientieren ist und somit die nicht erfolgte Ori-

entierung bei Strategie II kein Grund dafür ist, diesen Zuordnungsalgorithmus generell abzulehnen. Zusammenfassend ist festzuhalten, dass Strategie II, $n = 4$ die allgemein gesehen beste Strategie darstellt, da sie wie erwartet bei sich wiederholenden Strukturen besser geeignet ist. Mit Strategie I, 80% erhält man ebenfalls ähnlich gute Ergebnisse.

Tab. 2: Erfolg der Zuordnungsstrategien I (60 und 80% Unterschied zwischen erster und zweiter Zuordnung) und II ($n =$ Anzahl der zugelassenen Mehrfachzuordnungen). Pro Datensatz sind die durchschnittliche Anzahl von Zuordnungen pro Bildpaar und die durchschnittliche Ausreißerquote angegeben. Fehlen die Angaben, konnte keine Orientierung aller Bilder erstellt werden.

Datensatz	Strategie I, 60%		Strategie I, 80%		Strategie II, $n=2$		Strategie II, $n=4$	
1	-	-	84	30%	62	61%	76	70%
2	-	-	48	38%	62	53%	105	59%
3a	1135	0.9%	1829	5%	1559	27%	1837	43%
3b	578	0.5%	823	4%	764	18%	870	32%
4a	-	-	78	63%	-	-	-	-
4b	-	-	44	57%	-	-	-	-
5	207	6%	160	36 %	93	65%	108	74%
6	313	1%	494	7%	465	41%	510	54%

4 Zusammenfassung und Ausblick

Unser Ziel ist es, ein möglichst breit einsetzbares Tool für die vollautomatische Orientierungsbestimmung zu entwickeln. Die ersten Erfahrungen mit einem Verfahren für die relative Orientierung von Verbänden kalibrierter Bilder sind ermutigend und bestätigen, dass vollautomatische Verfahren auch für die Orientierung von Bildern im Nahbereich realisierbar sind.

Die Implementation ist allerdings noch in verschiedener Hinsicht vorläufig:

- *Robustheit des Verfahrens.* Um auch Bilder mit geringerer Überlappung aber genügend guten Zuordnungen bearbeiten zu können sind zusätzliche Prüfungen erforderlich. Z. B. kann man für ein Bildtripel die drei relativen Orientierungen auf Konsistenz prüfen: das Produkt der drei Rotationsmatrizen muss die Einheitsmatrix ergeben und die drei Basisvektoren müssen koplanar sein (TRAUTWEIN et al., 1999).
- *Bündelausgleichung mit Dämpfung.* Um den Konvergenzradius der Bündelausgleichung zu erhöhen, kann man eine Dämpfung einführen (BÖRLIN et al., 2004); dies führt zu einer erheblichen Reduktion divergierender Ausgleichungen.
- *Bündelausgleichung mit robuster Schätzung.* Die Empfindlichkeit der Tests während der Bestimmung der Näherungswerte ist nicht optimal, so dass kleine grobe Fehler nicht entdeckt werden. Dies sollte in der abschließenden Ausgleichung erfolgen, etwa mit einer robusten Schätzung.
- *Optimierung der Rechenzeiten.* Das Programm ist derzeit nicht optimiert. Etwa beträgt die Rechenzeit für den Bildverband der Datensätze 5 und 6 derzeit 5.5 bzw. 4.2 Minuten auf einem PC mit Pentium I V-CPU und 2.2 GHz Taktfrequenz, der Datensatz 7 benötigte ca. 4 Stunden. Insbesondere ist wegen der Bestimmung aller relativen Orientierungen die Rechenzeit quadratisch in der Zahl der Bilder. Hier kann man durch Verwendung der meistens vorhandenen Information über Verknüpfungen über die Bildnummer noch wesentliche Reduktion der Rechenzeiten erreichen. Darüber hinaus wäre es sinnvoll, verschiedene Pyramidenstufen für eine Laufzeitverbesserung

zu verwenden. Auf der Originalauflösung kann man dann die Epipolargeometrie nutzen und auf die Bestimmung der relativen Orientierung der Bildpaare verzichten.

Neben diesen Erweiterungen sind natürlich die in der Einleitung genannten insgesamt schwierigeren Probleme zu lösen: die Nutzung unkalibrierter Kameras bzw. die Bereitstellung eines vollautomatischen Kalibriermoduls, das ohne Marker auskommt, die flexible Integration von Passinformation und die für den fachfremden Nutzer erforderlicher Selbstdiagnose einschließlich Hinweisen für weitere Aufnahmen.

Insgesamt betrachten wir diese Entwicklung als ersten Schritt der Lösung des Problems der Orientierung digitaler Bilder für die Nachbardisziplinen, den technisch interessierten Laien und später für Jedermann.

5 Danksagung

Wir danken Herrn D. Lowe, Kanada, für die Bereitstellung des Punktoperators. Weiterhin gilt unser Dank unseren Kollegen Herrn M. Luxen für die Implementierung der Bündelausgleichung und Herrn C. Beder für die Implementierung des Nistér-Algorithmus.

6 Literaturverzeichnis

- BÖRLIN, N., GRUSSENMEYER, P., ERIKSSON, J. & LINDSTRÖM, P., 2004: Pros and Cons of Constrained and Unconstrained Formulations of the Bundle Adjustment Problem. In: International Archives of ISPRS, Volume XXXV, ISPRS Congress Istanbul 2004, S. 589-594.
- FISCHLER, R. & BOLLES, R.C., 1981: Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography. Comm. of the ACM, Vol. 24, S. 381-395
- HAO, X. & MAYER, H., 2003. Orientation and Auto-Calibration of Image Triplets and Sequences. In: The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. (34) 3/W8, S. 73-78.
- LÄBE, T. & FÖRSTNER, W., 2004: Geometric Stability of Low-Cost Digital Consumer Cameras. Proc. International Archives of ISPRS, Volume XXXV, ISPRS Congress Istanbul 2004, S. 528-535.
- LOWE, D., 2004: Distinctive image features from scale-invariant keypoints. International Journal of Computer Vision, 60, 2, S. 91-110.
- MCGLONE, J. C., editor, 2004: Manual of Photogrammetry. - Fifth edition, American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Bethesda, Maryland, USA.
- NISTÉR, D., 2004: An efficient solution to the five-point relative pose problem. - IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence (PAMI), 26(6): S. 756-770.
- POLLEFEYS, M., KOCH, R. & VAN GOOL, L. 1999: Self-Calibration and Metric Reconstruction in spite of Varying and Unknown Internal Camera Parameters, International Journal of Computer Vision, 32(1), 7-25.
- TRAUTWEIN, S., MÜHLICH, M., FEIDEN, D. & MESTER, R. 1999: Estimating Consistent Motion From Three Views: An Alternative To Trifocal Analysis. LNCS, vol.1689, Springer Verlag.

Aktive Konturen für die automatische Messung von natürlichen Punkten bei industriellen Anwendungen

BERND-MICHAEL WOLF¹ & MARKUS ROLAND²

Zusammenfassung: In diesem Beitrag wird vorgeschlagen, Aktive Konturen für die Bestimmung von Objekten, die in industriellen Anwendungen vorkommen, beispielsweise Bohrungen und Stanzungen, in Bildern zu nutzen. Anwendungsbeispiele werden gezeigt, Vor- und Nachteile des Einsatzes von Aktiven Konturen diskutiert und zukünftige Entwicklungsmöglichkeiten aufgezeigt.

1 Einleitung

Die Möglichkeiten der automatischen photogrammetrischen Punktbestimmung sind in der Regel auf Punkte begrenzt, die am Objekt durch Marken eindeutig signalisiert werden können. Es kann jedoch unbequem, ineffizient oder sogar unmöglich sein, derartige Marken anzubringen. Beispiele hierfür sind Bohrungen oder Stanzungen, sowie Objektbegrenzungen, die beispielsweise für die Bestimmung von Spaltmaßen benötigt werden.

Der Einsatz von Targets (Messmarken) hat zwei Vorteile: 1. Das Aussehen der Targets in den Bildern ist bekannt, deswegen sind sie einfach und schnell automatisch zu detektieren. 2. Man kann für einen sehr guten Kontrast zwischen Vorder- und Hintergrund am zu bestimmenden Punkt sorgen – eine Voraussetzung für das Erreichen hoher Punktmessgenauigkeiten. Beides entfällt, wenn natürliche Punkte, beispielsweise der Mittelpunkt einer Bohrung, in den Bildern bestimmt werden sollen. Je nach Aufnahmerichtung kann das Licht entweder am Rand, am Boden bzw. am Hintergrund der Bohrung reflektiert werden, siehe auch (LUHMANN, 2003). Diese Faktoren beeinflussen deren Aussehen in den Bildern. Entsprechend aufwändiger ist es, die Konturen natürlicher Punkte zu detektieren. So variiert der Kontrast an den Bohrungsrandern sehr stark, für die genaue und zuverlässige Bestimmung von Punkten auf den Kanten sollte dieser möglichst groß sein.

Eine Lösungsmöglichkeit für die zuverlässige Messung natürlicher Punkte ist der Einsatz von sogenannten *Aktiven Konturen* (KASS et al., 2003). Durch eine Integration von Objektgeometrie und Bildinformation entfällt hier die unter Umständen heuristische Suche nach korrekten Punkten auf den Objektbegrenzungen. Für die automatische Extraktion von Objekten aus Luftbildern wurde der Einsatz von Aktive Konturen schon häufiger untersucht (GÜLCH, 1996; FUA, 1999; STRAUB, 2003), dort jedoch eher kritisch bewertet. Ein Grund dafür ist die Komplexität der Situation in Luftbildern.

Man kann sagen, dass ein Verfahren umso geeigneter für die Integration in ein automatisches System ist, je weniger Vorinformation es für seine erfolgreiche Ausführung benötigt. Dass dies für Aktive Konturen gilt, wird hier für die zwei Aspekte Beleuchtung und Objektform gezeigt. Dafür wurden zwei Szenarien untersucht: In Szenario A (siehe Abschnitt 3.1) wurde ein Aluminiumblech mit mehreren Bohrungen im Durchlicht und im diffusen Auflicht

¹ Bernd-Michael Wolf (geb. Straub), SOLVing3D GmbH, Osteriede 5, 30827 Garbsen, Hannover, E-Mail: bernd-m.wolf@solving3d.de

² Markus Roland, SOLVing3D GmbH, Osteriede 5, 30827 Garbsen, Hannover, E-Mail: markus.roland@solving3d.de

aufgenommen (siehe Abbildung 2 und 3). Die Bohrungsmittelpunkte wurden mit Aktiven Konturen bestimmt und die Ergebnisse verglichen. Das zweite Experiment (Szenario B, Abschnitt 3.2) bestand darin, Bohrungsmittelpunkte verschiedener Formen auf der Innenseite einer PKW-Tür (ohne Innenverkleidung) in den Bildern zu bestimmen. Als Genauigkeitsmaß dienten in diesem Fall die Standardabweichungen der 3D-Koordinaten, die sich in der Bündeltriangulation ergeben haben.

2 Aktive Konturen

Aktive Konturen wurden erstmals in (KASS et al., 2003) als algorithmisches Bindeglied zwischen einer Low-level Bildverarbeitungs-komponente und einer High-level Steuerung eines Bildverarbeitungssystems vorgeschlagen. Die High-level Steuerung ist für die Interpretation der Szene zuständig, hat also die Frage „Wo ist was?“ zu beantworten. Mit Hilfe von Aktiven Konturen kann die Gruppierung der Low-level Merkmale unter Berücksichtigung von bekannten geometrischen Eigenschaften des zu extrahierenden Objektes algorithmisch erfolgen. Neben dem Begriff Aktive Kontur werden in der Literatur auch verschiedene andere Begriffe, beispielsweise Snake oder deformierbares Modell (deformable model), verwendet.

Die grundlegende Idee der Aktiven Kontur ist die Betrachtung des Bildes als „Landschaft“. Die Bewegung der Kontur in der Landschaft ist durch eine virtuelle Schwerkraft verursacht, die Kontur wird von den Tälern dieser Landschaft angezogen (Abbildung 1). Die Elastizität der Kontur selbst wird durch physikalisch motivierte Parameter gesteuert. Geometrische Eigenschaften des gesuchten Objektes können explizit bei der Formulierung der Aktiven Kontur berücksichtigt werden (FUA, 1995; FUA, 1999).

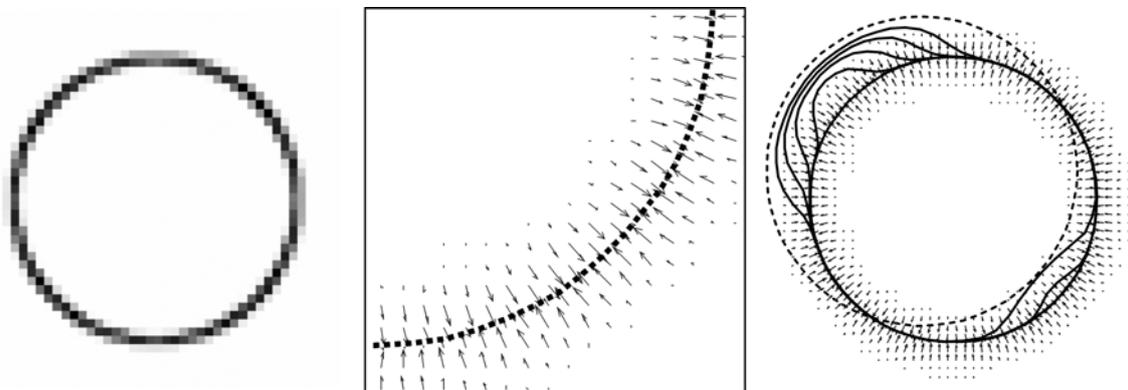


Abb. 1: Links: Ein kreisförmiges Tal als virtuelle Landschaft, in der sich die Aktive Kontur bewegt. Mitte: Talsohle mit Gradientenvektoren. Rechts: Aktive Kontur, die sich aufgrund des Gradientenvektorfeldes von links oben in die Talsohle bewegt. Der Anfangszustand ist gestrichelt dargestellt. (Abbildung aus STRAUB, 2003)

In Abbildung 1 ist links ein kreisförmiges „Tal“ dargestellt, in das sich die Aktive Kontur bewegen soll. In der Mitte der Abbildung ist ein Ausschnitt aus dem Gradientenvektorfeld dargestellt, das der Steuerung dieser Bewegung dient. Die Vektoren zeigen in Richtung der Talsohle. Rechts ist die Bewegung der Kontur während der Optimierung dargestellt. Ausgehend vom gestrichelt dargestellten Zustand zum Zeitpunkt der Initialisierung bewegt sich die Kontur von links oben nach rechts unten.

3 Durchgeführte Untersuchungen

In diesem Abschnitt werden zwei experimentelle Szenarios beschrieben. Im ersten Teil wird die Auswirkung von zwei unterschiedlichen Beleuchtungsarten auf die Ergebnisse der Punktbestimmung dargestellt. Im zweiten Teil des Abschnitts wird gezeigt, dass sich Aktive Konturen für verschiedene Objektformen gleichermaßen eignen.

3.1 Szenario A: Durchlicht und Auflicht

Zwei grundlegend unterschiedliche Beleuchtungen eines $75 \times 75 \text{ mm}^2$ großen, 3 mm dicken Aluminiumblechs mit gebürsteter Oberfläche sind in den folgenden beiden Abbildungen zu sehen: Abbildung 2 zeigt die Situation im diffusen Auflicht, Abbildung 3 bei Verwendung einer Durchlichtbeleuchtung. Für die Bildverarbeitung ist der erste Fall problematisch: Es treten Schatten innerhalb der Punktmarke auf, der Kontrast zwischen Vorder- und Hintergrund ist relativ gering und zusätzlich sind an den Rändern Überstrahlungen zu erkennen.

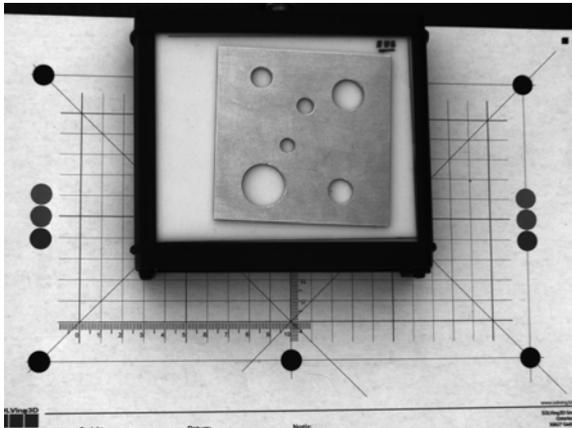


Abb. 2: Aluminiumblech im Diffusen Auflicht

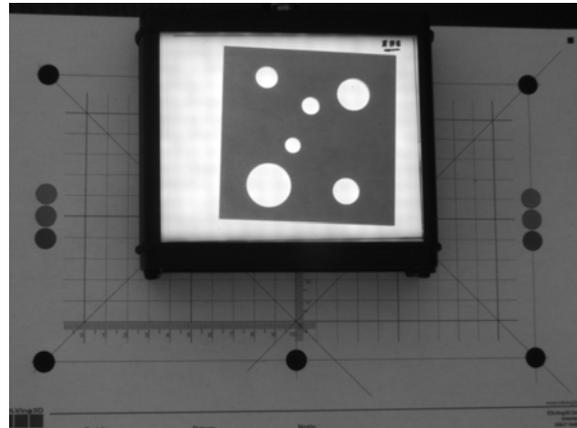


Abb. 3: Aluminiumblech im Durchlicht

Um zu klären, ob sich Aktive Konturen grundsätzlich für die Bestimmung der Position der Bohrungen in dem Aluminiumblech eignen, wurden zunächst in den beiden Aufnahmen (Abbildung 2 und 3) manuell Näherungswerte (Pixelkoordinaten und Durchmesser auf einige Pixel genau) der insgesamt sechs Bohrungen des Aluminiumbleches bestimmt. Anschließend wurde für jede Bohrung eine kreisförmige Näherungskontur angelegt und die Zentrumskoordinaten als Schwerpunkt dieser Kontur berechnet. Dabei wurden für alle Bohrungen in beiden Bildern identische Parametereinstellungen für die Konturbestimmung verwendet, als Koordinate für den Mittelpunkt wurde der Schwerpunkt aller Konturpunkte benutzt. Für die sechs Bohrungen ergab sich ein mittlerer Abstand zwischen den Zentrumskoordinaten der Auflicht- und der Durchlichtsituation von 0.8 Pixeln (kleinster Abstand 0.6 Pixel, größter Abstand 1.7 Pixel).

Für einen visuellen Vergleich sind die Ergebnisse des schlechtesten Falles (1.7 Pixel Abstand zwischen den beiden Schwerpunkten) der Konturbestimmung für die rechte obere Bohrung in Abbildung 4 und 5 dargestellt. Im Auflicht ist die Kontur vor allem unten rechts wegen der dortigen Überstrahlung ungenau bestimmt. Im Durchlicht treten im oberen rechten Bereich wegen der schräg angestrahlten Innenseite der Bohrung Schwierigkeiten auf. Berücksichtigt man, dass für die Bestimmung des Mittelpunkts keine Ellipsenausgleichung sondern der

Schwerpunkt aller Kantenpunkte herangezogen wurde, so können diese Ergebnisse als zufriedenstellend bis vielversprechend eingestuft werden.



Abb. 4: Bohrungskontur im diffusen Auflicht



Abb. 5: Bohrungskontur im Durchlicht

3.2 Szenario B: Konvergente Aufnahmerichtungen und unterschiedliche Objektformen

In einer zweiten Untersuchung wurden sieben verschiedene Bohrungen auf der Innenseite einer Fahrzeugtür mit Aktiven Konturen wie oben beschrieben bestimmt. Die Bilder wurden mit identischen Beleuchtungsverhältnissen jedoch aus unterschiedlichen Aufnahmerichtungen aufgenommen. Im Rahmen dieser Untersuchung wurden sechs konvergente Aufnahmen einer Fahrzeugtür verwendet. Zwei dieser Aufnahmen sind in den Abbildungen 6 und 7 dargestellt. Die Orientierung der Aufnahmen erfolgte mit Hilfe der codierten Marken, die 3D-Koordinaten der natürlichen Punkte wurden nachträglich mit einem Vorwärtsschnitt berechnet³. Die Ermittlung der Bildkoordinaten erfolgte wie im vorherigen Abschnitt beschrieben mit Aktiven Konturen. Auch hier wurden grobe Näherungswerte vorgegeben und die Initialisierung erfolgte als Kreis.

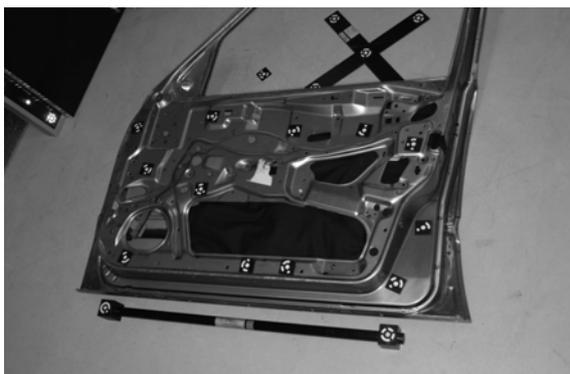


Abb. 6: Innenseite einer Fahrzeugtür. Aufnahme AICON 3D Systems GmbH, Braunschweig



Abb. 7: Aufnahme einer Fahrzeugtür. Aufnahme AICON 3D Systems GmbH, Braunschweig

³Sämtliche photogrammetrischen Berechnungen wurden von der AICON 3D Systems GmbH, Braunschweig durchgeführt.

Für die 3D-Koordinaten der signalisierten Punkte ergab sich in der Bündeltriangulation gemittelt über alle Koordinatenkomponenten eine innere Genauigkeit von 5 μm . Für die sieben im Rahmen dieser Untersuchung beobachteten natürlichen Punkte ergab sich eine innere Genauigkeit von 0.15 mm.

Für einen visuellen Vergleich der Ergebnisse sind Ausschnittsvergrößerungen von drei verschiedenen Punkten in Abbildung 8 dargestellt – jeweils übereinander die Ergebnisse für denselben Punkt in zwei unterschiedlichen Bildern. Man erkennt, dass die Bohrungen sich hinsichtlich der Form stark unterscheiden. Mit der Aktiven Kontur können diese unterschiedlichen Bohrungen bestimmt werden, ohne dass an deren Steuerparametern Änderungen vorgenommen werden mussten.

Die Ausschnittsvergrößerungen zeigen ebenfalls, dass der Ansatz unempfindlich gegenüber wechselnden Beleuchtungsverhältnissen ist. Dies wird besonders bei den beiden Bildern in der rechten Spalte von Abbildung 8 deutlich.

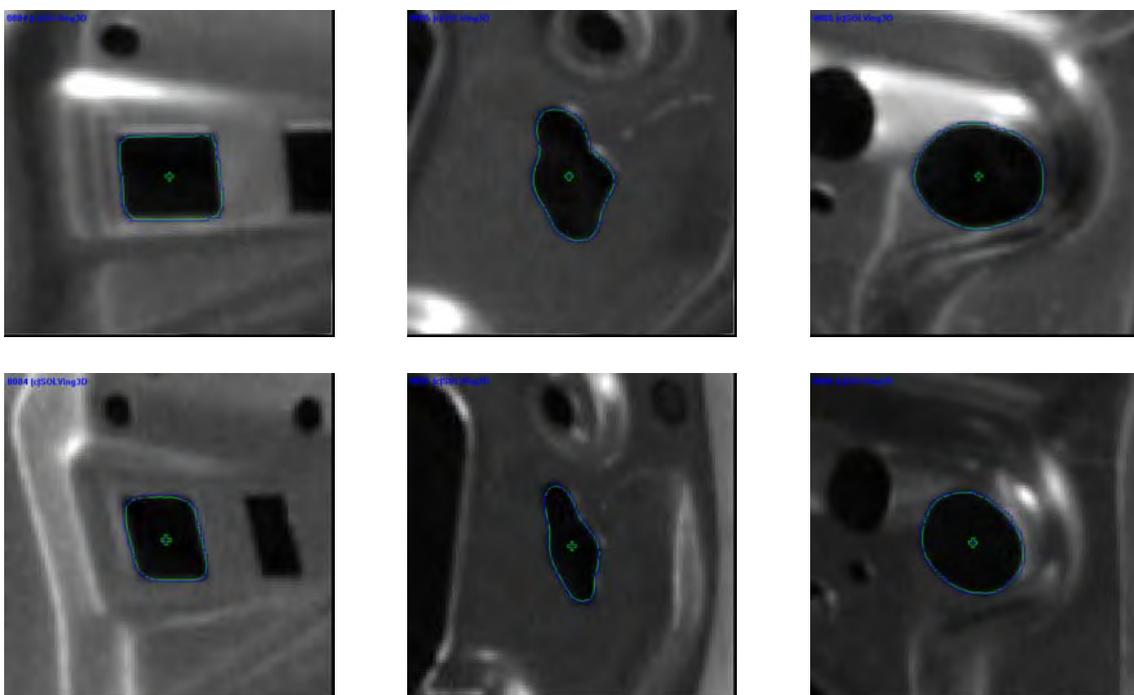


Abb. 8: Ergebnisse der Schwerpunktberechnung mit Aktiven Konturen: Spaltenweise sind jeweils identische Objekte in zwei verschiedenen Bildern übereinander dargestellt.

4 Zusammenfassung

Im Rahmen der in diesem Artikel beschriebenen Studie wurden Aktive Konturen für die automatische Messung von natürlichen Punkten eingesetzt. Einerseits wurden die Beleuchtungsverhältnisse variiert (Durchlicht und Auflicht) und andererseits wurden verschiedene Objektformen (rund, eckig) untersucht. Die Versuche wurden jeweils mit identischen Steuerparametern für die Berechnung der Aktiven Kontur durchgeführt. Für die Nutzung in einem automatischen System bedeutet das unter anderem, dass grundsätzlich keine Voranalyse bezüglich der Form durchgeführt werden muss. Die Aktive Kontur kann damit als geeignetes Werkzeug für die automatische Bestimmung von Konturpunkten angesehen werden.

Dank

Wir danken dem Team von Aicon 3D Systems GmbH für die vertrauensvolle Zusammenarbeit, die Bereitstellung von Aufnahmen und Ergebnissen, und die Durchführung der Bündeltriangulation.

Literatur

- FUA, P., GRUEN, A. & LI, H., 1999. Optimization-Based Approaches to Feature Extraction from Aerial Images. *Lecture notes of the 1998 International Summer School of the International Association of Geodesy on Data Analysis and the Statistical Foundations of Geomatics*, Springer, 39 p.
- FUA, P., 1995. Parametric Models are Versatile: The Case of Model Based Optimization. *Joint Workshop of WG III/2 International Society of Photogrammetry and Remote Sensing*, ISPRS, Stockholm, Sweden, 18 p.
- GÜLCH, E., 1996. Deformable models as a photogrammetric measurement tool - potential and problems. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, ISPRS, Vienna, Austria, Vol. XXXI, Part 3-WG2, pp. 279-284.
- KASS, M., WITKIN, A., & TERZOPOULUS, D., 1988. Snakes: Active Contour Models. *International Journal of Computer Vision*, 1(1988), pp. 321-331.
- LUHMANN, T., 2003. Nahbereichsphotogrammetrie – Grundlagen, Methoden und Anwendungen, *Herbert Wichmann Verlag*, Heidelberg, 2. Auflage, 586 p.
- STRAUB, B.-M., 2003. Automatische Extraktion von Bäumen aus Fernerkundungsdaten. *Deutsche Geodätische Kommission*, Reihe C, Nr. 572, 100 p.

Realisierung eines aktiven bildbasierten Messsystems zur Messung auf bewegten spiegelnden Oberflächen

CHRISTIAN MULSOW¹

Zusammenfassung: Zur Lösung von Messaufgaben in der experimentellen Hydromechanik wurde am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung (IPF) der TU Dresden in Kooperation mit der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), einem potentiellen Anwender, ein Projekt zur Entwicklung eines Messsystems initiiert, welches die Bestimmung von Oberflächenprofilen auf spiegelnden Oberflächen durch eine Laserlichtschichtprojektion erlaubt. Als zusätzliche Anforderung wurde dabei die Erfassung von dynamischen Veränderungen der Objektoberfläche benannt, da das zu entwickelnde System von der BAW zur Messung von bewegten Wasseroberflächen eingesetzt werden soll.

Als Messprinzip wurde eine Weiterentwicklung auf Basis der optischen Triangulation mit Hilfe einer Laserlichtschicht unter Ausnutzung der Reflektionseigenschaften von Flüssigkeitsoberflächen angewandt. Dabei wird eine Laserlichtschicht auf eine Flüssigkeitsoberfläche gerichtet und nach der Reflektion an der Oberfläche auf zwei hinter einander angeordnete senkrechte Ebenen projiziert. Die projizierten Laserlinien werden durch eine Kamera beobachtet und anschließend detektiert. Die erkannten Linien können subpixelgenau in den Aufnahmen gemessen und die Werte dann durch ein am Institut entwickeltes mathematisches Modell in Oberflächenhöhen und -neigungen überführt werden. Die Integration eines Schrittmotors zur variablen Einstellung der Laserebenenneigung ermöglicht zum einem die effiziente Kalibrierung des Gesamtsystems und zum anderen die sequentielle Messung von mehreren Profilen bei gleich bleibender Position des Messsystems. Die erfassbare zeitliche Dynamik der Oberflächenänderung ist dabei nur durch die Aufnahmezeit der Kamera begrenzt.

Der Beitrag stellt das Grundprinzip der Messmethode, die geometrische Modellierung sowie einen darauf basierenden Ansatz zur strengen Kalibrierung des Systems vor.

1 Einleitung

Bei der Projektierung von flussbaulichen Maßnahmen ist die Verwendung von physikalischen Modellen zur Lösung von vielschichtigen Fragestellungen eine weit verbreitete und häufig angewandte Methode (ATV-DVWK 2003; BLOCK, 1936). Zwar erfuhr die theoretische Analyse hydromechanischer Phänomene in mathematischen Modellen durch die Fortschritte in der Computertechnik und den großen Wissensstand einen gewaltigen Bedeutungszuwachs, jedoch ist die experimentelle Untersuchung in Modellaufbauten meist unumgänglich (GODDING et al., 2003). Als eine wichtige Messgröße zur Erfassung von hydromechanischen Vorgängen im Modell kann die Wasserspiegellage benannt werden. Deren Bestimmung erfolgt in der Regel punktuell über Messung an Pegeln. Dabei kommen die unterschiedlichsten Methoden zum Einsatz, wie z.B. die Beobachtung der Vertikalbewegung eines Schwimmers oder die Wasserstandsmessung in mit dem eigentlichen Wasservolumen über Röhren kommunizierenden Zylindern mittels Ultraschall (Laufzeitverfahren). Diese Verfahren sind jedoch hinsichtlich ihrer zeitlichen sowie räumlichen Auflösung begrenzt und beeinflussen zudem die hydromechanische Dynamik des Modells (siehe auch Mulsow et al.,

¹ Dipl. Ing. Christian Mulsow, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, Technische Universität Dresden, Helmholtzstraße 10, 01069 Dresden, e-mail: Christian.Mulsow@mailbox.tu-dresden.de

2005). Die Unzulänglichkeiten der derzeit etablierten Verfahren bedingen den anwenderseitigen Bedarf nach einem Messsystem, welches die flächenhafte sowie zeitlich hoch aufgelöste Bestimmung der Wasserspiegellage ermöglicht. Bei diesem zu entwickelnden System ist ein hoher Automatisierungsgrad anzustreben und zudem eine Beeinflussung des Modells auszuschließen. Aus diesen Anforderungen heraus bot sich die Photogrammetrie als Lösungsgeber für berührungslos messende Systeme geradezu an. Daher wurde im Rahmen der Kooperation des Instituts für Photogrammetrie und Fernerkundung (IPF) der TU Dresden mit der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) ein Projekt zur Entwicklung und Verifikation eines Systems initiiert, welches den oben genannten Anforderungen weitestgehend gerecht werden soll.



Abb. 1: Physische Modelle von Flussläufen und Bauwerken (Quelle: BAW).

2 Messprinzip

Die Bestimmung von Wasseroberflächen kann nicht mit herkömmlichen Oberflächenmessmethoden der Photogrammetrie erfolgen, da diese meist diffus reflektierende Objektoberflächen voraussetzen. Diese, im ersten Eindruck eher hinderlich erscheinenden, spiegelnden Eigenschaften von Flüssigkeitsoberflächen können jedoch dahingehend genutzt werden, das Messprinzip der optischen Triangulation auf Basis einer Laserlichtschicht in geeigneter Weise zu adaptieren und damit die Lösung der Messaufgabe zu erreichen (MAAS et al., 2003).

Wie bei der herkömmlichen Formerfassung von Objektoberflächen mittels Laserlichtschicht und Kamera/s wird im vom IPF entwickelten System auf die Oberfläche der Flüssigkeit eine Laserlichtschicht projiziert. Da auf Grund der Reflexions- und Transmissionseigenschaften von Flüssigkeiten keine auswertbare Laserlinie auf der Oberfläche beobachtet werden kann, wird diese Schnittlinie zwischen Objektoberfläche und Laserlichtschicht indirekt über die Reflexion und Projektion auf eine vertikal zur Oberfläche orientierten Ebene visualisiert (siehe Abb.2).

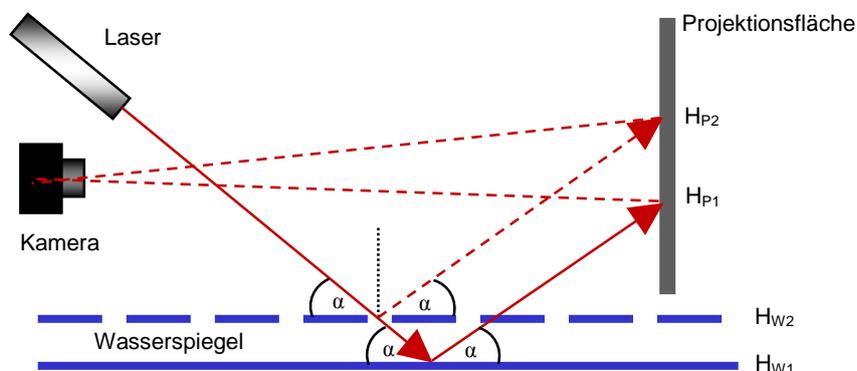


Abb. 2: Optische Triangulation mittels einer Projektionsfläche.

Die resultierende Laserlinie kann durch eine Kamera beobachtet und damit Änderungen der Flüssigkeitsspiegelhöhe gemessen werden. Praktische Untersuchungen haben die grundsätzliche Eignung der Methode bestätigt und zeugen von einem hohen Genauigkeitspotential (MAAS et al., 2003). Es wurden unter Verwendung einer 1000 x 768 Pixelkamera und einer aufgenommenen Profilbreite von 70cm Genauigkeiten von 0.03 mm bei der Bestimmung von Füllhöhenunterschieden erreicht.

Das Verfahren bedingt jedoch eine ruhende Wasseroberfläche, da ansonsten die Höhenänderungen der aufprojizierten Laserlinie nicht direkt mit den Flüssigkeitsspiegelhöhen korrelieren, sondern zusätzlich die Oberflächenneigung die Ergebnisse beeinflusst (siehe Abb.3).

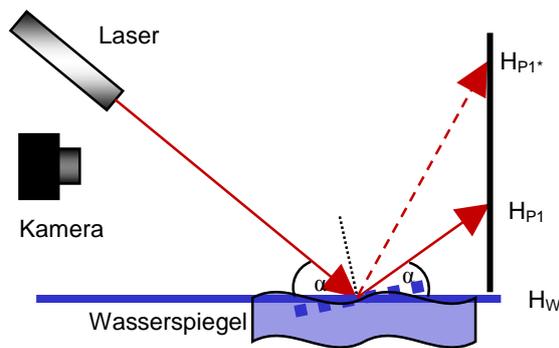


Abb. 3: Einfluss von Wellenbewegungen auf die Reflektionsrichtung einer Laserschicht.

Diese Bedingung ist in den seltensten Fällen in experimentellen Untersuchungen gegeben, so dass eine Modifizierung der Auswertung und des Systemaufbaus unumgänglich ist. Zur Kompensation kleiner, gleichmäßiger Wellen kann die Auswertung dahingehend geändert werden, dass die aufprojizierte Laserlinie nicht in Einzelbildern sondern in akkumulierten Bildsequenzen (siehe Abb.4) beobachtet wird (MULSOW et al., 2005). Dadurch konnte zwar eine signifikante Genauigkeitssteigerung (Faktor 6) gegenüber der Einzelbildauswertung bewirkt werden, jedoch ist die Güte der Höhenbestimmung gegenüber der Messung auf ruhenden Oberflächen noch immer um den Faktor 3 niedriger.

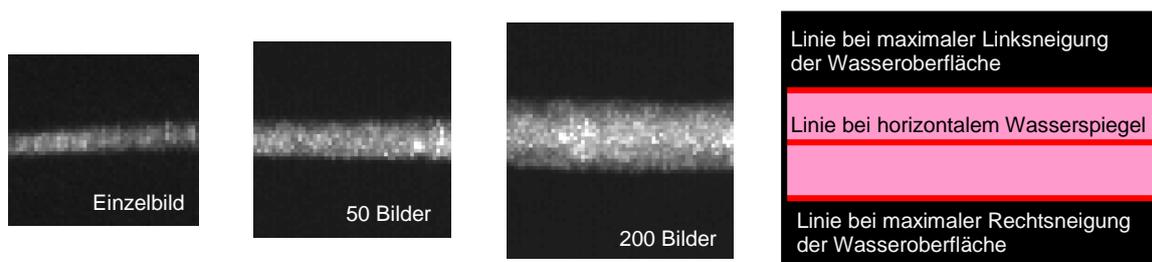


Abb. 4: Ergebnisbilder der Akkumulation über verschieden lange Bildsequenzen.

Vollständige Abhilfe der Wellenproblematik verspricht das Einfügen einer zweiten Projektionsebene in den Systemaufbau, womit eine strenge geometrische Lösung der Oberflächenbestimmung ermöglicht wird (siehe Abb.5). Die reflektierte Laserschicht kann nun vollständig rekonstruiert und diese dann zur Ermittlung des Flüssigkeitsprofils mit der aufprojizierten Laserschicht verschnitten werden. Neben den Höhenwerten lassen sich ebenfalls die Ebenennormalen der Flüssigkeitsoberfläche in den jeweiligen Profilverpunkten aus den Messwerten ableiten. Elementare Voraussetzungen sind dabei das Wissen um die räumlichen Beziehungen zwischen den einzelnen Systemelementen untereinander (Projektionsflächen & Laserschicht) und einer Referenzfläche (Flüssigkeitsspiegel in Ausgangslage).

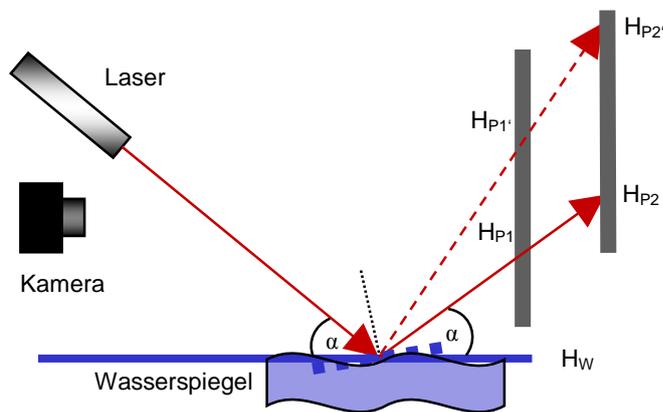


Abb. 5: Zwei-Ebenensystem (Prinzip).

3 Systemaufbau

In der Entwicklungsphase stellte sich die geeignete technische Ausführung der Projektionsfläche (gleichzeitige Abbildung der Lichtschicht ohne deren Beeinflussung) als Grundproblem dar. Die Verwendung einer semitransparenten Platte als vordere Projektionsfläche wurde verworfen, da diese mit einer Beeinflussung der Laserlichtschicht (Brechung, Beugung sowie Abschwächung) einhergeht. Daher wurde die vordere Projektionsebene nicht durchgehend, sondern als rechenförmige durchbrochene Fläche gestaltet (siehe Abb. 6). Ein Teil der Laserschicht wird durch die Ebenenteile aufgefangen, der andere Teil hingegen passiert unbeeinflusst die vordere Ebene und wird auf der hinteren Projektionsfläche abgebildet.

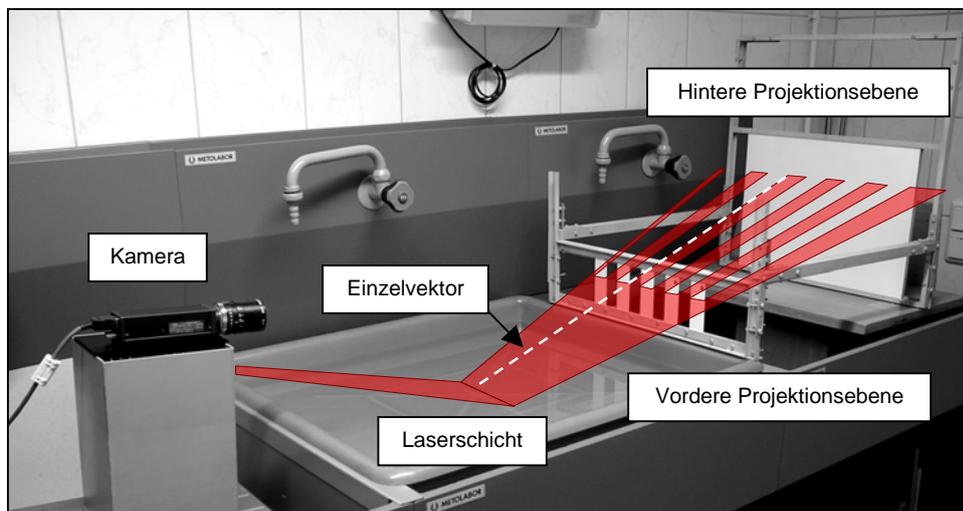


Abb. 6: Systemaufbau ohne Schrittmotor.

Auf eine vollständige Projektion der Laserschicht auf beide Ebenen wurde verzichtet und damit die komplette Bestimmung des Wasserprofils aufgegeben. Stattdessen wird das Profil durch die Schnittpunkte der Verbindungsvektoren zwischen den korrespondierenden Endpunkten der jeweiligen Laserlinien (auf der vorderen und hinteren Projektionsebene) und der projizierten Laserschicht repräsentiert.

Diese Diskretisierung löst ebenfalls Problematiken, welche bei der ausschließlich Linienhaften Auswertung entstehen würden, da hier nicht Vektoren sondern eine Fläche mit der aufprojizierten Laserebene verschnitten werden müsste. Eine mathematische Beschreibung der durch die Reflektion an der bewegten Flüssigkeitsoberfläche deformierten Laserebene jedoch

wäre sehr komplex, wenn nicht gar unmöglich, und damit die Schnittlinienberechnung der aufprojizierten mit der reflektierten Laserlichtschicht nicht ohne weiteres durchführbar. Der Punktabstand der Diskretisierung des Flüssigkeitsprofils hängt von der Breite und dem Abstand der vorderen Ebenenfelder ab. Diese Parameter sollten so gewählt werden, dass eine Überlagerung von Projektionen auf der hinteren Projektionsebene bei lateralen Wasserwellen ausgeschlossen ist.

Die Bildaufnahme erfolgt durch eine Firewire- Kamera vom Typ Sony XC700. Als Projektionseinheit dient ein Diodenlaser mit einer Leistung von 35mW mit einer vorgesetzten Powel-linse (Öffnungswinkel 45°), welche die Erzeugung einer weitestgehend homogenen Lichtschicht ermöglicht.

Als zusätzliche Komponente wurde ein Schrittmotor in das System integriert, an welchem die Lasereinheit befestigt ist. Diese Kombination erlaubt die variable Einstellung des Anstellwinkels der Laserebene und damit die sequentielle Messung von mehreren parallelen Profilen, ohne dabei die Position der Messeinheit zu verändern (siehe Abb.5).

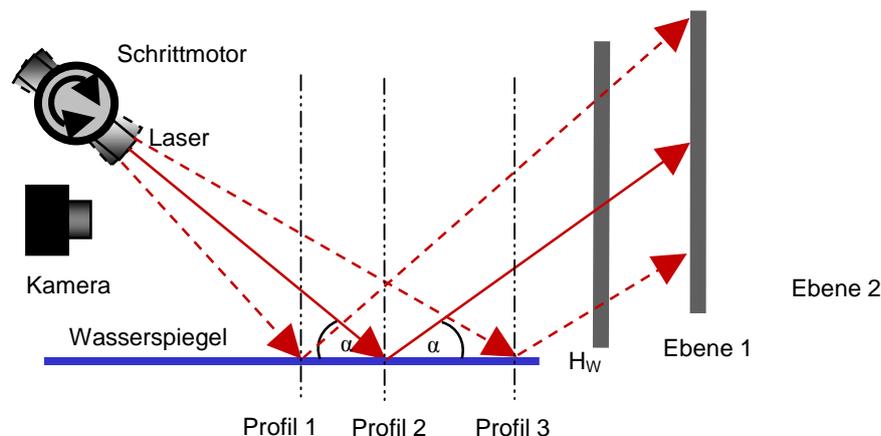


Abb. 5: Zwei-Ebenen-System mit Schrittmotor.

4 Kalibrierung

Die Kalibrierung eines derartigen Systems ist im Gegensatz zum Ein-Ebenen-System (siehe auch (Mulsow, 2005)) sehr komplex und beinhaltet, wie oben bereits erwähnt, die Bestimmung einer Reihe von Parametern, wie die Laserebenenlage, die Lage der Projektionsflächen und den Bezug des Systems zur Wasseroberfläche in Ruhelage. Die mathematische Modellierung der Vorgänge ist eine Grundlage für die Entwicklung einer Kalibrierstrategie und soll im folgenden Abschnitt näher beleuchtet werden.

4.1 Modellierung

Die direkte Projektion der Laserlichtschicht auf die vertikalen Flächen kann mit der allgemeinen Gleichung für die Zentralprojektion beschrieben werden:

$$X = X_0 + \lambda \cdot R \cdot x \rightarrow \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} + \lambda \cdot \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad \text{mit} \quad \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x' - x'_H \\ x' - y'_H \\ z \end{bmatrix} \quad (1)$$

Das Projektionszentrum X_0 wird mit dem Ursprung der fächerförmigen Lichtebene im Lasermodul gleichgesetzt. Zusätzlich wird angenommen, dass sich der Ursprung der Laserlichtebene auf der Drehachse des Rotmotors befindet und die Ebenennormale senkrecht zur Rotationsachse orientiert ist. Das Projektionszentrum und die korrespondierenden Endpunkte der Liniensegmente auf der hintern bzw. vorderen Vertikalebene liegen auf einer Linie und spannen in der Gesamtheit ein ebenes Strahlenbündel auf.

Die auf der hinteren Projektionsfläche gemessenen Endpunkte der Liniensegmente werden im X - Vektor angegeben. Da es sich um eine Ebene handelt und das übergeordnete Koordinatensystem terrestrisch orientiert werden soll, wird dem Y -Wert stets der Wert 0 zugewiesen. Die X -Achse verläuft waagrecht und demnach die Z -Achse senkrecht. Zusätzlich wird auf der hinteren Ebene ein Ursprung festgelegt, womit die Elemente der hinteren Ebene das übergeordnete System festlegen. Die Koordinaten des Projektionszentrums beziehen sich also auf die hintere Vertikalebene.

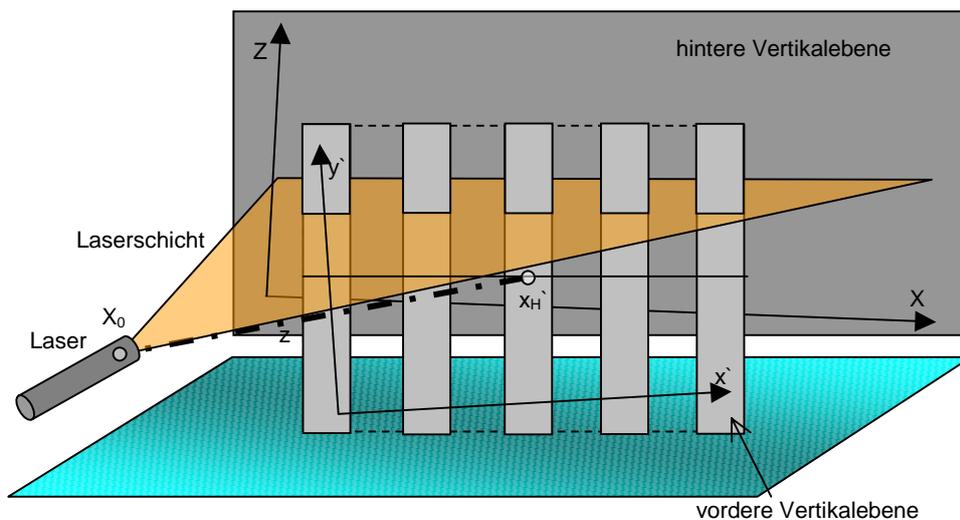


Abb. 6: Direkte Projektion; Modellbeschreibung des Zwei-Ebenensystems mit Schritt看.

Die auf der vorderen Ebene gemessenen Punkte werden in (1) im x -Vektor angegeben. Wie bei der Festlegung des Kamerakoordinatensystems in der Photogrammetrie werden das Ebenensystem durch die x,y -Ebene und den Durchstoßpunkt der von dem Projektionszentrum ausgehenden Lotrechten bestimmt. Der Parameter z steht hier für den Abstand zwischen Projektionszentrum und x,y -Ebene. Die Rotationsmatrix R beschreibt die Orientierung zwischen der hinteren und vorderen Vertikalebene.

Die mathematische Darstellung der indirekten Projektion kann aus (1) wie folgt abgeleitet werden:

$$X = X_{\text{virt}} + \lambda \cdot R \cdot x \rightarrow \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} - 2d \cdot \begin{bmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{bmatrix} + \lambda \cdot \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (2)$$

Mit den zusätzlichen Parametern in (2) wird das Rotationszentrum an der Flüssigkeitsoberfläche gespiegelt und damit ein virtuelles Rotationszentrum X_{virt} geschaffen (siehe Abb.7). Der Vektor n beschreibt dabei die Ebenennormale und der Parameter d den Abstand des Rotationszentrums X_0 von der Flüssigkeitsoberfläche. Virtuelles Projektionszentrum und die korrespondierenden Endpunkte der Liniensegmente auf der hintern bzw. vorderen Vertikalebene liegen hier ebenfalls auf einer Linie und spannen in der Gesamtheit das an der Flüssigkeitsoberfläche reflektierte Strahlenbündel auf.

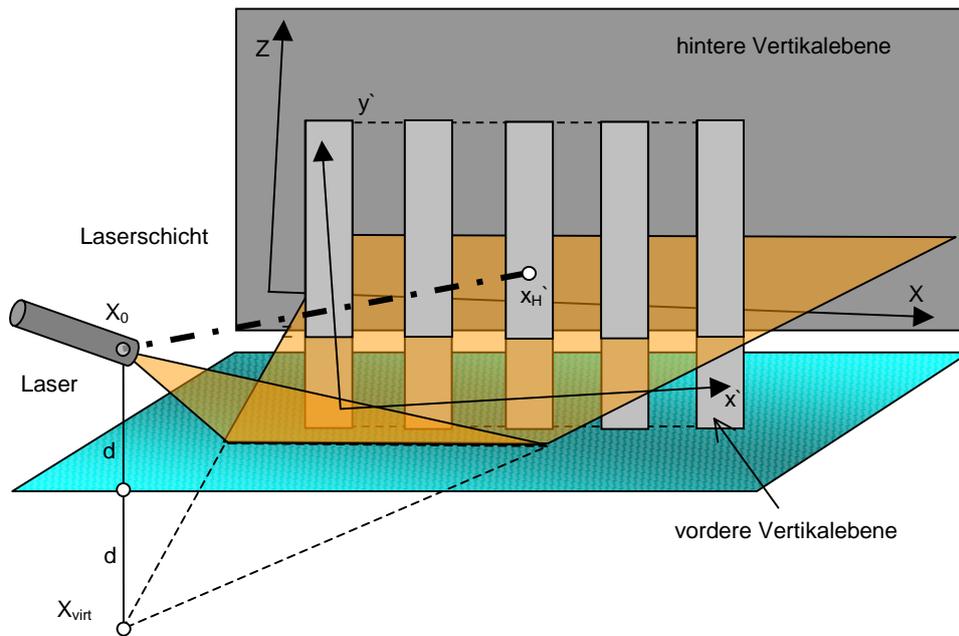


Abb. 7: Indirekte Projektion; Modellbeschreibung des Zwei-Ebenen-Systems mit Schrittmotor.

Die Kamera wird nicht in das mathematische Modell integriert, da diese ausschließlich die Liniensegmente an der vorderen bzw. hinteren Ebene beobachtet und die Positionen der Linieneckpunkte separat in die Ebenen-Systeme überführt werden.

Die oben getroffene Annahme, dass sich der Ursprung der Laserlichtebene auf der Drehachse des Rotmotors befindet und die Ebenennormale senkrecht zur Rotationsachse steht, lässt sich sicherlich nicht hundertprozentig in die technische Realisierung überführen. Eine Modellierung etwaiger Abweichungen ist jedoch möglich und Gegenstand weiterer Arbeiten.

4.2 Datenakquisition

Die Datenakquisition besteht in der Aufnahme von Bildsequenzen bei unterschiedlichem Anstellwinkel der Laserlichtebene und ruhendem Flüssigkeitsspiegel. Die Bildaufnahmen dienen der Beobachtung der Liniensegmente auf den Vertikalflächen bei direkter und indirekter Projektion. Die Änderung des Anstellwinkels durch den Schrittmotor kann zusätzlich über einen Winkelencoder mit einer Genauigkeit von 0.001° erfasst werden. Die Zuordnung zwischen den jeweiligen Bildaufnahmen und den entsprechenden Anstellwinkeln wird über die Nummerierung der Bilder realisiert.

4.3 Parameterbestimmung

Die rechnerische Bestimmung der numerischen Werte für die Parameter kann über eine vermittelnde Ausgleichung im Gauß-Markow-Modell (GMM) erfolgen. Die Aufstellung der Beobachtungsgleichungen lässt sich aus den Modellierungen (1) und (2) ableiten. Für den Fall der direkten Projektion sind die Beobachtungsgleichungen analog zu den bekannten Kollinearitätsgleichungen der Photogrammetrie. Die Gleichungen für die indirekte Projektion kann aus den Kollinearitätsgleichungen wie folgt abgeleitet werden:

$$x' = x'_H + z \cdot \frac{r_{11} \cdot (X - X_0 + 2d \cdot n_x) + r_{21} \cdot (Y - Y_0 + 2d \cdot n_y) + r_{31} \cdot (Z - Z_0 + 2d \cdot n_z)}{r_{13} \cdot (X - X_0 + 2d \cdot n_x) + r_{23} \cdot (Y - Y_0 + 2d \cdot n_y) + r_{33} \cdot (Z - Z_0 + 2d \cdot n_z)}$$

$$y' = y'_H + z \cdot \frac{r_{12} \cdot (X - X_0 + 2d \cdot n_x) + r_{22} \cdot (Y - Y_0 + 2d \cdot n_y) + r_{32} \cdot (Z - Z_0 + 2d \cdot n_z)}{r_{13} \cdot (X - X_0 + 2d \cdot n_x) + r_{23} \cdot (Y - Y_0 + 2d \cdot n_y) + r_{33} \cdot (Z - Z_0 + 2d \cdot n_z)} \quad (3)$$

Zusätzliche Beobachtungsgleichungen könnten für die erfassten Winkel zwischen den unterschiedlich geneigten Ebenen aufgestellt werden. Als zusätzliche Restriktion wäre ebenfalls der Ebenenzwang für beobachtete Linienpunkte gleichen Laserlichtschicht-Anstellwinkels in die Ausgleichung integrierbar.

Aus den in der Ausgleichung bestimmten Parameterwerten lassen sich alle für die eigentliche Messung notwendigen Größen ableiten, wie die Lage und die Orientierung der Laserlichtebene in Abhängigkeit eines bestimmten Einstellwinkels des Schrittmotors, sowie die Position der Vertikalflächen und damit die Grundlage für die Überführung von 2D-Beobachtungen der Linienendpunkte in 3D- Koordinaten für die Vektorrekonstruktion.

5 Fazit

Das vorgestellte Messsystem zeigt, dass das Prinzip der optischen Triangulation für die Erfassung von spiegelnden Oberflächen adaptiert werden kann. Es bedarf dazu Modifizierungen im Aufbau und in der Auswertung. Erste Untersuchungen haben den Nachweis der prinzipiellen Eignung der Methode zur Messung von Flüssigkeitsoberflächen erbracht. Jedoch wurden auch die Grenzen des Verfahrens aufgezeigt, welche eine Weiterentwicklung der Auswertestrategien und des Systemaufbaus erforderten. Die vorgestellte strenge Lösung der Problematiken bei der Messung von bewegten Flüssigkeitsoberflächen ist in der Theorie entwickelt und eine geeignete Kalibrierstrategie für das konzipierte System bereits abgeleitet worden. Nun bedarf es im Weiteren der praktischen Verifikation des Kalibrierkonzepts und der Untersuchung der Leistungsfähigkeit des Systems im Rahmen einer konkreten Messaufgabe.

Literaturverzeichnis

- ATV-DVWK, 2003: Feststofftransportmodelle für Fließgewässer. In: ATV-DVWK-Arbeitsgruppe WW-2.4, März 2004
- BLOCK, W., 1936: Die Photogrammetrie im Dienste des Wasserbaus, des Schiffbaus und der Meereskunde. In: Bildmessung und Luftbildwesen 2/1936, S. 62-75
- GODDING, G., HENTSCHEL, B. & KAUPPERT, K., 2003: Videometrie im Wasserbaulichen Versuchswesen. In: Wasserwirtschaft WAWI 4/2003, S. 36-40
- MAAS, H.-G., HENTSCHEL, B. & SCHREIBER, F., 2003: An optical triangulation method for height measurements on water surfaces. In: Videometrics VIII (Electronic Imaging 2003), Ed. S. El Hakim, SPIE Proceedings Series Vol. 5013, pp. 103-109
- MAAS, H.-G., MULSOW, C., PUTZE, T. & HENTSCHEL, B., 2005: An optical triangulation method for height measurements on instationary water surfaces. Submitted to Elsevier Science Journal
- MULSOW, C., PUTZE, T., MAAS, H.-G. & HENTSCHEL, B., 2005: Modellierung und Kalibrierung eines optischen Messsystems zur Bestimmung von bewegten Wasserspiegelmodellen. In: Proceedings Oldenburger 3D-Tage 2005, S. 30-37

Untersuchungen zur Nutzung von Bildclustern für die 2D/3D-Auswertung von fast ebenen Aufnahmesituationen aus erhöhten Aufnahmestandpunkten

WERNER TECKLENBURG, RALF JANTOS, THOMAS LUHMANN¹

Zusammenfassung: Bildcluster von einem Aufnahmestandpunkt in verschiedene Aufnahmerichtungen bilden die Grundlage für Panoramaansichten. Diese Aufnahmen können alle, ohne weitere Objektinformation, relativ zueinander orientiert werden, da für alle Bilder die gleichen zentralprojektiven Eigenschaften gelten. In den sich überlappenden Bildbereichen können einfache Matching-Algorithmen für die Messung von Verknüpfungspunkten angesetzt werden.

Auf diesen Eigenschaften beruhend wird im folgenden untersucht, mit welcher Genauigkeit 2D- und 3D-Auswertungen gelingen, wenn nicht für alle Aufnahmen eines Bildclusters exakt der identische Aufnahmestandpunkt (Projektionszentrum) realisiert werden kann. Dies ist beispielsweise der Fall bei erhöhten Aufnahmestandpunkten aus z.B. einem Hubsteiger oder bei Aufnahmen unter Verwendung einer Teleskopstange. Besonders interessant ist dies für Aufnahmesituationen, bei denen quasi ebene Objektbereiche vorliegen, da dann das aus dem Bildcluster ableitbare Panoramabild fehlerfrei generiert werden kann. Erst bei vorhandenen Tiefenunterschieden treten Fehler bei der Erstellung des Panoramabildes auf, und in der Folge auch bei der Nutzung dieser Aufnahmen für eine anschließende 3D-Auswertung. An Hand von zwei Beispielen werden die erreichten Genauigkeiten vorgestellt und diskutiert.

1 Einleitung

Werden von einem festen Aufnahmestandort Bilder in verschiedene Richtungen aufgenommen, so können sie heute mit entsprechender Software zu Panoramen weiterverarbeitet werden. Sind die Abbildungseigenschaften der verwendeten Kamera bekannt, ist es möglich die Panoramen geometrisch exakt aus dem Bildmaterial abzuleiten (LUHMANN & TECKLENBURG, 2002). Dazu ist es notwendig, in den überlappenden Bereichen Verknüpfungspunkte zu bestimmen. Die Bilder besitzen bei exakter Kamerajustierung das gleiche Projektionszentrum, lediglich die Bildebene zeigt in eine andere Richtung. So lassen Matching-Algorithmen auf der Basis der Projektivtransformation für diese Aufgabe einsetzen. Die Bestimmung der Rotationsparameter der Bilder untereinander aus den Verknüpfungspunkten ist ohne weitere Objektinformation möglich.

Ist das abgebildete Objekt eben, so kann auf ein gemeinsames Projektionszentrum für alle Bilder verzichtet werden. Erst wenn Tiefenunterschiede im Objektraum vorhanden, ist für die Erzeugung von exakten Panoramen ein festes Projektionszentrum notwendig. Basierend auf dieser Eigenschaft wird untersucht, mit welcher Genauigkeit 2D- und 3D-Auswertungen gelingen, wenn nicht für alle Aufnahmen eines Panoramas exakt das identische Projektionszentrum realisiert werden kann, der auszuwertende Bereich im Objektraum aber nicht allzu große Tiefenunterschiede aufweist. Der Vorteil der Nutzung solche Bildcluster für die Auswertung liegt darin, die Bilder vor Ort flexibler und schneller durch Nutzung von z.B. Teleskopstangen oder Hubsteigern aufnehmen zu können. Auch die Auswertung gewinnt an

¹ Fachhochschule Oldenburg/Ostfr./Whv., Institut für Angewandte Photogrammetrie und Geoinformatik, Ofener Str. 16, 26121 Oldenburg, Tel. 0441-7708-3243
Dipl.-Ing. Werner Tecklenburg, Tel. -3164, email: tecklenburg@fh-oldenburg.de
Dipl.-Ing. (FH) Ralf Jantos, Tel. -3163, email: ralf_jantos@web.de
Prof. Dr.-Ing. Thomas Luhmann, Tel. -3172, email: luhmann@fh-oldenburg.de

Übersichtlichkeit, da nicht mehr die Einzelaufnahmen, sondern nur wenige daraus abgeleitete Sektorpanoramen genutzt werden können. Im folgenden werden zwei Untersuchungsbeispiele mit unterschiedliche Konfiguration vorgestellt.

2 Photogrammetrische Grundlagen

2.1 Erzeugung von Sektorpanoramen aus Bildclustern

Als erstes ist es notwendig, die Orientierungsdaten der Einzelbilder eines Clusters zu bestimmen, damit im Anschluss aus dieser Information das Panoramabild mittels Mosaiktechnik gewonnen werden kann. Die Grundlage zur Berechnung der Orientierungsdaten bilden die Kollinearitätsgleichungen (1), die Berechnung der Parameter erfolgt in einer Bündelorientierung.

$$\begin{aligned} x' &= x'_0 + z' \cdot \frac{r_{11} \cdot (X - X_0) + r_{21} \cdot (Y - Y_0) + r_{31} \cdot (Z - Z_0)}{r_{13} \cdot (X - X_0) + r_{23} \cdot (Y - Y_0) + r_{33} \cdot (Z - Z_0)} + \Delta x' \\ y' &= y'_0 + z' \cdot \frac{r_{12} \cdot (X - X_0) + r_{22} \cdot (Y - Y_0) + r_{32} \cdot (Z - Z_0)}{r_{13} \cdot (X - X_0) + r_{23} \cdot (Y - Y_0) + r_{33} \cdot (Z - Z_0)} + \Delta y' \end{aligned} \quad (1)$$

Bedingungen für Bild 1 (2)

$$X_0 = 0; Y_0 = 0; Z_0 = c; \varpi = \text{predef.}; \varphi = \text{predef.}; \chi = \text{predef.}$$

Bedingungen für alle Objektpunkte

$$Z_i = 0; \text{ für } i = 1 \dots n$$

Die Objektkoordinaten der Verknüpfungspunkte liegen in der Ebene, in der das Sektorpanorama entstehen soll. Diese sind zunächst unbekannt, die Ebene kann als horizontale Ebene in einem lokalen 3D-Koordinatensystem angesehen werden. Da auch die Orientierungsparameter der Bilder in Bezug zu dieser Ebene nicht bekannt sind, müssen die 7 Freiheitsgrade einer freien Netzausgleichung durch Bedingungen erfüllt werden. Diese ergeben sich dadurch, dass z.B. die Orientierungsparameter des ersten Bildes vordefiniert und festgesetzt werden. Für X_0 und Y_0 werden die Koordinaten 0, für Z_0 die Kamerakonstante c genutzt. Setzt man beim Resampling des Panoramas die Auflösung gleich der Pixelgröße der Kamera, wird ein möglicher Informationsverlust im erzeugten Bild vermieden. Die Rotationsparameter werden ebenfalls vordefiniert. Bei Bildclustern sollten sie i.d.R. Null sein. Für Rundumpanoramen von einem Teleskopstab aus wird für ω der Neigungswinkel der Kamera angenommen. Zusätzlich wird die Bedingung eingeführt, dass die Objektkoordinaten der Verknüpfungspunkte Teil der Ebene sind (2). Im weiteren ist von kalibrierten Kameras ausgegangen worden. Eine Online-Kalibrierung ist nur bei entsprechend vielen Verknüpfungspunkten und entsprechendem Mehraufwand möglich.

Die aus der Bündelorientierung erhaltenen Ergebnisse für die Orientierungen der einzelnen Bilder werden genutzt, um mit herkömmlichen Mosaiktechniken das rechteckige Panoramabild (im weiteren Sektorpanorama genannt) zu erhalten. Man erhält durch die Angaben der Bildgrenzen das Bildkoordinatensystem und gleichzeitig die zugehörigen Daten der Inneren Orientierung. Unter Verwendung von (2) erhält man für den Bildhauptpunkt (0,0) und für die Kamerakonstante (Z_0). Es muss beachtet werden, dass jedes Sektorpanorama einen eigene Innere Orientierung besitzt.

2.2 Orientierung und Auswertung von Sektorpanoramen

Da die unter 2.1 beschriebenen Arbeitsschritte jeweils Bilder mit Innerer Orientierung erzeugen, werden an die weitere Auswertesoftware keine speziellen Anforderungen gestellt. Die äußere Orientierung der Bilder wird entweder durch Messung von Passpunkten und anschließender Rückwärtsschnittberechnung erzeugt, oder aber wieder durch Messung von Verknüpfungs- und Passpunkten mit nachfolgender Bündelorientierung. Hierbei ist auch eine Systemfestlegung nach der 3-2-1-Methode möglich. In den im weiteren dargestellten Beispielen wurden die Programme Phidias und StereoMess verwendet.

3 Anwendungsbeispiele, Genauigkeitsbetrachtungen

3.1 Bildcluster aus Hubsteiger

3.1.1 Aufnahmesituation, Bildaufnahme

Eine Grabungsstätte bei der Ruine eines Zisterzienserklosters in Ihlow (Landkreis Aurich, Niedersachsen) sollte photogrammetrisch erfasst werden. Von dieser Ruine ist oberirdisch nichts mehr vorhanden, nur die Fundamentsockel konnten noch freigelegt werden. Abb. 1 und Abb. 2 zeigen die Grabungsstätte, die nur einen ca. 25m x 15m großen Teil des gesamten Fundamentes freilegt.

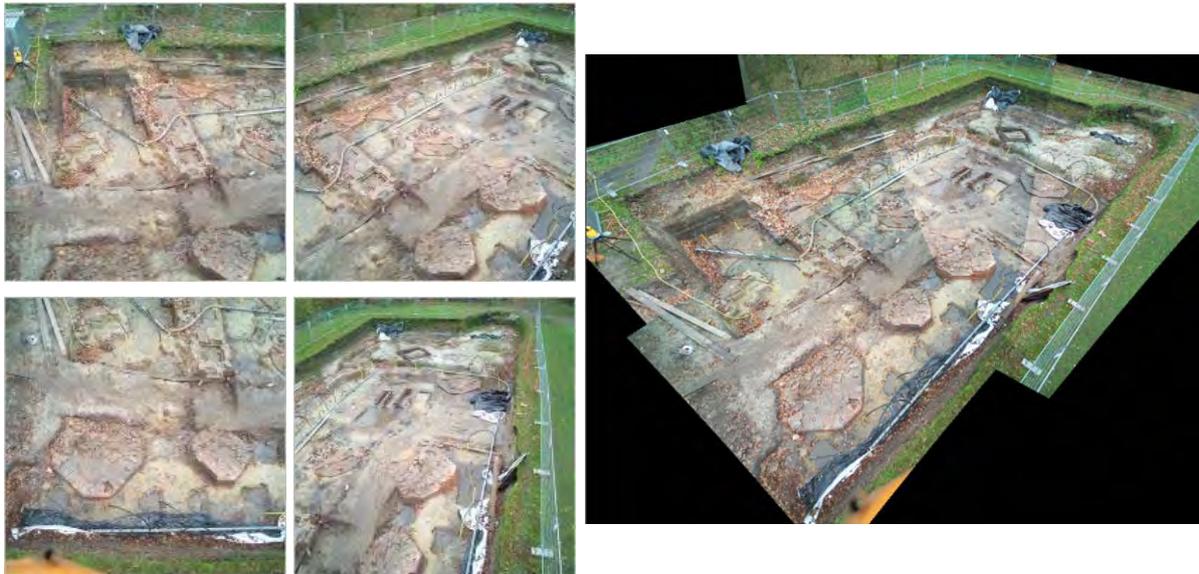


Abb. 1: Einzelbilder Grabungsstätte Ihlow

Abb. 2: Clusterpanorama

Von 7 verschiedenen Hubsteigerpositionen wurden insgesamt 40 Bilder mit der Kodak DCS 645 aufgenommen. Die Kamera war mit einem 35mm Objektiv und Kugelkopfstativ ausgestattet und vorab an einem Testfeld kalibriert worden. Die Differenzen für die Aufnahmeorte pro Cluster können mit ca. 0.2m angegeben werden. Die Aufnahmehöhe betrug ca. 10-12m. In der Grabungsstätte weisen die interessierenden Objekte Höhenunterschiede von ca. 0.5-0.8m auf (Abb. 3). Im gesamten Grabungsgebiet wurden 25 Passpunkte gelegt und tachymetrisch vermessen (Abb. 4, Abb. 5).

3.1.2 Erstellung der Panoramen

In der Regel wurden 4 bis 6 Aufnahmen eines Clusters genutzt um ein Sektorpanorama zu

erzeugen. Jedes Bild enthält ca. 10 Verknüpfungspunkte, die unabhängig von den Passpunkten gemessen wurden. Bei der Berechnung der Orientierungsparameter der Bilder bezogen auf die Sektorebene traten durchschnittliche Fehler von ca. 2-3 Pixel auf. Die Verknüpfungspunkte wurden alle innerhalb des Grabungsgebietes gelegt. An den höher gelegenen Grasflächen am Rand des Gebietes treten kleinere Versätze an den Schnittkanten des Sektorpanoramas auf. Ursächlich ist dafür die Kombination von sich leicht verändernden Aufnahmeorten und Objekten außerhalb der verwendeten Sektorebene (Abb. 6)



Abb. 3: Aufnahmesituation vor Ort



Abb. 4: Passpunktmarkierung



Abb. 5: Passpunktverteilung



Abb. 6: Schnittkantenfehler

3.1.3 Auswertung, Ergebnisse der Untersuchung

Nach der Erzeugung der Sektorpanoramen wurde eine Bündelorientierung durchgeführt. Hierzu wurden alle Passpunkte in den Panoramen gemessen. Die Ausgleichung selbst erfolgte als freies Netz mit den tachymetrisch gemessenen Punkten als Datumspunkte, so dass kein Zwang von der Tachymeteraufnahme auf die Auswertung ausgeübt wird. Die tachymetrisch gemessenen Punkte liegen mit einer Genauigkeit von $\pm 1\text{cm}$ vor. Aus der Bündelorientierung sind die Punkte mit einer Genauigkeit von $\pm 0.5\text{cm}$ bestimmt worden. Der Vergleich untereinander bestätigt diese Ergebnisse (Tab. 1). Die Genauigkeit in Z ist insgesamt besser als die der Lagekoordinaten. Die Ursache hierfür liegt in extrem großen Bildwinkeln der Panoramen.

Betrachtet man die Punkte oberhalb der Grabungsstätte auf der Grasnarbe liegend (Abb. 5), so wird deutlich dass die Genauigkeit abfällt. Der Einfluss der nicht streng identischen Aufnahmestandorte macht sich hier stärker bemerkbar. Insgesamt lässt sich feststellen, dass sich bei einer Aufnahmekonfiguration wie in diesem Fall Genauigkeiten von ca. 1cm problemlos erreichen lassen.

Tab. 1: Abweichung der Punkte Klosterruine [m]

	X	Y	Z		X	Y	Z
Min	-0.025	-0.010	-0.006	Min	-0.038	-0.040	-0.020
Max	0.018	0.010	0.006	Max	0.044	-0.004	0.018
Standardabw	0.011	0.005	0.004	Standardabw	0.047	0.019	0.022
Punkte im Grabungsbereich				Punkte 2m oberhalb auf Grasnarbe			

3.2 Bildcluster mit dem Teleskopstab

3.2.1 Aufnahmesituation, Bildaufnahme

Bei einer Aufnahmesituation wie sie z.B. bei Verkehrsunfällen vorkommt, kann es notwendig sein, die Bilder recht schnell aufzunehmen. Hierbei sind erhöhte Aufnahmeorte sinnvoll, da sonst extreme Schrägaufnahmen entstehen, die bei der Auswertung zu schlechten Schnittkonfigurationen und somit zu schlechten Auswertergebnissen führen. Die Idee ist hier ebenfalls die vorgestellte Methode zur Erzeugung von Bildern aus Clustern zu nutzen. Zu diesem Zweck wird die Kamera auf einen Teleskopstab montiert, der in unseren Fall ca. 5m lang ist.



Abb. 7: Fuji MX-2900



Abb. 8: Fernauslöser (10m)

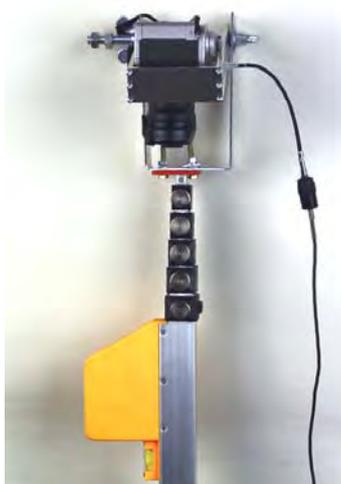


Abb. 9: Teleskopstab mit Kameraadapter



Abb. 10: Bildaufnahme

Bei der Kamera handelt sich hier um eine Fuji MX2900 mit einer Auflösung von 1800x1200 Pixel, die verwendete Brennweite beträgt 7.4mm (Abb. 7). Die Kamera wird schräg und um 90° gedreht angebracht, damit die eine Seite des Bildfeldes noch senkrecht nach unten schaut. Das Projektionszentrum der Kamera liegt ca. 8cm außerhalb der Drehachse des Teleskopstabes. Die Bilder für ein Rundum-Panorama werden in 30°-Schritten aufgenommen. Der Verschluss der Kamera wird mechanisch per Luftdruck ausgelöst (Abb. 8). Bei entsprechender Konstruktion der Kamerahalterung hat das den Vorteil, beliebige Kamertypen für diese Aufgabe einsetzen zu können, ein Laptop oder anderes Steuergerät ist nicht notwendig (Abb. 9).

Als Versuchsgebiet wurde auf dem Hof vor dem Gebäude des IAPG ein Fläche von ca. 12m x 12m mit entsprechenden Passpunkten versehen und tachymetrisch vermessen. Bei der Aufnahme der Bilder wurde kein besonderer Wert auf exaktes Geradestellen der Teleskopstange gelegt, d.h. sie wurde einfach ohne weitere Verstrebung handgeführt. Dies simuliert den Fall wenn nur wenig Zeit vor Ort ist. Die 3 Aufstellungen mit jeweils 12 Aufnahmen haben inklusive Kameramontage weniger als 10 Minuten beansprucht. Für die Genauigkeitsuntersuchungen wurden 25 Punkte auf der Pflasterung des Hofes vermarkt und mit einem Tachymeter mehrfach vermessen. Diese Fläche besteht aus zwei Teilflächen, die zur Mitte hin zum Zweck der Oberflächenentwässerung geneigt sind. Der maximale Höhenunterschied beträgt 0.25m. Um Genauigkeitsaussagen zu Punkten außerhalb der Ebene zu erhalten, wurden zusätzlich drei Hochpunkte und drei Nivellierlatten aufgebaut (Abb. 10).

3.2.2 Erstellung der Panoramen

Grundlage der Sektorpanoramaerstellung sind wieder gemessene Verknüpfungspunkte. Anders als bei der Grabungsstätte in Ihlow darf hier nicht ein Bild mit den Rotationswinkeln 0 angenommen werden, es besteht sonst die Gefahr, dass andere Bilder den Horizont scheiden und man erhält unnötig große Panoramen.

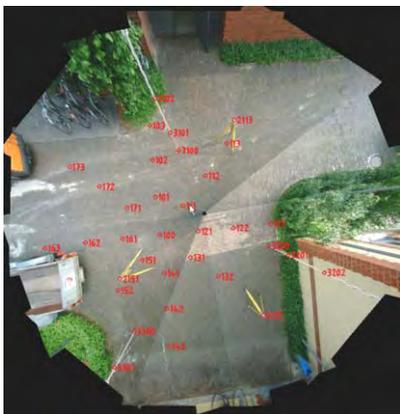


Abb. 11: Sektorpanorama mit Passpunkten



Abb. 12: Schnittkantenfehler

Hier ist es sinnvoll, den tatsächlichen Neigungswinkel der Kamera am Teleskopstab einzuführen. Trotz größerer Schwankungen der Kamera kam es bei der Berechnung der Orientierungsdaten nur zu Restklaffungen von bis zu 1.5 Pixel in den Verknüpfungspunkten. Dies liegt in einer fast idealen Ebene (gepflasterte Parkfläche). An den Bildrändern und in den Bildbereichen, die höher gelegene Objekte zeigen, können größere Differenzen wahrgenommen werden. Ein Beispiel ist in Abb. 12 zu sehen.

3.2.3 Auswertung, Ergebnisse der Untersuchung

In den drei erzeugten Panoramen wurden die markierten Punkte gemessen und anschließend

eine Bündelorientierung mit freier Netzausgleichung durchgeführt. Als Datumpunkte wurden die tachymetrisch vermessenen Punkte verwendet, die Hochpunkte und Punkte an den Nivellierlatten dienten als Neupunkte.

Die Punkte aus den Tachymetermessungen sind durch Mehrfachmessung überprüft und liegen in einer Genauigkeit von $\pm 0.5\text{cm}$ vor. Die Abweichungen in Tab. 2 sind auf die Schwankungen des Teleskopstabes in Kombination mit der Unebenheit der gepflasterten Fläche zurückzuführen. Insgesamt zeigen die erreichten Genauigkeiten aber, dass selbst bei größeren Schwankungen des Teleskopstabes brauchbare Ergebnisse bei 3D-Auswertungen zu erzielen sind und ebenso bei reiner 2D-Auswertung. Die nachträgliche Berechnung der äußeren Orientierungen der Einzelbilder in einem herkömmlichen Bildverband ergaben Schwankungen von bis zu 0.38m (!) für die Projektionszentren innerhalb eines Bildclusters.

Die großen Schwankungen machen sich bei den Hochpunkten deutlich bemerkbar. Wie schon bei der Auswertung von der Grabungsstätte Ihlow werden die größten Abweichungen in X und Y sichtbar (Tab. 3). Auch hier liegt die Begründung in den extrem großen Bildwinkel der Panoramen.

Tab. 2: Abweichung der Bodenpunkte [m]

	X	Y	Z
Minimum	-0.014	-0.019	-0.017
Maximum	0.025	0.010	0.020
Standardabw.	0.009	0.008	0.014

Tab. 3: Abweichungen der Hochpunkte [m]

	X	Y	Z
HP1	-0.012	-0.005	0.010
HP2	-0.037	0.024	-0.001
HP3	-0.002	0.046	-0.004

An den Nivellierlatten wurden jeweils im Abstand von 1m Punkte gemessen. Die Abweichungen in der Vertikalen sind mit denen der Hochpunkte vergleichbar.

Tab. 4: Abweichung Z an den Nivellierlatten [m]

Abw. in Z	(1.00m)	(2.00m)
NivL1	0.039	0.049
NivL2	-0.009	-0.011
NivL3	-0.001	

Da die Latten lotrecht gestellt waren, können auch die Abweichungen der an ihnen gemessenen Punkte in der Horizontalen für die Genauigkeitsbetrachtung verwendet werden. (Tab. 5). Auch hier sind die Ergebnisse in der Höhe 1m identisch mit denen der Hochpunkte. In der Höhe 2m liegen bei der Nivellierlatte 1 dann schon Abweichungen von ca. 10cm (!) in X-Richtung vor. Bei Betrachtung der zugehörigen Bildkoordinaten und Inneren Orientierung des Panoramabildes lässt sich der Bildwinkel berechnen, unter dem der Punkt im Panoramabild sichtbar ist. Dieser liegt für den Punkt bei durchschnittlich 70° . Es lässt sich daraus schließen, dass diese Punkte in 2m Höhe schon zu nah an der Aufnahmehöhe der Bilder liegen. Wären die Schwankungen der Kamera bei den Aufnahmen geringer und keine Exzentrizität des Projektionszentrums vorhanden, wären deutlich kleinere Abweichungen denkbar.

Tab. 5: Horizontale Abweichungen an den Nivellierlatten

Lageabw.	X		Y	
	Abw. (1m)	Abw. (2m)	Abw. (1m)	Abw. (2m)
NivL1	0.047	0.095	0.010	-0.018
NivL2	-0.042	-0.083	-0.005	-0.008
NivL3	-0.004		0.047	

4 Zusammenfassung, Wertung

Es konnte gezeigt werden, dass die Verwendung von Clusterpanoramen für die 3D-Auswertung mit nur geringen Einbußen gegenüber herkömmlicher photogrammetrischer Auswertung möglich ist. Die Ergebnisse sind für 2D-Auswertungen übertragbar.

Der Mehraufwand für die Berechnung der Sektorpanoramabilder aus Bildclustern wird kompensiert durch die erheblich geringere Bildanzahl bei der Auswertung. Die Aufnahmen mit dem Teleskopstab können mit wenig Zeitaufwand erfolgen. Der Orientierungs- und Auswerteprozess gewinnt durch die Kombination weniger Bilder und viel Inhalt pro Bild an Übersichtlichkeit.

Insgesamt kann eine Verringerung des Gesamtaufwandes für Bildaufnahme, Vorverarbeitung, Orientierung und Auswertung angenommen werden.

Weist das auszuwertende Objekt größere Tiefenunterschiede auf, muss allerdings auf geringe Schwankungen der Aufnahmeorte innerhalb eines Bildclusters geachtet werden.

Literaturverzeichnis

JAKOBS, C., 2003: Digitale Panoramen, Springer-Verlag

LUHMANN, T. & TECKLENBURG, W., (2002): Bundle Orientation and 3-D Object Reconstruction from Multiple-Station Panoramic Imagery, ISPRS Symposium Comm. V, Korfu, 2002

LUHMANN, T. & TECKLENBURG, W., (2002): Automatische Orientierung von Panoramabildverbänden als Grundlage der geometrischen Erfassung von Innenräumen, In: Luhmann (ed.): Photogrammetrie und Laserscanning - Anwendung für As-Built-Dokumentation und Facility Management. Wichmann Verlag, Heidelberg

LUHMANN, T. & TECKLENBURG, W. (2003): Potential of panoramic view generated from high-resolution frame images and rotating line scanner images, in Grün/Kamen (ed.): Optical 3D Measurement Techniques IV, 2003

Photogrammetrische Bestimmung räumlich-zeitlich aufgelöster Bewegungsfelder am Jakobshavn Isbræ Gletscher in Grönland

H.-G. Maas, R. Dietrich, E. Schwalbe, M. Bäßler & P. Westfeld ¹

Zusammenfassung: Der Jakobshavn Isbræ an der Westküste Grönlands ist einer der schnellsten und produktivsten Gletscher der Welt. Er wies über einen langen Zeitraum eine etwa konstante Bewegung von mehr als 20 Metern pro Tag auf und produziert jährlich Eisberge im Gesamtvolumen von ca. 30 km³. Aktuell hat sich die Geschwindigkeit des Gletschers auf ca. 35 Meter pro Tag beschleunigt. Im Sommer 2004 wurde am Isbræ eine photogrammetrische Messkampagne durchgeführt mit dem Ziel, aus terrestrischen Bildsequenzen einer hochauflösenden Digitalkamera räumlich-zeitliche Bewegungsmuster des Gletschers zu bestimmen.

Aufgrund des Charakters der Gletscherbewegung ist zunächst mit einem eindimensionalen Bewegungsvektorfeld zu rechnen, welches jedoch durch gezeiteninduzierte Höhenänderungen überlagert wird. Die Bewegungskomponente quer zur Fliessrichtung kann dagegen als vernachlässigbar angesehen werden. Daher wurden zur Bestimmung zweidimensionaler Bewegungsvektorfelder monokulare Bildsequenzen mit einer hochauflösenden Stillvideokamera Kodak DCS14n aufgenommen und ausgewertet. Die Einbringung eines Maßstabes erfolgte über geodätische Messungen sowie stereoskopische Aufnahmen in der ersten Epoche. Aus den Sequenzen wurden durch Kreuzkorrelation und Least-Squares-Matching aus der natürlichen Oberflächentextur des Gletschers Bewegungsvektoren bestimmt, wobei die Genauigkeit durch die extreme Topographie der Gletscheroberfläche und den Einfluss von Schattenwurf beeinträchtigt wird. Eine Signalisierung von Punkten auf dem Gletscher ist aufgrund der Unzugänglichkeit nicht möglich.

Bei einem aufgenommenen Gletscherausschnitt von ca. 2 km Länge kann die tägliche Bewegung von Strukturen der Gletscheroberfläche mit einer Standardabweichung in der Größenordnung von 0,2% der Länge des Bewegungsvektors bestimmt werden. Aus der Auswertung von Bildsequenzen mit einem Zeitintervall von 30 Minuten über eine Messdauer von 12 - 36 Stunden ist über die lineare Fliessbewegung hinaus deutlich eine Gezeitenabhängigkeit der Höhenkoordinate im vorderen Bereich des Gletschers zu erkennen. Die Resultate der terrestrischen photogrammetrischen Messungen stellen damit eine wertvolle Basis für glaziologische Untersuchungen am Jakobshavn Isbræ dar.

1. Einleitung

Der Jakobshavn Isbræ Gletscher (grönl. Sermeq Kujalleq) ist einer der aktivsten Gletscher der Welt. Er mündet an der Westküste Grönlands über den Kangia-Fjord in die Davis Strait (Abb. 1). Mit einer Bewegung von etwa 20 Metern pro Tag und einer Eisbergproduktion von ca. 30km³ pro Jahr drainiert er einen substantiellen Anteil von ca. 7% der jährlichen Niederschlagsmenge des grönländischen Inlandeises (ECHELMAYER et al., 1992). Erste geodätische Messungen zur Bestimmung der Fliessgeschwindigkeit des Gletschers im Bereich der Gletscherzunge wurden bereits vor mehr als 100 Jahren von (HAMMER, 1893) und (ENGELL, 1904) durchgeführt. In den 50er und 60er Jahren wurden aus Luftbildern im Maßstab 1 : 50'000 Geschwindigkeitsprofile an einer Reihe von Gletschern der grönländischen Westküste bestimmt (CARBONELL 1968, BAUER 1968). Die Resultate zeigen für den Jakobshavn Isbræ ein relativ gleichmäßiges Bewegungsmuster mit maximalen Bewegungen von 20-22 Metern

¹ Technische Universität Dresden (hmaas@rcs.urz.tu-dresden.de)

pro Tag. Die Standardabweichung des Bewegungsvektors wird von (CARBONELL, 1968) mit weniger als 1% der Länge des Bewegungsvektors angegeben.

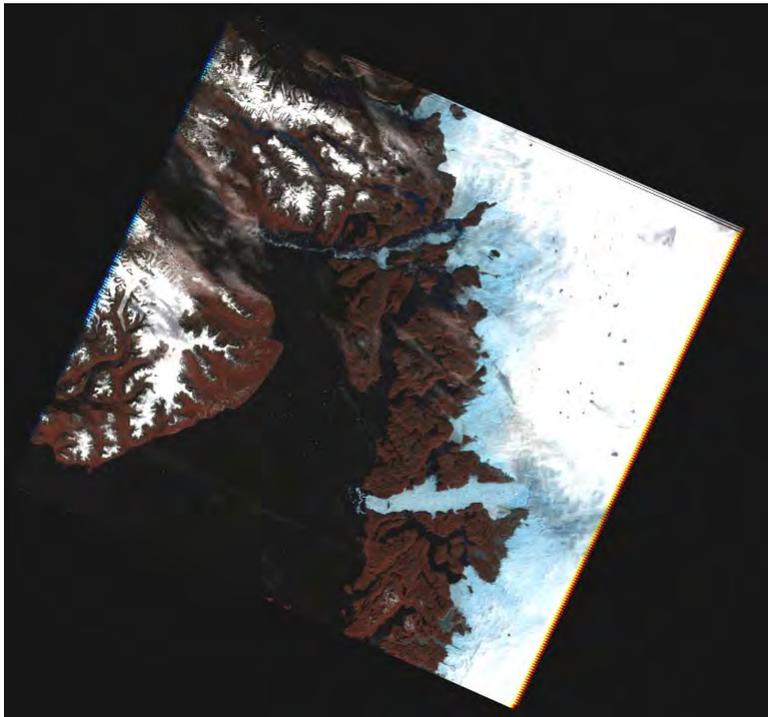


Abb. 1: Falschfarbeninfrarotaufnahme eines Gebiets von 185x185 km² an der Westküste Grönlands (Landsat, 8.9.2004). Unten im Bild ist der Kangerlussuaq Eisfjord zu erkennen, über welchen der Jakobshavn Isbræ in die Disko-Bucht mündet. Links ist die Disko-Insel zu sehen.

Die Gletscherfront des Jakobshavn Isbræ und der Kangerlussuaq-Fjord bilden zusammen den Ilulissat Isfjord, welcher 2004 zum UNESCO-Weltnaturerbe erklärt wurde (WEIDICK et al., 2004; BENNIKE et al., 2004). Bis etwa 2000 befand sich der Gletscher in einer quasi-stabilen Periode und bestand aus einem einzigen Eisstrom. Seitdem ist ein dramatischer Rückzug der Gletscherfront zu beobachten, so dass der Gletscher nun in Form zweier getrennter Eisströme aus Norden und Osten in den Kangerlussuaq-Fjord mündet (Abb. 2).

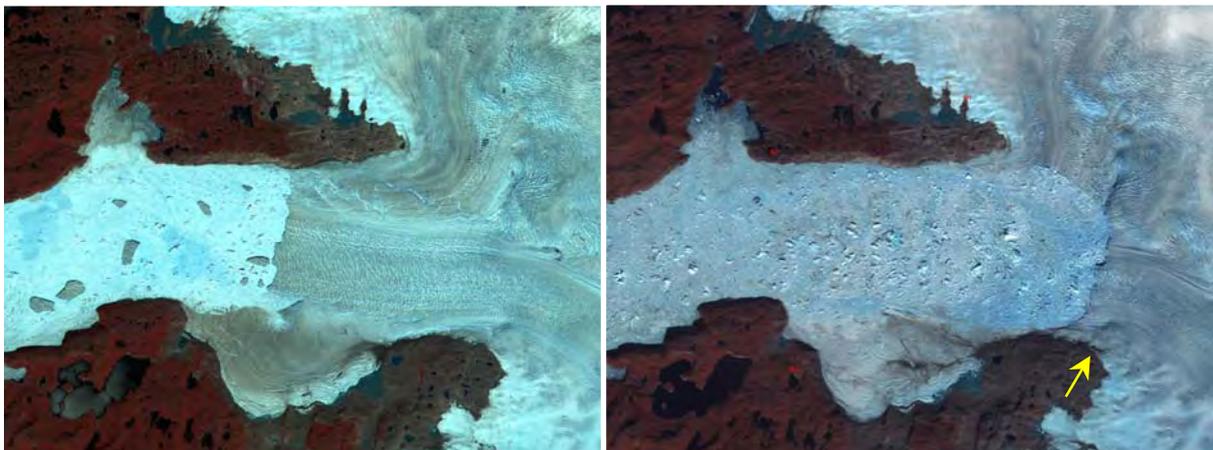


Abb. 2: Gletscherfront des Jakobshavn Isbræ (Landsat-Aufnahmen vom 7.7.2001 + 8.9.2004)

Bei einer Breite des Kangerlussuaq-Fjords von ca. 7-10 km beträgt der Rückzug der Gletscherfront in einem Zeitraum von nur drei Jahren etwa 10 km. Gleichzeitig wurde durch Flugzeuglaser-scannermessungen eine Abnahme der Dicke des Gletschers von mehr als 10 Metern pro Jahr festgestellt (THOMAS et al., 2003), und die Fließgeschwindigkeit des Gletschers erhöhte sich auf ca. 35 Meter pro Tag (JOUGHIN et al., 2004).

2. Messkampagne der TU Dresden 2004

Im Sommer 2004 führte die TU Dresden eine Messkampagne im Bereich der Gletscherfront des Jakobshavn Isbræ durch. Das Ziel der photogrammetrischen Messungen dieser Kampagne war die Bestimmung von räumlich-zeitlich aufgelösten Geschwindigkeitsfeldern aus terrestrische Bildsequenzen. Diese Messungen dienen zunächst zur Verifikation aktueller Publikationen hinsichtlich der Zunahme der Fliessgeschwindigkeit im Frontbereich des Jakobshavn Isbræ. Über die Bestimmung einzelner Geschwindigkeitsvektoren hinaus erlaubt die Aufnahme und Auswertung von Bildsequenzen die Bestimmung von Trajektorien und damit eine Analyse von Kurzzeitschwankungen der Geschwindigkeit. Diese sind vor allem zu erwarten, wenn die Gletscherzunge auf dem Fjord aufschwimmt. Zeitlich und räumlich aufgelöste Bewegungsfelder können somit einen Hinweis auf die Aufsetzlinie des Gletschers geben, die den Übergang zwischen dem auf dem Land aufliegenden und dem auf dem Fjord aufschwimmenden Teil des Gletschers darstellt. Darüber hinaus erlauben Aussagen über die Größe einer eventuellen gezeiteninduzierten Variation der Fliessgeschwindigkeit die Erstellung von Modellen zur Korrektur von aus Satelliten-InSAR bestimmten Geschwindigkeitsvektoren.

Aus Gründen der Erreichbarkeit mussten die Messungen auf den südlichen, von Osten kommenden Eisstrom beschränkt werden. Dieser kann aus einer Entfernung von 1-3 km von Hügeln am südlichen Gletscherrand beobachtet werden (Pfeil in Abb. 2). Der nördliche Eisstrom ist in der gegenwärtigen Situation des Gletschers für terrestrische Messungen schlecht zugänglich.

3. Photogrammetrische Datenakquisition

Im Rahmen einer 14-tägigen Feldkampagne wurden mehrere lange Bildsequenzen im Bereich der Gletscherfront aufgenommen. Dazu wurde eine hochauflösende digitale Stillvideokamera Kodak DCS 14n verwendet. Die Kamera weist einen 4500x3000 Pixel CMOS-Sensor mit Bayer-Farbmuster auf und kann mit Wechselektiven ausgestattet werden. Durch ihren Intervallometermodus erlaubt sie die Aufnahme von Bildsequenzen über längere Zeiträume in vordefinierten Zeitintervallen. Mit einem Stromverbrauch von etwa 6 Watt im Standby-Modus ist dazu allerdings eine externe Stromversorgung notwendig. In der Feldkampagne wurden hierzu 24 AH Trockenbatterien verwendet, die eine Messdauer von ca. 48 Stunden erlaubten.



Abb. 3: Kodak DCS 14n am Jakobshavn Isbræ

Die Bildsequenzen decken Zeiträume von 12-36 Stunden ab. Längere Sequenzen konnten aufgrund der Wetterbedingungen und mangels regengeschützter Aufstellmöglichkeiten der Kamera nicht aufgenommen werden. Zum Nachweis der vermuteten gezeiteninduzierten Variationen der Bewegungsgeschwindigkeit sollten Bildsequenzen eine Länge von mindestens 24 Stunden aufweisen. Dank der Lage des Gletschers auf etwa 70° nördlicher Breite stand im August auch nachts noch genügend Licht für Aufnahmen zur Verfügung. Zur Gewährleistung

einer ausreichenden zeitlichen Auflösung wurde der Intervallometer auf 30 Minuten eingestellt. Bewegungen der Kamera, verursacht durch Windeffekte, Aufwärmung der Stativbeine und Instabilitäten des Untergrundes wurden durch die Messung der Bildkoordinaten von Zielmarken im Vordergrund des Bildes kompensiert. Je nach verwendeter Objektivbrennweite betragen diese Bildbewegungen bis zu 10 Pixel.

Die Aufnahme beschränkte sich auf monokulare Bildsequenzen. Eine stereoskopische Aufnahme erscheint aufgrund der durch die extrem zerklüftete Struktur der Gletscheroberfläche verursachten starken Dekorrelation der Inhalte stereoskopischer Bilder wenig erfolgversprechend. Die Dynamik der Gletscherbewegung lässt allerdings auch keine signifikanten Bewegungen quer zur Fliessrichtung erwarten, so dass eine senkrecht zur Fliessrichtung orientierte Kamera für die Aufnahme ausreichend erscheint.

Zur Skalierung der im Bildraum gemessenen Geschwindigkeitsinformation ist bei der monokularen Auswertung Tiefeninformation zur Bestimmung des lokalen Bildmaßstabes notwendig. Dafür ergeben sich folgende Optionen:

- Aufnahme von Stereopaaren: Zusätzlich zur monokularen Bildsequenz wurden zu jedem Datensatz am Anfang der Sequenz Stereopaare aufgenommen, die eine Bestimmung der 3D-Koordinaten von Punkten im lokalen System ermöglichen. Die Datumsinformation für die absolute Orientierung der Stereopaare erfolgt über geodätisch bestimmte Passpunkte; alternativ kann ein minimales Datum über eine einzelne Streckenmessung im Vordergrund des aufgenommenen Bereichs definiert werden. Aus den 3D-Koordinaten der Stereoauswertung kann ein lokaler Maßstab bestimmt werden, der unter Annahme einer Fliessrichtung parallel zur Bildebene auf die Skalierung in der Bildsequenz verfolgter Punkte übertragen werden kann.
- Skalierung auf geodätisch bestimmte Geschwindigkeitsvektoren: Prinzipiell kann die Geschwindigkeitsinformation für Gletscherpunkte auch geodätisch durch Vorwärtsschnitte bestimmt werden (HAMMER, 1893). Der damit verbundene Aufwand erlaubt jedoch lediglich die Bestimmung von Geschwindigkeitsvektoren einzelner Punkte und keine zeitaufgelösten Trajektorien. Die geodätisch bestimmten Geschwindigkeitsvektoren können jedoch bei synchroner Messung zur Skalierung photogrammetrisch bestimmter Trajektorien verwendet werden. Der hiermit verbundene Aufwand ist jedoch so hoch, dass er allenfalls für die Transformation von Einzelpunkten in Frage kommt.
- Entzerrung auf Basis einer Landsat-Aufnahme: Prinzipiell bietet sich auch die Nutzung der in Abb. 1 gezeigten georeferenzierten Landsat-Szene als Basis für eine Entzerrung der Schrägaufnahmen der Bildsequenz mit dem Ziel der Bestimmung des lokalen Maßstabes an. Die angestrebte Genauigkeit der Maßstabsbestimmung von 1% ist damit allerdings nicht erreichbar.

4. Datenverarbeitung



Abb. 4: Messaufnahme am Jacobshavn Isbræ

Abb. 4 zeigt ein Einzelbild einer 24-Stunden Sequenz, aufgenommen mit einem 50mm-Objektiv. In den monokularen Bildsequenzen können durch Kreuzkorrelation an vorgegebenen oder auf einem regelmäßigen Raster definierten Stellen Muster verfolgt werden. Dabei erwies sich die extrem zerklüftete Oberfläche des Gletschers in Kombination mit einem aufgrund des Sonnenganges stark variierenden Schattenwurf teilweise als problematisch. Zusätzliche Irregularitäten wurden durch Schatten durchziehender Wolkenfelder verursacht. Diese Effekte bewirken an vielen Stellen eine starke Dekorrelation identischer Bildausschnitte aufeinanderfolgender Zeitpunkte, welche eine signifikante Verfälschung der Ergebnisse der Punktzuordnung bewirken kann. Eine strenge Modellierung der Effekte würde ein Oberflächenmodell des Gletschers voraussetzen, was allenfalls – unter erheblichem Aufwand – aus gleichzeitig aufgenommenen Flugzeuglaserscannerdaten sehr hoher Punktdichte generiert werden könnte. Da solche Daten nicht zur Verfügung stehen, können die Effekte nur durch eine gezielte Wahl der zu verfolgenden Muster, zusätzliche Bedingungen bei der Kreuzkorrelation, eine nachträgliche Filterung der Trajektorien sowie die Wahl großer Korrelationsfenster reduziert werden. In den hier vorgestellten ersten Auswertungen wurden Korrelationsfenster von 40x40 Pixel mit einem vorwärtsorientierten beschränkten Suchbereich verwendet. Die daraus erhaltenen Trajektorien wurden um die aus der Beobachtung der Zielmarken im Bild ermittelten Kamerabewegung korrigiert und anschließend gefiltert. Trajektorien mit nicht plausiblen Sprüngen wurden dabei gelöscht. Auch mit diesen Zusatzmaßnahmen war in der Regel nur eine Verfolgung zwischen aufeinanderfolgenden Bildern möglich. Eine aus Sicht der Fehlerfortpflanzung wünschenswerte Zuordnung aus dem ersten Bild in alle weiteren Bilder scheiterte in den meisten Fällen.

Ähnliche Probleme bei der Bestimmung korrespondierender Punkte in multi-temporalen Aufnahmen des Jacobshavn Isbræ berichtet auch (CARBONELL, 1968) für die interaktive Auswertung von analogen Luftbildern, welche mit einem Zeitabstand von wenigen Tagen aufgenommen wurden.

Die Umsetzung der in Kapitel 3 diskutierten Ansätze zur Transformation der im Bildraum bestimmten Trajektorien in den Objektraum erwies sich zunächst als unerwartet schwierig:

- Die Zuordnung homologer Punkte in Stereobildpaaren und die Übertragung von Punkten aus den Stereopaaren in die Bildsequenz kann aufgrund der Dekorrelation homologer

Bildregionen, welche hier zusätzlich durch unterschiedliche Perspektiven verstärkt wird, in der Regel nur interaktiv erfolgen. Geodätisch gemessene Passpunkte auf dem Gletscher sind in den Bildern teilweise nur schwer identifizierbar. Durch die Gletschertopographie und die schrägen Visuren ergibt sich eine ziemlich ungünstige Netzgeometrie. Manche Datensätze erwiesen sich damit als nicht auswertbar.

- Die Realisierung der Entzerrung auf der Basis geodätisch bestimmter Passpunkte scheiterte aufgrund der Schwierigkeit der Erkennung identischer Punkte im Vorwärtsschnitt und in der Übertragung in den Bildraum sowie an der ungünstigen Geometrie mit extremer Schrägvisur.
- Eine Entzerrung auf die Landsat-Szene scheiterte ebenfalls aufgrund der Unmöglichkeit der Übertragung von Punkten aus den terrestrischen Aufnahmen in die Landsat-Szene, der schrägen Visur und des Einflusses der Gletschertopographie.

5. Resultate

Erste Zwischenergebnisse der Datenprozessierung zeigen trotz der im Vorigen genannten Erschwernisse einer automatischen Musterverfolgung die erwarteten Phänomene. Aus geodätischen Messungen an 13 Punkten, welche u.a. zur Skalierung der im Bildraum bestimmten Trajektorien dienen, ergab sich eine mittlere Geschwindigkeit von 35 Metern pro Tag. Die Trajektorien einer ausgewerteten 24-Stunden Sequenz zeigen eine gleichmäßige Bewegung des Gletschers in Fließrichtung. Die Analyse der Vertikalkomponente der Bewegung zeigt jedoch eindeutig eine zeitliche Variabilität.

Abb. 5 zeigt die Höhenkomponente eines Gletscherpunktes nahe der Gletscherfront in 30-Minuten Schritten über 24 Stunden. Darin sind zwei Maxima und Minima gut erkennbar. Die Extremwerte der Y-Komponente der Trajektorie weisen eine eindeutige Korrelation mit der berechneten Gezeitenkurve für den Pegel Ilulissat (ca. 50 km westlich an der Mündung des Kangia-Fjords in die Disko Bucht) auf.

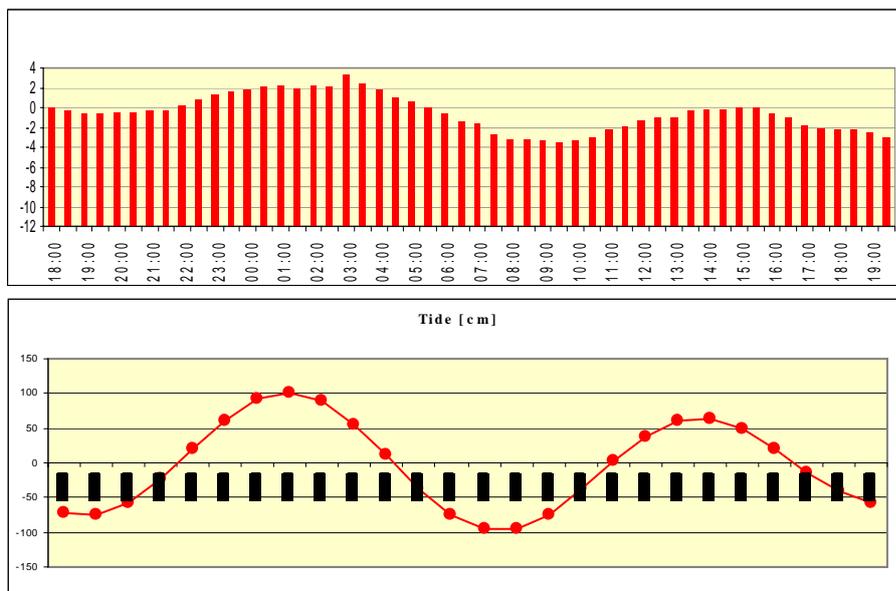


Abb. 5: Bewegung eines Gletscherpunktes über 24 Stunden (oben), zugehörige berechnete Gezeitenkurve für den Pegel Ilulissat

Der Hub der Höhenkoordinate des beobachteten Gletscherpunktes, korrigiert um den Trend der Abwärtsbewegung über 24 Stunden, beträgt etwa 7 Pixel, was sich auf etwa 2 Meter im Objektraum übersetzt. Benachbarte Punkte im Bereich der Gletscherfront bestätigen diese Beobachtungen, während der vertikale Hub der Trajektorien in östlicher Richtung – von der

Gletscherfront weg – abnimmt. Dies beweist, dass der Gletscher im vorderen Bereich auf dem Kangia-Fjord aufschwimmt, und widerlegt eine entgegengesetzt lautende These, die in (BAUER, 1968) – trotz einer zu dem Zeitpunkt deutlich weiter in den Fjord reichenden Gletscherzunge – aufgestellt wird.

6. Ausblick

Die Auswertung terrestrischer Bildsequenzen hochauflösender Digitalkameras kann einen wertvollen Beitrag zur glaziologischen Forschung an schnellen arktischen oder antarktischen Gletschern liefern. Vorteile des Verfahrens liegen in der flexiblen und kostengünstigen Datenakquisition und der hohen zeitlichen Auflösung über kurze Zeiträume bei gleichzeitig erzielbarer räumlicher Auflösung. Ein offensichtlicher Nachteil terrestrischer Aufnahmeverfahren ist die limitierte Sicht sowie die eingeschränkte Eignung für Langzeituntersuchungen. Somit stellt die terrestrische Photogrammetrie hier vor allem eine interessante Ergänzung luftbild- oder satellitenbildgestützter Aufnahmen dar.

Die automatische Auswertung der Aufnahmen erwies sich aufgrund stark variierender Beleuchtungsbedingungen als teilweise schwierig und bedingt eine vorsichtige Handhabung von Werkzeugen der Bildanalyse und eine Filterung der Resultate. Die erzielten Resultate zeigen eindeutig die erwarteten gezeiteninduzierten Höhenänderungen von Gletscherpunkten im Bereich der Gletscherfront.

Für zukünftige Kampagnen erscheinen eine Reihe von Verbesserungen bzw. Erweiterungen des Verfahrens sinnvoll: Zur Erzielung längerer Bildsequenzen sollte eine wettergeschützte Aufstellung der Kamera vorgesehen werden. Eine wesentliche Verbesserung der Auswerteprozedur ist durch die Integration von Werkzeugen der robusten Schätzung in die zur Musterverfolgung angewandten Bildanalyseverfahren zu erwarten. Schließlich erscheint – derzeit allerdings limitiert auf Aufnahmeentfernungen bis maximal ca. 600 Meter – die Verwendung terrestrischer Laserscanner als eine interessante Alternative zur Aufnahme durch Kameras. Laserscanner sind unabhängig von der Bildtextur der aufgenommenen Oberfläche und sind daher frei von Anfälligkeiten gegenüber Beleuchtungsbedingungen und Schattenwurf; gleichzeitig liefern sie als polares Messverfahren dreidimensionale Koordinaten und erlauben damit die Bestimmung aller drei Komponenten des Bewegungsfeldes ohne die Notwendigkeit zusätzlicher Messungen zur Bestimmung der Skalierung der Trajektorien.

Danksagung:

Die Arbeiten am Jacobshavn Isbræ sowie die Auswertung der Daten wurden durch die DFG unterstützt.

Literaturangaben:

- BAUER, A., 1968: Missions Aériennes de reconnaissance au Groenland 1957-1958. Meddeleser om Grønland, Kommissionen for videnskabelige Undersøgelser i Grønland, Vol. 173, Nr. 3
- BENNIKE, O., MIKKELSEN, N., PEDERSEN, H. & WEIDICK, A., 2004: Ilulissat Isfjord - a world heritage site. GEUS, Kopenhagen, ISBN 87-7871-136-3
- CARBONELL, M. & BAUER, A., 1968: Exploitation des couvertures photographiques aériennes répétées du front des glaciers vélant dans Disko Bugt et Umanak Fjord, juin-juillet

1964. Meddeleser om Grønland, Kommissionen for videnskabelige Undersøgelser i Grønland, Vol. 173, Nr. 5
- EHELMMEYER, K., HARRISON, W., CLARKE, T. & BENSON, C., 1992: Surficial glaciology of Jakobshavns Isbræ, West Greenland: Part II. Ablation, accumulation and temperature. *Journal of Glaciology*, Vol. 38., pp. 169-181
- ENGELL, M., 1904: Undersøgelser og Opmaalinger ved Jakobshavns Isfjord og i Orpigsuit I Sommersen 1902. Meddeleser om Grønland, Kommissionen for Ledelsen af de geologiske og geografiske Undersøgelser i Grønland, Vol. 4
- HAMMER, R., 1893: Undersøgelser ved Jakobshavns Isfjord og nærmste Omegn i Vinteren 1879-1880. Meddeleser om Grønland, Kommissionen for Ledelsen af de geologiske og geografiske Undersøgelser i Grønland, Vol. 26
- JOUGHIN, I., ABDALATI, J. & FAHNESTOCK, M., 2004: Large fluctuations in speed on Greenland's Jakobshavn Isbræ glacier. *Nature*, 432, pp. 608-610
- THOMAS, R., ABDALATI, W., FREDERICK, E., KRABILL, W., MANIZADE, S. & STEFFEN, K., 2003: Investigation of surface melting and dynamic thinning on Jakobshavn Isbræ, Greenland. *Journal of Glaciology* 49, pp. 231-239
- WEIDICK, A., MIKKELSEN, N., MAYER, CHR. & PODLECH, S., 2004: Jakobshavn Isbræ, West Greenland: The 2002-2003 collapse and nomination for the UNESCO World Heritage List. *Geological Survey of Denmark and Greenland Bulletin* 4, pp. 85-88

Terrestrisches 3D-Laserscanning im Hamburger Rathaus - Mensi GS100 und IMAGER 5003 im Vergleich

THOMAS P. KERSTEN ¹, HARALD STERNBERG ² UND ENRICO STIEMER ³

In diesem Beitrag wird der vergleichende Einsatz von zwei terrestrischen 3D-Laserscanning-Systemen bei der Erfassung und Modellierung von zwei historischen Sälen im Hamburger Rathaus vorgestellt. Die beiden Säle (Kaisersaal und Großer Festsaal) wurden in ca. drei Stunden mit dem Mensi GS100 von Trimble und mit dem IMAGER 5003 von Zoller & Fröhlich von fünf (GS100) bzw. 22 Standpunkten (IMAGER) gescannt, um aus der jeweiligen gesamten Punktwolke verschiedene Schnitte, 2D-Pläne und 3D-Modelle beispielhaft zu generieren. Die Georeferenzierung der Punktwolken in das lokale Koordinatensystem wurde über Zieltafeln mit einer Genauigkeit von ca. 5 mm (GS100) bzw. 8 mm (IMAGER) erreicht. Die Qualität der aus den Laserscannerdaten modellierten digitalen CAD-Daten wird durch Referenzstrecken kontrolliert und die Effizienz der jeweiligen Datenerfassung und Auswertung wird miteinander verglichen und bewertet.

1 Einleitung

Seit Ende der neunziger Jahre die ersten terrestrischen 3D-Laserscanner auf dem Markt kamen, haben die Systeme eine enorme technische Weiterentwicklung vollzogen, so dass sie sich als 3D-Messtechnik neben und auch in Ergänzung zu den bekannten Technologien wie Photogrammetrie und Tachymetrie etablieren. Durch die Verbesserungen von Hardware und Software sind die Systeme heute in der Lage, komplexe Formen und Objekte mit einem dichten 3D-Punktraaster aufzunehmen und entsprechend auszuwerten. Dennoch sind Untersuchungen über Genauigkeiten und effizienten Projekteinsatz aus diesem Grunde sowohl für das Verständnis und für die Verbesserung, als auch für eine breite Marktakzeptanz solcher Messsysteme sehr wichtig. Der Fachbereich Geomatik der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg hat in einem Pilotprojekt vergleichend untersucht, in wie weit sich die beiden terrestrischen 3D-Laserscanning-Systeme Mensi GS100 von Trimble und IMAGER 5003 von Zoller & Fröhlich bei der Innenraumaufnahme zweier historischer Säle im Hamburger Rathaus effizient einsetzen lassen. Die Qualität der aus den Laserscannerdaten modellierten digitalen CAD-Daten wurde mit Referenzstrecken verglichen.

Genauigkeitsuntersuchungen und praktische Erfahrungen mit dem Mensi GS100 an der HAW Hamburg wurden von KERSTEN et al. 2004 und STERNBERG et al. 2005 veröffentlicht. Als Beispiele für den Einsatz von terrestrischen Laserscannern für Aufnahmen historischer Innenräume dienen die Erfassung von Schloss Neuschwanstein mit dem IMAGER 5003 von STRACKENBROCK (2004) und der kleinen Hagia Sophia Moschee in Istanbul mit dem 3dLMS (Prototyp der TU Darmstadt) von DÜPPE & KLEIN (2005). LORRA & JAEGER (2004) berichten über den effizienten Einsatz des IMAGER 5003 bei der Tatortvermessung.

In diesem Beitrag werden die beiden Säle und die beiden 3D-Laserscanning-Systeme im Kapitel 2 kurz vorgestellt. Die Datenerfassung, Registrierung und Georeferenzierung mit den Lasersystemen werden im Kapitel 3 und die Auswertung der beiden unterschiedlichen Daten-

¹ Fachbereich Geomatik, Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, Hebebrandstr. 1, 22297 Hamburg, e-mail: t.kersten@rzcn.haw-hamburg.de

² Adresse s. o., e-mail: h.sternberg@rzcn.haw-hamburg.de

³ Adresse s. o., e-mail: stiemlette@web.de

sätze wird in Kapitel 4 präsentiert. Im Kapitel 5 werden die Ergebnisse und die Systeme bewertend verglichen.

2 Aufnahmeobjekte und Laserscanning-Systeme

Die als Aufnahmeobjekte gewählten historischen Säle zeichnen sich durch ein großes Messvolumen mit bis zu 17m x 41 m x 16 m und durch Detailreichtum aus. Um diesen beiden Gesichtspunkten gerecht zu werden, wurden zwei mit unterschiedlichen Messprinzipien arbeitende Laserscanner-Systeme bei der Aufnahme verwendet.

2.1 Kaisersaal und Großer Festsaal im Hamburger Rathaus

Das Hamburger Rathaus wurde 1886-1897 von einer Architektengemeinschaft unter der Leitung Martin Hallers als prächtiger Sandsteinbau im Stil der Neo-Renaissance gebaut und ist heute Sitz von Senat und Bürgerschaft. Das Rathaus ist 111 Meter lang und besitzt einen 112 Meter hohen Turm. Im Rathaus befinden sich 647 Räume, von denen die prachtvollsten der Kaisersaal und der Große Festsaal sind (Abb. 1). Beide Säle sind mit viel Marmor, Goldverzierungen und kostbaren Gemälden ausgestattet. Sie dienen heute für Empfänge und gesellschaftliche Veranstaltungen. Der Kaisersaal erhielt seinen Namen nach einem Besuch von Kaiser Wilhelm II. anlässlich der Eröffnung des Nord-Ostsee-Kanals. Er verfügt über eine auffällige Deckenmalerei, die die Handelsschiffahrt unter deutscher Flagge symbolisiert. Die Wände, an denen Porträts bedeutender Bürgermeister Hamburgs hängen, sind mit einer Tapete aus gepresstem Rindsleder bedeckt, die größte dieser Art in Deutschland aus dem 19. Jahrhundert. Im reich verzierten großen Festsaal werden heute noch Empfänge für Politiker des In- und Auslandes gegeben. Über der beschnitzten Senatsestrade mit den Bürgermeistersitzen glänzt das goldene Staatswappen. Direkt darüber befindet sich ein Wandgemälde, das den Hamburger Hafen zu Beginn des 20. Jahrhunderts zeigt. Weitere große Wandgemälde, von Hugo Vogel bis 1909 gemalt, zeigen die Geschichte Hamburgs von 800 bis 1900. Umsäumt werden die Wandmalereien in 13 Meter Höhe mit 62 Stadtwappen des alten Hansebundes. Drei riesige Kronleuchter mit jeweils 240 Glühbirnen und einem Gewicht von 1,7 Tonnen erhellen den Saal.



Abb.1: Ansichten des Kaisersaals (links) und des Großen Festsaals im Hamburger Rathaus (rechts)

2.2 Laserscanning-Systeme Mensi GS100 und IMAGER 5003

Das 3D-Laserscanning-System GS100 wird von Mensi S.A., Frankreich hergestellt und der IMAGER 5003 wird von Zoller & Fröhlich in Wangen im Allgäu produziert. Die wichtigsten

technischen Spezifikationen der beiden verwendeten Systeme sind in Tab. 1 zusammengefasst. Die wesentlichen Unterschiede zwischen GS100 und IMAGER 5003 werden wie folgt aufgeführt: Das Impulslaufzeitverfahren des GS100 (Wellenlänge 532 nm) erlaubt die Messung von längeren Scandistanzen als der IMAGER 5003 (780 nm), dagegen ist die Scangeschwindigkeit des GS100 aufgrund des Messverfahrens deutlich geringer. Das Sichtfeld ist beim IMAGER 5003 wesentlich größer als beim GS100 und erlaubt somit eine höhere Flexibilität des Systems in Innenräumen. Dagegen weist der GS100 eine höhere Winkelauflösung und eine deutlich geringere Spotgröße des Laserstrahls am Objekt auf. Ein Laserpunkt wird beim GS100 in 25 m Entfernung 3 mm groß abgebildet, während der Laserpunkt beim IMAGER 5003 auf derselben Distanz 11 mm groß sein kann. Durch die integrierte Kamera bietet der GS100 die Möglichkeit, die Punktwolke mit RGB-Werten farblich zu kodieren.

Tab. 1: Technische Spezifikationen der Laserscanner Mensi GS100 und IMAGER 5003

	Mensi GS100	IMAGER 5003
Messmethode	Impulslaufzeit	Phasendifferenz
Sichtfeld	360 ⁰ horizontal, 60 ⁰ vertikal	360 ⁰ horizontal, 310 ⁰ vertikal
Optimale Scandistanz	2 – 100 m	1 – 53,5 m
Scangeschwindigkeit	Bis zu 5000 Punkte/sec	Bis zu 500000 Punkte/sec
Streckenmessgenauigkeit (25m)	6 mm (einfache Strecke)	~ 6mm
Winkelauflösung	0.002 gon	0.020 gon
Strahldivergenz/Laserspot in 25 m	0,06 mrad / 3 mm	0,22 mrad / ca. 11 mm
Integrierte Kamera	RGB 768 x 576 Pixel	keine

Die Abb. 2 zeigt beide 3D-Laserscanning-Systeme mit entsprechendem Zubehör. Zum GS100 gehören eine robuste Transportkiste und ein Notebook zur Steuerung des Messinstrumentes bei der Datenerfassung. Eine sinnvolle Ergänzung des Systems ist ein effizienter Generator (z. B. Honda-Stromerzeuger EU 10i, Leistung ca. 1 KW) für den Betrieb im Außendienst, da nicht überall eine Stromversorgung vom Netz gewährleistet werden kann. Der IMAGER 5003 ist auf einem fahrbaren Stativ montiert und wird durch eine Batterie versorgt. Der Steuerung des Scanners erfolgt ebenfalls über ein Notebook.



Abb.2: Das 3D-Laserscanning-System Mensi GS100 der HAW Hamburg mit Zubehör (links), GS100-Innenansicht mit digitaler Kamera und Spiegel (Mitte), IMAGER 5003 mit Zubehör (rechts)

Ein wesentlicher Bestandteil der Laserscanning-Systeme ist die Software, die für beide verwendeten Systeme in Tab. 2 zusammengefasst ist. Die Software bietet die Steuerung des Scanners bei der Aufnahme über ein Notebook, die Registrierung und Georeferenzierung der verschiedenen Punktwolken und eine Vielzahl von Optionen für deren Auswertung bis zur Einpassung von geometrischen Primitiven in die Punktwolke zur CAD-Konstruktion.

Tab. 2: Software für die Laserscanning-Systeme Mensi GS100 und IMAGER 5003

Software	Mensi GS100	IMAGER 5003
Scanning	PointScape V1.2	LR Viewer2
Datenverarbeitung	Real Works Survey V4.1 zur Registrierung und Georeferenzierung, OfficeSurvey Module	LFM Modeller V3.64c zur Registrierung und Georeferenzierung, Einpassen von geometrischen Primitiven in Punktwolke
Datenverarbeitung	3Dipsos V3.0 zur Registrierung und Georeferenzierung, Einpassen von geometrischen Primitiven in Punktwolke	LFM Server + Generator 3.64i zur Bearbeitung von großen Punktwolken

3 Datenerfassung, Registrierung und Georeferenzierung

Die Arbeitsschritte vor der eigentlichen Bearbeitung der 3D-Punktwolken sind die Datenerfassung, die Registrierung (Verknüpfung) und die Georeferenzierung der Punktwolken in ein übergeordnetes Koordinatensystem. Dazu wurden vor dem Scannen in beiden Räumen entsprechende Zielmarken (Targets) angebracht, die später eine Transformation vom Scanner- in das übergeordnete Koordinatensystem gewährleisten. Die verschiedenen Zielmarken (Abb. 3 Mitte), neun für den GS100 und 29 für den IMAGER 5003, wurden mit einem Tachymeter TCRA 1105 von Leica in einem lokalen 3D-Netz eingemessen und in einer Ausgleichung mit einer Genauigkeit von ca. 4 mm bestimmt.

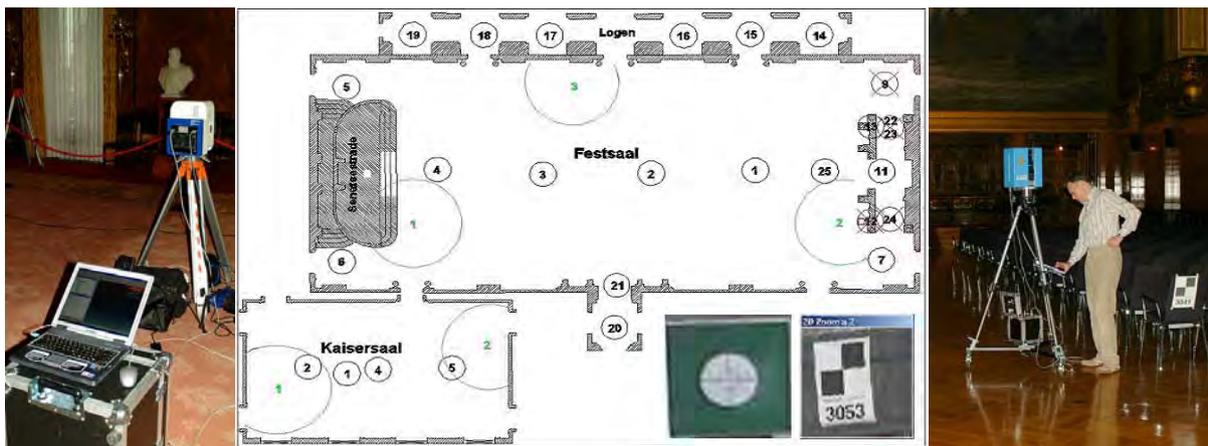


Abb.3: Links: Mensi GS100 im Kaisersaal, Mitte: Übersicht der Scanstationen: GS100 große Kreise und IMAGER 5003 kleine Kreise, sowie Zielmarken für GS100 und IMAGER 5003, rechts: IMAGER 5003 im Festsaal.

Für das Laserscanning in den beiden Sälen des Hamburger Rathauses standen insgesamt fünf Stunden zur Verfügung. Aus zeitlichen Gründen konnte mit dem GS100 nur von fünf Scannerstandpunkten gescannt werden (siehe Abb. 3 Mitte), während man durch die kurzen Scanzeiten von ca. 7 Minuten je Scan mit dem IMAGER 5003 von 22 Standpunkten Aufnahmen durchführen konnte. Als Auflösung wurde die Einstellung ‚high‘ gewählt, in der ein 360° Scan eine Größe von 10000 Pixel x 5967 Linien aufweist. Dies führt in 25 m Entfernung zu einem Punktabstand von 16 mm x 16 mm. Der Standortwechsel mit dem IMAGER 5003 konnte durch den Rolluntersatz sehr schnell und flexibel vollzogen werden, dagegen war beim GS100 ein Auf- und Abbau des Systems von jeweils ca. 10 Minuten erforderlich. Die Steuerung der beiden Scanner erfolgte über ein Notebook mit der Software PointScape V1.2 (GS100) bzw. LRViewer 2 (IMAGER 5003). Um die gescannten Punktwolken verschiedener Standpunkte automatisch verknüpfen zu können, wurde jede sichtbare grüne Zieltafel mit dem GS100 separat vor jedem Objektskan gescannt. Die nummerierten Targets für den

IMAGER 5003 wurden in jedem Panoramascan des Standpunktes mit erfasst. Leider konnte das Scannen der beiden Säle nicht unter Idealbedingungen durchgeführt werden, da sowohl Besuchergruppen im Rathaus, als auch eingeladene Laserscanner-Interessierte manchmal ein leichtes Vibrieren des Parkettbodens verursachten. Jedoch konnten keine signifikanten Auswirkungen des Vibrierens bei der Auswertung festgestellt werden. Wichtige statistische Angaben über das Scannen im Hamburger Rathaus sind in Tab. 3 zusammengefasst. Obwohl der Punktabstand beim Scannen bei beiden Systemen ungefähr gleich groß gewählt wurde, ergaben sich durch die vielen Standpunkte und durch das größere Sichtfeld des IMAGER 5003 eine deutlich höhere Anzahl gescannter Punkte und damit ein größeres Datenvolumen.

Tab. 3: Scanstatistik für die Aufnahme im Hamburger Rathaus mit Mensi GS100 und IMAGER 5003

Scanstatistik	Mensi GS100	IMAGER 5003
# Zielmarken	9	29
# Scanner-Standpunkte	5	22
# Scans	8	22
# Punkte (in Mio.)	24,5	1076
Datenvolumen [MB]	500	5400
Punktabstand in 25 m [cm] / Scan	1,9	1,6
Scan-Zeit/Station [min]	50	7
Scan-Zeit insgesamt [min]	190	154

Die anschließende Registrierung und Georeferenzierung der acht Punktwolken erfolgte beim GS100 im Programm Real Works Survey 4.1 automatisch über die drei bzw. fünf Zieltafeln mit einer Genauigkeit von 3 mm (Kaisersaal) bzw. 5 mm (Festsaal). Dagegen wurden aufgrund der großen Datenmengen die Punktwolken jedes einzelnen Standpunktes des IMAGER 5003 über jeweils drei bis sechs Zielmarken mit der Software LFM Modeller 3.64 und einer Genauigkeit von 8mm direkt georeferenziert. Bei vier Standpunkten war dies aufgrund zu wenig sichtbarer Targets nicht möglich. (siehe durchgekennzeichnete Kreise in Abb. 3). Abb. 4 zeigt die registrierten und georeferenzierten Punktwolken vom Großen Festsaal und Kaisersaal, wobei die GS100-Daten durch die Bilder der Videokamera farbkodiert, die Daten des IMAGER 5003 jedoch nur in Grautönen dargestellt sind.

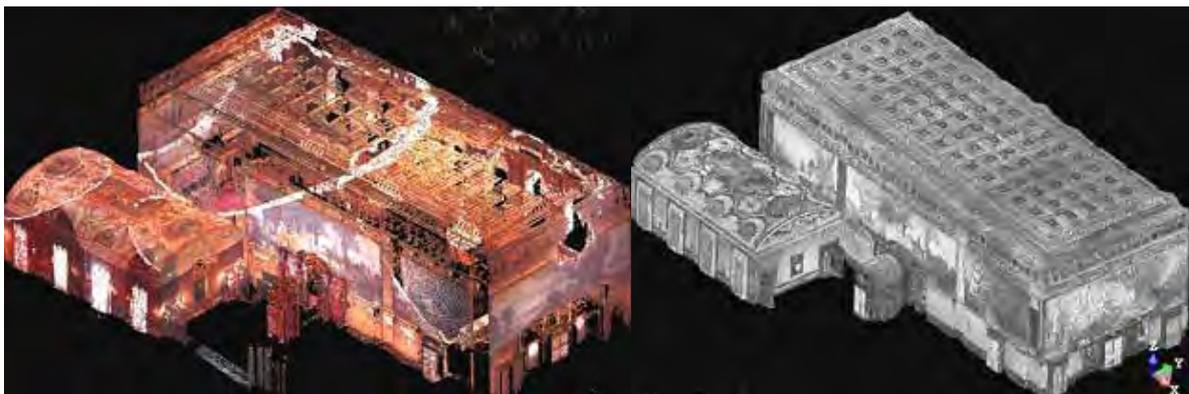


Abb. 4: Georeferenzierte Punktwolken beider Säle: Mensi GS100 (links), IMAGER 5003 (rechts)

4 Auswertung der Punktwolken

Die Generierung von 2D-Schnitten und einfachen 3D-Modellen stand im Vordergrund der Auswertung der Punktwolken. Dazu konnte für den GS100 weiterhin die Software Real Works Survey 4.1 genutzt werden. Diese ermöglicht das manuelle und automatische Erzeugen von Schnittebenen, die Einrechnung von Polylinien in die Punktwolke der Schnitte und

den Export von Polylinien zu AutoCAD. Diese Polylinien waren die Grundlage, um in AutoCAD sowohl die Grundrisse und Aufrisse, wie in Abb. 5 und 7 dargestellt, als auch 3D-Modelle (Abb. 6) zu konstruieren.. Für die Konstruktion des Wandstückes im Großen Festsaal (Abb. 8) wurden beispielsweise 48 Schnittebenen in einem Abstand von 10 cm mit einer Stärke von 5 cm gebildet und daraus Polylinien erzeugt.

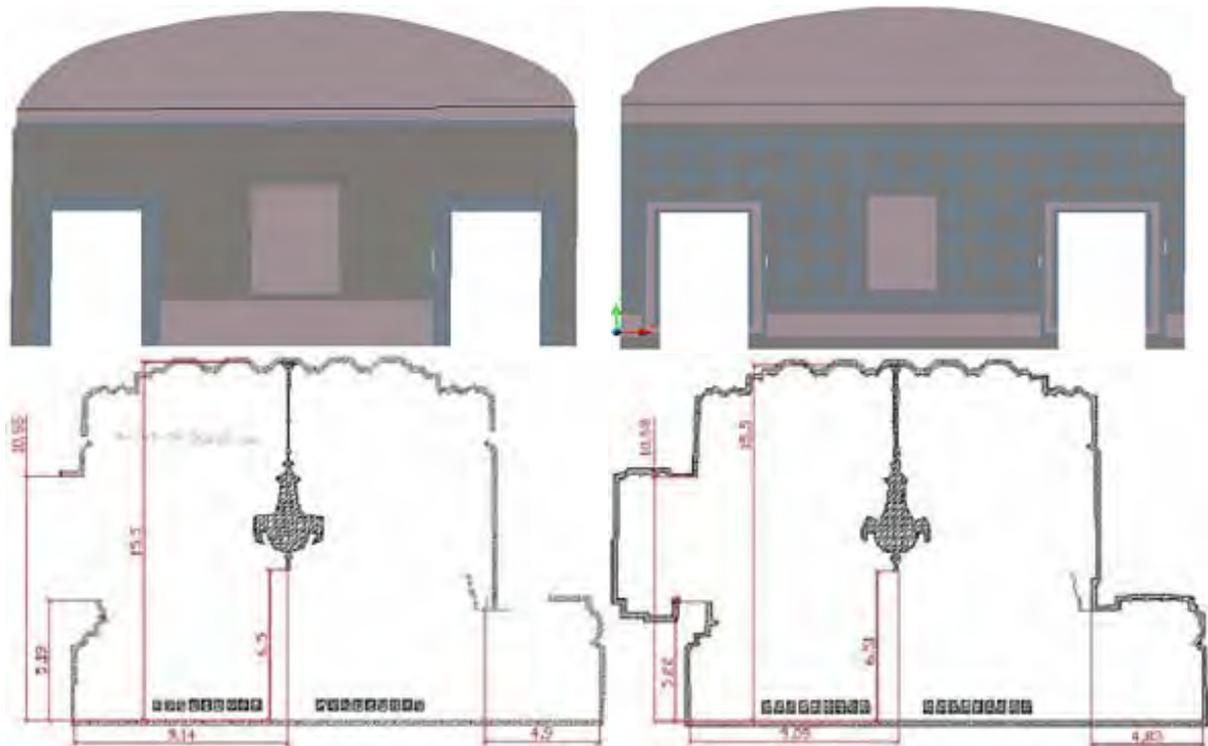


Abb. 5: Detaillierungsgrad der 2D-Konstruktion einer Wand im Kaisersaal (oben) und eines Querschnittes im Großen Festsaal (unten) konstruiert aus den Punktwolken des GS100 (links) und des IMAGER 5003 (rechts)

Der Vergleich von Strecken in den 2D-Plänen mit Referenzstrecken ergab eine durchschnittliche Abweichung von 17 mm. Im 3D-Modell einer Tür (Abb. 6) ergab die Abweichung zwischen dem CAD Modell und der Referenzstrecke durchschnittlich 10 mm.

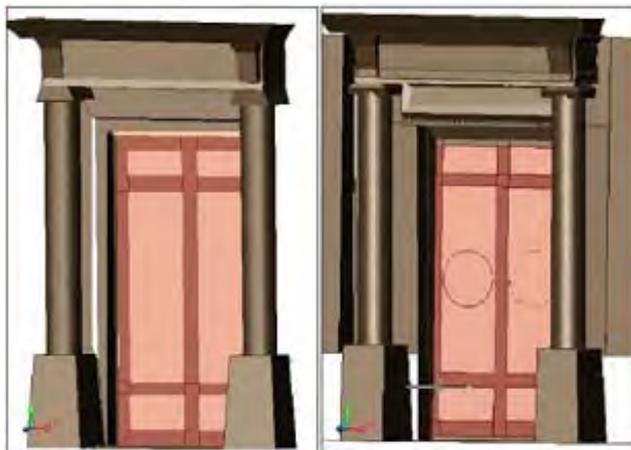


Abb. 6: Detaillierungsgrad des 3D- Modells einer Tür im Festsaal konstruiert aus den Punktwolken des GS100 (links) und des IMAGER 5003 (rechts)

Für die Auswertung der Punktwolken des IMAGER 5003 wurde nicht die LFM Modeller Software verwendet, da diese ähnlich der 3Dipsos Software von Mensi nur die Generierung von 3D-Primitiven ermöglicht. Hier wurde eine weitere Software von Zoller & Fröhlich, der LFM Server, eingesetzt. Mit dieser Software ist es möglich, Teile der Punktwolke in voller

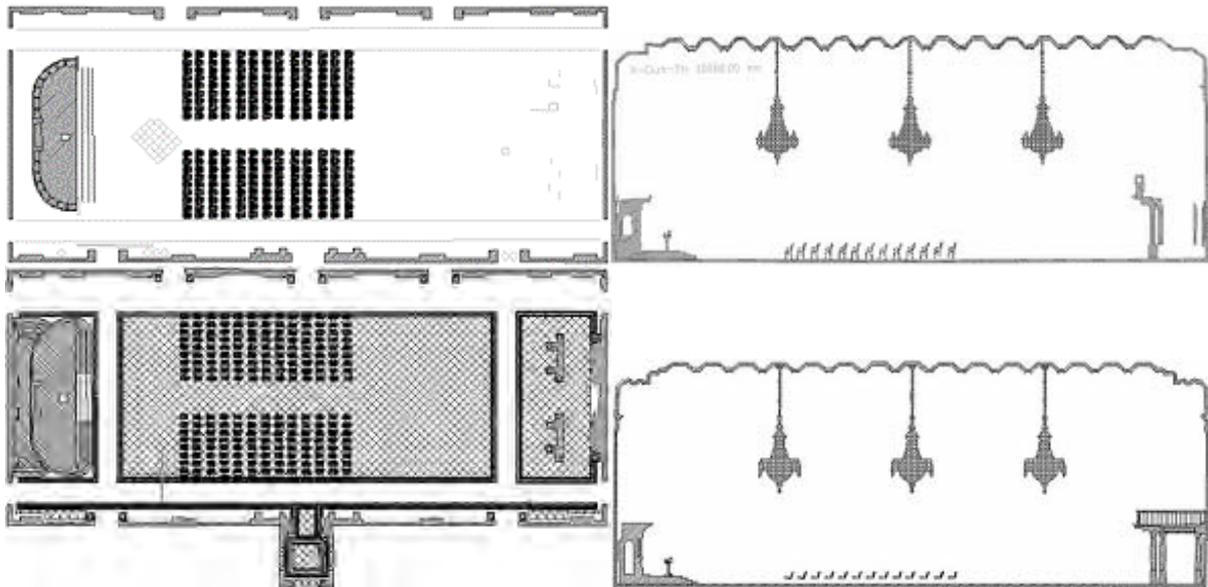


Abb. 7: Detaillierungsgrad der 3D Pläne (Grundriss und Längsschnitt) des großen Festsaaes aus den Daten des GS100 (oben) und des IMAGER 5003 (unten) konstruiert.

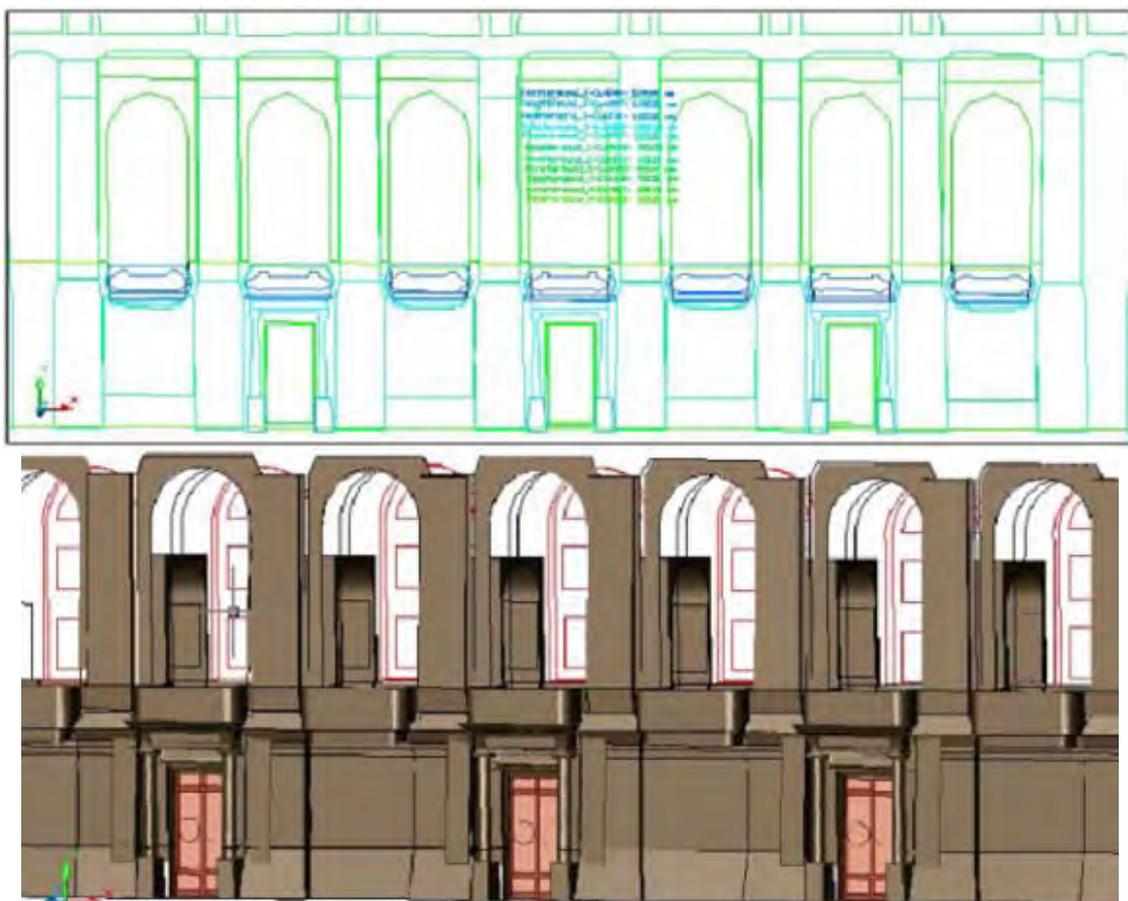


Abb. 8: Konstruktion der Seitenwand des Festsaaes: 2D-Plan mit Real Works Survey (oben) und 3D-Modell mit LFM Server und AutoCAD (unten) erstellt

Auflösung als Hintergrundbild für die Konstruktion in AutoCAD zu laden. Zur Generierung der 2D-Pläne wurden manuell Schnittebenen im LFM Server erzeugt und die gewonnene Punktwolke direkt als Hintergrund in das verbundene Programm AutoCAD übernommen. Mit diesem Modul war es gut möglich, die großen Datenmengen des IMAGER 5003 effektiv zu verwalten und zügig die 2D-Schnitte und die 3D-Modelle in AutoCAD zu erzeugen. Die Abweichungen zwischen den Referenzstrecken und den Strecken im 2D-Plan betragen durchschnittlich 13 mm. Im 3D-Modell wurden die Abweichungen mit 11 mm bestimmt.

In Abb. 7 ist deutlich zu sehen, dass die Ausarbeitungen aus den Punktwolken des IMAGER 5003 detailreicher sind, da die Punktdichte im Objekt aufgrund der größeren Standpunktzahl deutlich höher war und weniger Lücken aufgrund von Abschattungen aufwies. Des Weiteren war die Konstruktion mit dem LFM Server weniger zeitaufwändig als mit Real Works Survey. Dies führte auch dazu, dass bei der Konstruktion der Seitenwand des Festsaales mit Real Works Survey nur ein 2D-Plan erzeugt werden konnte, während es in der gleichen Bearbeitungszeit mit dem LFM Server und AutoCAD möglich war, ein 3D-Modell zu generieren (Abb. 8).

5 Vergleich der beiden Laserscanning-Systeme

Die Bearbeitungszeiten der beiden Projekte Kaisersaal und Großer Festsaal sind in Tab. 4 nach den wesentlichen Arbeitsschritten unterteilt für den Mensi GS100 und IMAGER 5003 aufgeführt.

Tab. 4: Bearbeitungszeit je Arbeitsschritt mit den Systemen Mensi GS100 und IMAGER 5003

Arbeitsschritt/Bearbeitungszeit [h]	Mensi GS100	IMAGER 5003
Scannen	3,2	2,6
3D-Netzausgleichung	4,0	4,0
Registrierung/Georeferenzierung	2,0	2,0
Datenaufbereitung, -konvertierung	0,5	2,0
Erstellung 2D-Schnitte	44,5	39,0
Erstellung 2D-Plan/3D-Modell	53,0	41,5
Zeit insgesamt [h]	107,2	91,1

Es zeigte sich in diesem Projekt, dass der Zeitaufwand für die Datenaufnahme im Verhältnis zur Datenauswertung um den Faktor 30 weit auseinander klafft. Während das Scannen im Rathaus und die anschließende Datenvorbereitung (Registrierung / Georeferenzierung, etc.) automatisiert abläuft, ist für die Erstellung von 2D-Schnitten, von Grundrissen und von 3D-Modellen sehr viel manuelle Arbeit erforderlich. Aufgrund der höheren Punktdichte und der hohen Anzahl Scannerstandpunkte (geringe Verdeckungen) konnte mit den Daten des IMAGER 5003 eine schnellere Auswertung durchgeführt werden. Daher ist die Projektbearbeitungszeit mit dem IMAGER um 15% (zwei Arbeitstage) effizienter als mit dem GS100 (siehe Tab. 4).

Der Einsatz beider Laserscanning-Systeme (Hardware und Software) wurde nach der Projektbearbeitung anhand verschiedener Beurteilungskriterien im Vergleich bewertet. Die Beurteilungskriterien für die Bewertung sind in Tab. 5 aufgeführt, wobei für jedes Kriterium eine Gewichtung und eine Benotung in Form von Punkten (1 = negativ, 2 = Durchschnitt und 3 = gut) vergeben wurde. Der erstellte Kriterienkatalog soll dabei auch die Anforderungen an eine Aufnahme und Auswertung von historischen Innenräumen berücksichtigen.

Tab. 5: Beurteilungskriterien für den Einsatz der Systeme Mensi GS100 und IMAGER 5003

Beurteilungskriterien/Bewertung	Gewicht [%]	Mensi GS100	IMAGER 5003
Sichtfeld des Scanners	10	2	3
Scanreichweite	10	3	2
Scangeschwindigkeit	10	1	3
Anzahl gescannter Punkte	10	2	3
Datenvolumen	5	3	2
Flexibilität des Systems in Innenräumen	5	2	3
Registrierung/Georeferenzierung	5	3	2
Automation in der Datenauswertung	30	1	1
Genauigkeit	5	2	2
Resultate/Produkte	10	2	2
Punktzahl gesamt	100	180	205
Punktbedeutung: 1.....negativ, 2.....Durchschnitt, 3.....gut			

Negativ werden hier in erster Linie der Automationsgrad in der Auswertung von Punktwolken bei beiden Systemen und die Scangeschwindigkeit des Mensi GS100 bewertet. Alle anderen Kriterien werden entweder mit durchschnittlich oder gut beurteilt. Insgesamt wird der IMAGER 5003 für diese Projektbearbeitung aufgrund seiner besseren Leistung beim Scannen von Innenräumen gegenüber dem GS100 mit 205 zu 180 Punkten etwas besser beurteilt.

6 Fazit und Ausblick

Die beiden eingesetzten terrestrischen Laserscanning-Systeme haben sich bei der Datenerfassung im Hamburger Rathaus und bei der Auswertung der Punktwolken für Anwendungsgebiete in Innenräumen bewährt. Trotz der nicht idealen Bedingungen beim Scannen konnten mit beiden Systemen gute Resultate in Form von 2D-Schnitten, Grundriss und 3D-Modell erzielt werden. Es zeigte sich aber auch deutlich, dass die hohe Datenmenge vom IMAGER 5003 zwar bei der Datenaufbereitung mehr Aufwand bereitete als die GS100-Punktwolken, doch durch die hohe Punktdichte und die geringeren Abschattungen konnte wesentlich detaillierter ausgewertet werden. Die Datenerfassung ist mit beiden Scannern recht einfach, doch die Auswertung der Punktwolken ist sehr komplex und zeitaufwendig (bis zu einem Verhältnis von 1:30 für Aufnahme/Auswertung). Daher ist es sehr wichtig, bei einem Laserscanning-System sowohl die Hardware als auch die Software für bevorstehende Anwendungen in Betracht zu ziehen. Somit zeigte sich auch in diesem Projekt, dass es keinen Scanner für alle Anwendungen gibt, sondern eher für jede Anwendung einen speziellen Scanner. In diesem Projekt hat sich der IMAGER 5003 als flexibler und geeigneter erwiesen, da die Punktdichte und die vielen Standpunkte in kurzer Zeit eine bessere Auswertung ermöglichen. Generell ist 3D-Laserscanning eine innovative Technologie, deren Einsatz gerade auch in der Denkmalpflege ein hohes Potenzial aufweist.

Durch eine hohe Automatisierung der Auswerteprozesse werden Laserscanning-Systeme in Zukunft eine zunehmende Akzeptanz im Markt erreichen. Die Systeme werden auch schneller, genauer, handlicher und hoffentlich auch günstiger werden. Eine Datenfusion von hochauflösenden Digitalkameras mit Punktwolken für Visualisierungs- und Interpretationsaufgaben scheint daher auch eine konsequente Weiterentwicklung der Systeme darzustellen.

7 Dank

Die Autoren bedanken sich bei Dipl.-Ing. K. Mechelke, Dipl.-Ing. C. Acevedo Pardo (beide HAW Hamburg), Dipl.-Ing. S. Kruse und Dipl.-Ing. J. Soumagne (beide Ingenieurbüro Dr. Wesemann, Bochum/Hamburg) für die Datenerfassung im Hamburger Rathaus.

8 Literaturverzeichnis

- DÜPPE, R.-D. & KLEIN, B., 2005: Blockausgleichung mit Flächen für Laserpunktewolken. Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik – Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2005, Th. Luhmann (Hrsg.), Wichmann Verlag, Heidelberg, pp. 266-277.
- KERSTEN, TH., STERNBERG, H., MECHELKE, K. & ACEVEDO PARDO, C., 2004: Terrestrischer Laserscanner Mensi GS100/GS200 – Untersuchungen und Projekte an der HAW Hamburg. Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik – Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2004, Th. Luhmann (Hrsg.), Wichmann Verlag, Heidelberg, pp. 98-107.
- LORRA, K. & JAEGER, R. R., 2004: Laserscanner können Tatortarbeit revolutionieren. Der Kriminalist 12/2004, pp. 479-484.
- STERNBERG, H., KERSTEN, TH. & CONSEIL, N., 2005: Untersuchungen des terrestrischen Laserscanners Mensi GS100 - Einfluss unterschiedlicher Oberflächeneigenschaften auf die Punktbestimmung. Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik – Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2005, Th. Luhmann (Hrsg.), Wichmann Verlag, Heidelberg, pp. 56-65.
- STRACKENBROCK, B., 2004: Visualization of "Thronsaal Neuschwanstein" with scanner and panorama camera. IAPRS, Vol. XXXIV, PART 5/W16, Editors H.-G. Maas & D. Schneider, Proceedings of the ISPRS working group V/1 'Panoramic Photogrammetry Workshop', Dresden, Germany, February 19-22, 2004, <http://www.tu-dresden.de/fghgipf/photo/PanoramicPhotogrammetryWorkshop2004/Proceedings.htm>

Simulationsbasiertes Systemdesign für die optische Messtechnik nach VDI/VDE 2634

HEIDI HASTEDT, THOMAS LUHMANN & WERNER TECKLENBURG¹

Zusammenfassung: Die Abnahme und Überwachung optischer Messsysteme basierend auf der VDI/VDE Richtlinie 2634 findet zunehmend Anwendung. Die geforderten Messgenauigkeiten werden bereits nachgewiesen und reproduziert. Wissenschaftliche Untersuchungen zeigen dennoch Unsicherheiten in den Ergebnissen auf, die nicht eindeutig spezifiziert werden können. Längenabhängige Restunsicherheiten in den Längenmessabweichungen nach VDI/VDE 2634 werfen Fragen nach ihrer Herkunft auf, denen mit diesem Beitrag Rechnung getragen werden soll. Verschiedene Aspekte des Systemdesigns wurden dazu zur theoretischen Abschätzung und Optimierung in ein Simulationsverfahren integriert. Die Ergebnisse werden mit diesem Beitrag vorgestellt.

1 Einleitung

Die Entwicklung und Nutzung hochgenauer optischer Messsysteme steigt mit dem Anspruch an hohem Genauigkeitsniveau und Automationsgrad. Die Nachfrage besteht zunehmend in industriellen Anwendungsbereichen. Mit dem Einsatz dieser optischen Messsysteme, vor allem in der Industrie, bedarf es der Abnahme und Überwachung der Systeme anhand einer einheitlichen Richtlinie. Hierzu wurde die VDI/VDE Richtlinie 2634 (VDI 2002) für punktförmig und flächenhaft antastende optische Messsysteme, entsprechend unterteilt in Blatt 1 und 2, erstellt.

Die richtlinienbasierte Abnahme und Überwachung der auf dem Markt befindlichen optischen Messsysteme wird zunehmend bei Herstellern und Anwendern dieser Messsysteme eingesetzt. Hierzu werden an verschiedenen Stellen entsprechende Testkörper anhand der Vorgaben der Richtlinie konstruiert und installiert. Zur Gewährleistung der Rückführbarkeit sind hierzu entsprechend kalibrierte Sollstrecken integriert, die die Grundlage des Abnahmekriteriums, der Längenmessabweichung, bilden. Die geforderten Genauigkeiten der Messsysteme werden bereits nachgewiesen und reproduziert.

Wissenschaftliche Untersuchungen zeigen dennoch Restfehler auf, die nicht eindeutig spezifizierbar sind. Die Unsicherheiten können zurückgeführt werden auf Wechselwirkungen der unterschiedlichen Einflussfaktoren (Messsystem, Messumgebung, Temperatur, uvm.). Diese Faktoren sind in praktischen Versuchen nicht unabhängig nachweisbar. Untersuchungen zum Einfluss der Kameraparameter und der Bildmessgenauigkeit auf die Kalibrierung und Auswertung geben bereits Aufschluss über die Größe und Auswirkung des jeweiligen Parameters (HASTEDT et al., 2004).

Längenabhängige Restunsicherheiten in den Längenmessabweichungen nach VDI/VDE 2634 werfen weiterhin Fragen nach ihrer Herkunft auf. Diese längenabhängigen Restunsicherhei-

¹ Fachhochschule Oldenburg/Ostfr./Whv., Institut für Photogrammetrie und Geoinformatik, Ofener Str. 16, 26121 Oldenburg, Tel. 0441-7708-xxxx
Dipl.-Ing. (FH) Heidi Hastedt, phone: 3364, email: heidi.hastedt@fh-oldenburg.de
Prof. Dr.-Ing. Thomas Luhmann, phone: 3172, email: luhmann@fh-oldenburg.de
Dipl.-Ing. Werner Tecklenburg, phone: 3164, email: tecklenburg@fh-oldenburg.de

ten ergeben sich im Vergleich von photogrammetrisch erfassten Daten, d.h. der Bezug zu einer absoluten Referenz ist dabei noch nicht näher untersucht worden. Weiterführende Untersuchungen wurden diesbezüglich auf das Systemdesign durchgeführt. Die wesentlichen Faktoren des Systemdesigns (Datum, Konfiguration, Gewichtung) (FRASER, 1996) wurden zur theoretischen Abschätzung und Verifizierung in ein Simulationsverfahren (HASTEDT, 2004) integriert. Ein Bestandteil der Untersuchungen stellt die Analyse der Aufnahmeconfiguration (Standpunktlage, Anzahl Bilder) durch Voll- und Teilverbände dar sowie die Auswirkung verschiedener Systemfestlegungen durch Datumspunkte und Systemmaßstäbe. Die Ergebnisse der simulationsbasierten Untersuchungen werden in diesem Beitrag vorgestellt.

2 Definitionen

2.1 Simulationsverfahren

Das Simulationsverfahren für die Untersuchungen basiert auf der Datengrundlage realer Datensätze. Diese sind Kalibrierdatensätze, die nach einem bekannten Aufnahmeverfahren (WESTER-EBBINGHAUS, 1985) anhand eines Testkörpers auf Grundlage der VDI/VDE Richtlinie 2634 erstellt wurden. Es werden innerhalb des Simulationsprozesses quasi reale Datensätze generiert.

Das Verfahren basiert auf der Monte-Carlo-Methode (MCM) (ROBERT & CASELLA, 2002) und kann in verschiedene Arbeitsschritte gegliedert werden. Die Formulierungsphase konzentriert sich auf die Wahl der Modell- und Wahrscheinlichkeitsfunktion. Die zweite Phase bildet als Berechnungsphase den Kern der Simulation nach MCM. Die Arbeitsschritte und die Bereitstellung geeigneter t-verteilter Zufallszahlen folgen den in COX et al. (2001, 2004) dargelegten Funktionen und Verfahren. Eine ausführliche Erläuterung des Simulationsverfahrens und der Implementierung ist gegeben in HASTEDT (2004).

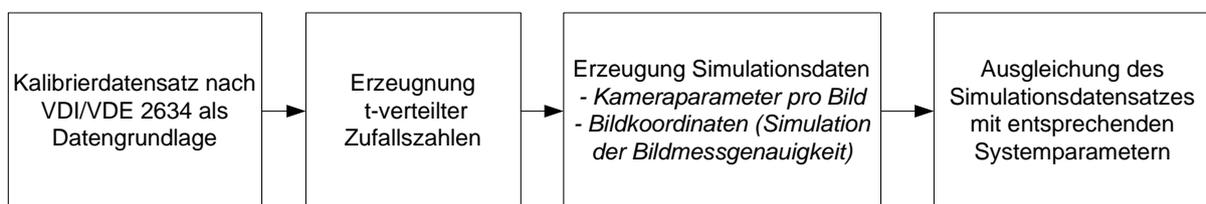


Abb. 1: Ablaufdiagramm Simulationsverfahren

Das in Abb. 1 dargestellte Ablaufdiagramm zeigt vereinfacht den Simulationsprozess für eine von M Simulationen. Die Simulationsdaten (Kameraparameter, Bildmessungen) werden nach (1) erzeugt.

$$P_{(rm)} = P_{(iv)} + (tRNG * s_p) \quad (1)$$

$P_{(rm)}$ veränderter Parameter durch Simulation

$P_{(iv)}$ Eingabewert des Parameters

$tRNG$ t-verteilte Zufallszahl

s_p Standardabweichung des Parameters

2.2 Systemdesign

Das Systemdesign eines photogrammetrischen Datensatzes bildet eine wichtige Grundlage in der Aufnahmeplanung und Erfüllung der gesetzten Spezifikationen. Das Systemdesign bein-

haltet verschiedene in Wechselbeziehung stehende Probleme, die im Falle der Nahbereichsphotogrammetrie in drei Teilbereiche gegliedert werden können (FRASER, 1984):

- Zero-Order-Design – ZOD: Datum
- First-Order-Design – FOD: Konfiguration
- Second-Order-Design – SOD: Gewichtung

Diese Stufen des Systemdesigns werden in der Bündelausgleichung mit Selbstkalibrierung mit entsprechenden Parametern eingeführt.

ZOD

Die Datumsfestlegung muss mindestens die 7 Unbekannten der Systemfestlegung lösen. Grundlegendes Interesse besteht zumeist an der Genauigkeit der XYZ-Koordinaten und der enthaltenen Bedingungen, wie beispielsweise Maßstab (FRASER, 1996). In der Regel wird eine freie Netzausgleichung mit Lagerung auf allen Objektpunkten oder einem definierten Teil dieser durchgeführt. Ggf. erfolgt die Integration von einem oder mehreren Systemmaßstäben.

FOD

In der Nahbereichsphotogrammetrie ist es das Ziel eine geeignete Aufnahmekonfiguration für ein gegebenes Objekt und das geforderte Auswertergebnis zu finden. Die Aufnahmekonfiguration ergibt sich aus verschiedenen Teilkomponenten, wie z.B. Standpunktwahl, Anzahl Standpunkte, Mehrfach-Erfassung (d.h. mehrere nahezu gleiche Bilder pro Standpunkt), Schnittwinkel, Kantungen, verfügbare Objektpunkte, Bildmaßstab, Kamerakonstante. Mit einer Erhöhung der Anzahl der Kamerastandpunkte erzielt man bei einer guten Konfiguration keine höheren Genauigkeiten, aber eine stärkere Zuverlässigkeit. Eine Erhöhung der Bildanzahl pro Standpunkt wirkt sich hingegen genauigkeitssteigernd aus. Dies führt zu einer Skalierung der Gewichtsmatrix P , einer Komponente des SOD (FRASER, 1984). Ein Indikator für die Systemgenauigkeit bildet die Objektpunktgenauigkeit s_{XYZ} , berechnet nach (2) mit k Anzahl Bilder pro Standpunkt (FRASER, 1996).

$$s_{XYZ} = \frac{q}{\sqrt{k}} m_b s_{x'} \quad (2)$$

SOD

Die Gewichtung in der Bündelausgleichung beinhaltet die Optimierung von $s_{x'}$, der Bildmessgenauigkeit. Die Verbesserung von $s_{x'}$ kann u.a. durch Mehrfach-Erfassung erzielt werden.

2.3 VDI/VDE Richtlinie

Die VDI/VDE Richtlinie 2634, Blatt 1 regelt die Abnahme und Überwachung optischer 3D Messsysteme mit punktförmiger Antastung. In der Richtlinie wird die Anordnung der Testlängen (Abb. 2) empfohlen. Es sollten mindestens 5 Testlängen pro Messlinie (bei mindestens 7 Messlinien) im Testobjekt spezifiziert sein. Die Punkte der Messlinien müssen als Unbekannte in die Ausgleichung eingeführt werden. Die Qualität der Bündelausgleichung wird angegeben mit der Längenmessabweichung (LME) als Funktion aus der Subtraktion von kalibrierter Sollstrecke und gemessener Strecke (als Funktion der ausgeglichenen Objektkoordinaten).

Die Längenmessabweichungen werden zur Anschauung in Abhängigkeit zur Sollstrecke in einem Diagramm dargestellt (Abb. 3), eine längenabhängige Restunsicherheit der LME wird

im folgenden als Trend bezeichnet. Der Trend ist der Regressionskoeffizient aller LME bei der Bedingung $b = 0$ mit $y = mx + b$ für die Regressionsgerade (Trendlinie).

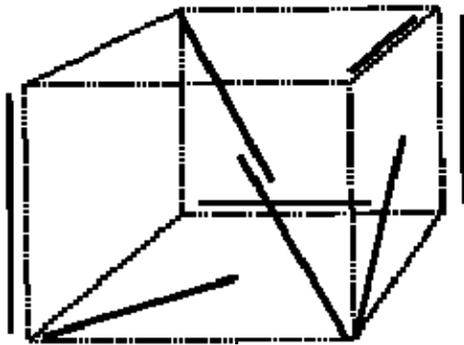


Abb. 2: Anordnung der Testlängen nach VDI/VDE 2634

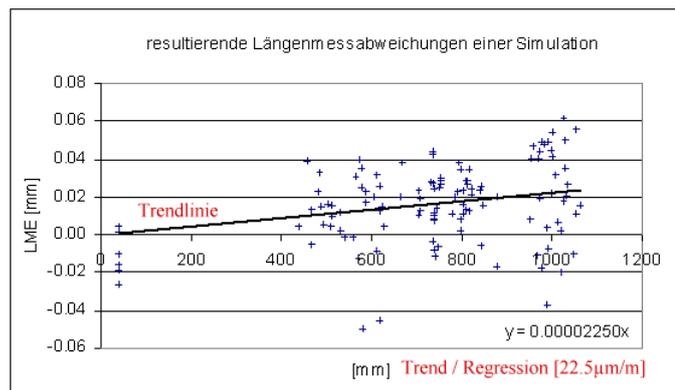


Abb. 3: Diagramm Längenmessabweichung

3 Untersuchungen und Ergebnisse

Für die Untersuchungen werden die in Tab. 1 aufgelisteten Datensätze als Simulationsgrundlage und damit als Näherungswerte für die Bündelausgleichung hinzugezogen. Es wurden jeweils 200 Simulationen pro Untersuchungsschritt, wobei die Simulationsdaten nach (1) lediglich Werte bis 3 Sigma annehmen, durchgeführt. Abb. 4 zeigt die Objektpunktwolke des Testkörpers, die die Datensätze abbilden.

Tab. 1: Übersicht der Simulationsdatensätze

ID	Datensatz	c [mm]	Anzahl Bilder Vollverband	Anzahl gekantete Bilder			Standpunkthöhen
				Kantung	Bilder je Kantung	% aller Bilder	
1	DCS645M	35	60	$\pm 90^\circ$	16	10	L1 \approx 2.0m L2 \approx 1.5m L3 \approx 0.4m
				180°	4	2.5	
2	DCS645M	35	54	$\pm 90^\circ$	15	8	
				180°	4	2.1	
3	Fuji S1 Pro	28	85	$\pm 90^\circ$	24	20	
				180°	11	9	

Zur Beurteilung werden im Allgemeinen die Längenmessabweichungen (LME), deren RMS_{LME} -Werte (3) sowie die resultierenden Trends (s. 2.3) der Simulationsergebnisse zum Ausgangsdatsatz betrachtet.

$$RMS_{LME} = \sqrt{\frac{\sum l^2}{n}} \quad (3)$$

Zur Zeit wird ausschließlich das photogrammetrische System betrachtet (mit der Einschränkung eingeführter unabhängig kalibrierter Systemmaßstäbe), d.h. die LME ergeben sich im Vergleich von photogrammetrisch erfassten Daten ohne Bezug zu einer absoluten Referenz. Die quadratische Markierung in Abb. 4 zeigt die Lage der Punkte (LME-Punkte), die zur Bestimmung der Längenmessabweichungen verwendet werden.

Zur Bestimmung von Einflüssen unterschiedlichen Systemdesigns wurden verschiedene Konfigurationen getestet und Bedingungen in die Bündelausgleichung eingeführt:

ZOD	<ul style="list-style-type: none"> • Gesamtpurminimierung mit Rangdefekt 6 und 7 (Systemmaßstäbe in den drei Koordinatenrichtungen) • Teilspurminimierung mit Rangdefekt 6 und 7
FOD	<ul style="list-style-type: none"> • Vollverband • Halbverband mit 35 Bildern • Teilverband ohne 180° Bilder und Hälfte an $\pm 90^\circ$ Bildern • Teilverband ohne L3 (Standpunkthöhe) • Simulation von Kugeltargets für Systemmaßstäbe
SOD	<ul style="list-style-type: none"> • Mehrfach-Erfassung mit Simulation von 5 Bildern pro Standpunkt

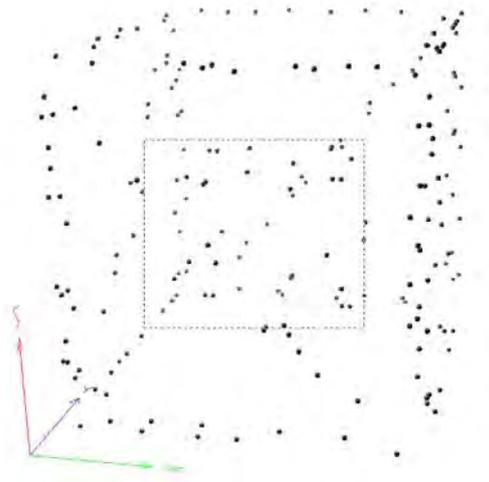


Abb. 4: Punktwolke aller Objektpunkte

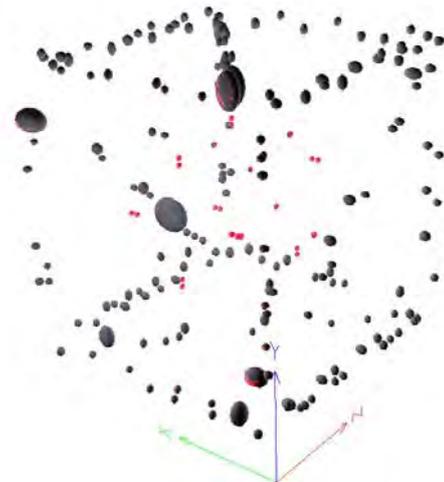


Abb. 5: Fehlerellipsoiddarstellung (hier Überlagerung verschiedener Datumsfestlegungen)

3.1 Untersuchung der Datumsfestlegung

Für die aufgeführten Datensätze wurden zum Einen der Einfluss von Systemmaßstäben untersucht. Hierzu ist jeweils nur ein Maßstab (in X, Y der Z-Koordinatenrichtung) als Systemmaßstab bei einer Gesamtpurminimierung festgelegt, zusätzlich wurde die Festlegung des Systemmaßstabes über alle drei Maßstäbe gelöst. Im Vergleich dazu wurde das System mit Rangdefekt (r) 7 bestimmt, einschränkend muss hier erwähnt werden, dass die Näherungswerte für die Ausgleichung den Systemmaßstäben unterliegen. Die Ergebnisse sind in Tab. 2 zusammengefasst.

Die Resultate zeigen, dass sich die Trends für die einzelnen Koordinatenrichtungen kaum unterscheiden. Mit der Maßstabsfestlegung in allen drei Richtungen optimiert sich das Gesamtsystem zu $< \pm 50 \mu\text{m}/\text{m}$ längenabhängiger Restunsicherheit bei RMS_{LME} -Werten $< 40 \mu\text{m}$.

Im Vergleich zur Systemlagerung auf allen Objektpunkten wurde eine Teilspurminimierung mit Lagerung auf den LME-Punkten durchgeführt. Hierbei bestätigt sich die Theorie, dass bei der Lagerung auf die LME-Punkte bei einem Rangdefekt $r = 7$ ein Trend von etwa $2.5 \mu\text{m}/\text{m}$ verbleibt. Somit hat die Bestimmungsgenauigkeit der Maßstabspunkte bzw. die Übertragung auf die Näherungswerte durch die Photogrammetrie einen so signifikanten Einfluss, dass sich ein Trend nicht eindeutig eliminieren bzw. kontrollieren lässt. Eine Maßstabsfestlegung in Kombination mit der Teilspurminimierung ergibt den gleichen Trend wie bei der Gesamtpurminimierung.

Abb. 5 zeigt hierbei in Form einer Fehlerellipsendarstellung den Einfluss auf die Genauigkeit der Objektpunkte bei unterschiedlicher Systemfestlegung. Die helleren (bzw. roten) Ellipsen in der Systemmitte basieren auf der Systemlösung mittels Gesamtpurminimierung.

Tab. 2: Ergebnisübersicht Datumsfestlegung

ID		1	2	3
MX	Trend [$\mu\text{m}/\text{m}$]	± 75	± 75	-
	RMS _{LME} [mm]	0.01 – 0.07	0.015 – 0.06	-
MY	Trend [$\mu\text{m}/\text{m}$]	± 75	± 75	± 70
	RMS _{LME} [mm]	0.01 – 0.07	0.015 – 0.07	0.01 – 0.06
MZ	Trend [$\mu\text{m}/\text{m}$]	± 45	± 60	± 70
	RMS _{LME} [mm]	0.01 – 0.05	0.015 0.05	0.01 – 0.07
MXYZ	Trend [$\mu\text{m}/\text{m}$]	± 45	± 40	± 50
	RMS _{LME} [mm]	0.01 – 0.04	0.015 – 0.04	0.01 0.04
r7	Trend [$\mu\text{m}/\text{m}$]	± 30	± 30	± 25
	RMS _{LME} [mm]	0.005 – 0.016	0.01 – 0.03	0.01 – 0.025

3.2 Untersuchungen zur Konfiguration

Im Vergleich zur Auswertung eines Vollverbandes wurden ebenfalls abweichende Konfigurationen des Datensatzes 1 (s. Tab.1) mit Hilfe des Simulationsverfahrens getestet. Die Ergebnisse sind in Tab. 3 zusammengefasst.

Tab. 3: Ergebnisübersicht Konfiguration

ID	Spezifikation (r = 6 mit Systemmaßstab XYZ)	Anzahl Bilder	Trend [$\mu\text{m}/\text{m}$]	RMS _{LME} [mm]
1a	Vollverband (Abb. 6)	60	± 45	0.01 – 0.04
1b	Halbverband (Abb. 7)	32	± 65	0.01 – 0.06
1c	Teilverband [keine 180° gekantete Bilder und 8 Bilder mit Kantung $\pm 90^\circ$]	48	± 70	0.01 – 0.07
1d	Teilverband [keine Bilder aus Standpunkthöhe $\approx 0.4\text{m}$]	52	± 50	0.01 – 0.05

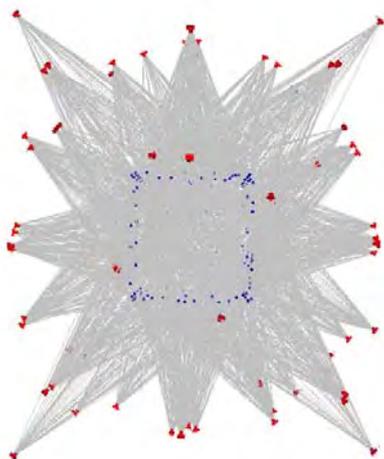


Abb. 6: Vollverband

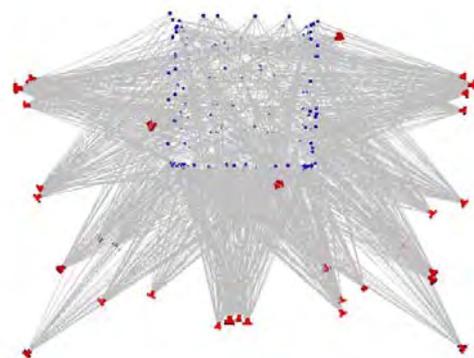


Abb. 7: Halbverband

Die Trends zeigen deutlich die Verschlechterung des Systems bei der Erfassung durch einen Halbverband (Abb. 7). Aufgrund der Erfassung der LME-Punkte ohne Rundumverband verschlechtert sich die Genauigkeit des Ergebnisses, hierbei auch als Einfluss auf die längenab-

hängige Restunsicherheit. Der Trend über alle Simulationen steigt um $\pm 20\mu\text{m}/\text{m}$, die RMS_{LME} -Werte pro Simulation steigen entsprechend an.

Eine Verdopplung der Restunsicherheit, d.h. eine signifikante Verschlechterung des Ergebnisses, ergibt sich bei einem Bildverband mit wenigen gekanteten Bildern. In diesem Fall wurde die Hälfte aller $\pm 90^\circ$ gekanteten und alle 180° gekanteten Bilder in der Ausgleichung ignoriert. Zur Stabilisierung und genaueren Auflösung des Gleichungssystems sind demzufolge gekantete Aufnahmen $>10\%$ aller Bilder erforderlich.

Die Aufnahmen der Standpunkthöhe $\approx 0.4\text{m}$ hingegen haben keinen sichtbaren Einfluss auf das Ergebnis.

Im Hinblick auf den signifikanten Einfluss der Maßstabspunkte wurden Aufnahmesituationen simuliert, die alle Maßstabspunkte in allen Bildern abbilden. Damit kann die Verwendung von Kugeltargets an Systemmaßstäben simuliert werden. Es ergaben sich keine Änderungen bei den Simulationsergebnissen. Es kann angenommen werden, dass die Erfassung eines Maßstabpunktes in etwa 5% aller Bilder, unter Annahme guter Strahlenschnitte, ausreichend ist.

3.3 Untersuchung der Gewichtung

Unter Berücksichtigung einer Mehrfach-Erfassung pro Standpunkt, in diesem Fall einer Simulation von 5 Bildern pro Kamerastandpunkt, konnte erwartungsgemäß eine Genauigkeitssteigerung erzielt werden. Für die hier betrachteten Datensätze liegen die Parameter $m_b = 60$, $q = 0.7$ und $s_x = 0.6\mu\text{m}$ vor und ergeben nach (3) eine zu erwartende Genauigkeit von $s_{XYZ} = 0.0252\text{mm}$ für $k = 1$ sowie $s_{XYZ} = 0.0113\text{mm}$ für $k = 5$. Der Theorie folgend ergeben sich diese Genauigkeiten aus den Simulationsdaten nur geringfügig ($2\mu\text{m}$) schlechter. Mit der höheren Genauigkeit der Objektpunkte durch die Bündelausgleichung ergeben sich nur noch Trends von $\pm 20\mu\text{m}/\text{m}$ mit entsprechend geringeren RMS_{LME} -Werten von $0.005 - 0.02\text{mm}$, das entspricht einer Minimierung der Restunsicherheit von 200%. Dieses Ergebnis bezieht sich auf eine Gesamtspurminimierung mit drei festgelegten Systemmaßstäben. Bei der Ergebnisbetrachtung der Bündelausgleichung mit jeweils einem Systemmaßstab zeigt sich ebenfalls eine Ergebnisverbesserung um Faktor 2.

4 Zusammenfassung

Längenabhängige Restunsicherheiten in den Längenmessabweichungen von Simulationsreihen untereinander wurden in diesem Beitrag hinsichtlich des Systemdesigns analysiert. Hierzu wurde ein bekanntes Simulationsverfahren mit unterschiedlichen Systemparametern verwendet.

Unter Berücksichtigung verschiedener Systemmaßstäbe konnte gezeigt werden, dass das Ergebnis einer photogrammetrischen Auswertung durch Maßstabsfestlegung in allen drei Koordinatenrichtungen optimiert werden kann hinsichtlich Reproduzierbarkeit und Vergleichbarkeit von Datensätzen. Der signifikante Einfluss der in der Regel schlechter bestimmten Maßstabsstrecken aus der Ausgleichung im Vergleich zu unabhängig kalibrierten Längen bestimmt den verbleibenden Trend.

Die Objekterfassung durch einen Halbverband verschlechtert das Ergebnis. Ebenso verhält es sich bei der Erfassung durch zu wenig gekantete Bilder. Etwa 10% aller Bilder sollten eine Kantung $>\pm 90^\circ$ unterliegen. Im Bezug auf die Bestimmung von Maßstabspunkten kann zu-

sammenfassend vermerkt werden, dass ein Maßstabspunkt durch Abbildung in etwa 5% aller Bilder, gute Schnitte vorausgesetzt, ausreichend bestimmbar ist.

Abschließend wird empfohlen für Kalibrierungen und Auswertungen eine Mehrfach-Erfassung durchzuführen. Eine Steigerung der Genauigkeit und Zuverlässigkeit ist hiermit durch nur gering höheren Aufwand möglich, sofern automatische Mess- und Auswertalgorithmen eingesetzt werden können.

Literaturverzeichnis

- COX, M. G., DAINTON, M. P. & HARRIS, P. M., 2001: Software Specifications for Uncertainty Calculation and Associated Statistical Analysis; NPL Report CMSC 10/01
- COX, M. G. & DAINTON, M. P., 2004: Software Specifications for Uncertainty Evaluation; NPL Report CMSC 40/04 (CMSC 10/01 revised)
- FRASER, C.S., 1984: Network Design Considerations for Non-Topographic Photogrammetry; PE&RS Vol. 50, No. 8, pages 1115 - 1125
- FRASER, C.S., 1996: Network design. In: Close Range Photogrammetry and Machine Vision, pages 256 – 281, Edited by K.B. Atkinson, WHITTLES Publishing
- HASTEDT, H., LUHMANN, T. & TECKLENBURG, W., 2004: Bestimmung von Einflussgrößen in der Nahbereichsphotogrammetrie mittels Monte-Carlo-Simulation, Publikationen der DGPF, Band 13, S. 359-366
- HASTEDT, H., 2004: Monte-Carlo-Simulation in Close-Range Photogrammetry, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science, Vol. 35, part B5, pages 18 – 23
- ROBERT, C. P. & CASELLA, G., 2002: Monte Carlo Statistical Methods; Springer-Verlag
- VDI/VDE 2634, BLATT 1, 2002: Optische 3D-Messsysteme – Bildgebende Systeme mit punktförmiger Antastung, VDI/VDE-Handbuch Messtechnik II
- WESTER-EBBINGHAUS, W., 1985: Verfahren zur Feldkalibrierung von photogrammetrischen Aufnahmekammern im Nahbereich. In Kupfer/Wester-Ebbinghaus (ed.): Kammerkalibrierung in der photogrammetrischen Praxis, Deutsche Geodätische Kommission, Reihe B, Heft Nr. 275, S. 106 - 114

Vergleich digitaler Aufnahmesysteme am Beispiel der Formkontrolle industrieller Bauteile

HEINZ-JÜRGEN PRZYBILLA¹ & JÜRGEN PEIPE²

Zusammenfassung: Digitale Aufnahmesysteme dominieren heute die Messprozesse in der Nahbereichsphotogrammetrie. Da der Markt der Kamerahersteller keine tatsächlichen Messkameras zur Verfügung stellt, müssen geeignete Aufnahme- und Kalibrierstrategien zur Prozess-Modellierung eingesetzt werden. An einem Beispiel werden unterschiedliche Vorgehensweisen aufgezeigt.

1 Einleitung

Im Rahmen industrieller Fertigungsprozesse sind darin eingebundene Maschinen(-teile) oftmals erheblichen Materialbelastungen ausgesetzt. Druckkräfte und thermische Veränderungen einerseits, sowie die geforderte Präzision in der Produktfertigung andererseits, stellen hohe Anforderungen an ihre Formstabilität.

Eine Formkontrolle derartiger Bauteile lässt sich vorteilhaft mit photogrammetrischen Messmitteln durchführen. Einen variablen Parameter in einem standardisierten Aufnahme-konzept stellt das verfügbare Kamerasystem dar. Neben dem etablierten, aber zwischenzeitlich „in die Jahre gekommenen“ System Kodak DCS 460 wurden im Rahmen von Vergleichsmessungen zwei – zum Zeitpunkt der Messungen (Anfang 2005) – neuere Sensorsysteme eingesetzt:

- Kodak DCS Pro SLR/n
- Rolleiflex 6008 mit 16 MB Digitalrückteil (H20) von PhaseOne (PHASEONE 2005)



Abb. 1 Kodak Pro SLR/n



Abb. 2 Rolleiflex db44metric

Während das System Kodak DCS Pro SLR/n (Abb. 1) als eine Weiterentwicklung der DCS-Baureihe angesehen werden kann, stellt die Rolleiflex 6008 mit dem PhaseOne-Digitalrückteil (auch als db44metric bezeichnet, Abb. 2) einen Entwicklungsschritt zu den aktuellen Aerial Industrial Camera (AIC) Systemen „integral“ und „modular“ dar (ROLLEI 2005). Als „kabelgebundenes“ System – der Datentransfer erfolgt über eine Firewire-Verbindung zum

¹ Prof. Dr.-Ing. Heinz-Jürgen Przybilla, Fachhochschule Bochum, Fachbereich Vermessungswesen und Geoinformatik, Lennerhofstr. 140, 44801 Bochum, e-mail: przybilla@uni-essen.de

² Dipl.-Ing. Jürgen Peipe, Universität der Bundeswehr München, Werner-Heisenberg-Weg 39, 85577 Neubiberg, e-mail: j-k.peipe@unibw-muenchen.de

angeschlossenen Notebook – liegt der Einsatzschwerpunkt der Kamera bisher in stationärer Installation (Luftbildbereich). Grundsätzlich sind industrielle Anwendungen jedoch möglich.

2 Testmessungen

Eine bewährte Vorgehensweise zur Erfassung räumlicher Objekte stellt die Aufnahme eines photogrammetrischen Rundum-Bildverbandes dar. Der Bildverband, ergänzt um geeignete, räumlich verteilte Maßstabsinformation wird in der Regel im Rahmen einer frei gelagerten Bündelblockausgleichung orientiert. Die innere Orientierung der Aufnahmekamera wird i. A. als konstant für die Dauer der Aufnahme angesetzt; zwecks Selbstkalibrierung ist der Verband um gekantete Aufnahmen zu ergänzen. GODDING (1993) empfiehlt dabei „während der Aufnahme nicht die Kamera zu bewegen, sondern das Testfeld“ (Objekt). Dieser Empfehlung kann unter Praxisbedingungen i. A. nicht Folge geleistet werden, so dass gekantete Aufnahmen ausschließlich durch Wälzung der Kamera erstellt werden. Auf Grund federnd angebrachter Bildsensoren sowie mechanischem Spiel bei der Adaption des Objektivs an das Kameragehäuse gehen damit Veränderungen der Lage des Projektionszentrums im Bildraum einher (MAAS 1999). Die daraus resultierenden Modelldeformationen können durch erweiterte funktionale Ansätze zur Kameramodellierung (MAAS 1999, TECKLENBURG & LUHMANN 2001) deutlich reduziert werden. Voraussetzung ist jedoch die Integration derartiger Ansätze in das entsprechende Bündelausgleichungsprogramm.

Um die generelle Eignung der Kameras für die Messaufgabe zu prüfen, wurden verschiedene Testmessungen durchgeführt. Diese erfolgten an einem konkreten Messobjekt auf Basis eines Rundum-Bildverbandes sowie an einem räumlich gegliederten Testfeld bei frontaler Aufnahmeanordnung. Der Umfang der Testreihen ist in Tabelle 1 dokumentiert.

Tab.1 Messreihen

Kantung der Kamera	Kodak DCS Pro SLR/n	Kodak DCS 460	Rolleiflex 6008 mit 16 MB Digitalrückteil (H20)
	Bildanzahl	Bildanzahl	Bildanzahl
Testfeld (frontale Aufnahmeanordnung)			
0 Gon	11	-	9
100 Gon	1	-	9
300 Gon	1	-	9
200 Gon	1	-	9
Messobjekt (Rundum-Bildverband)			
0 Gon	16	16	16
100 Gon	3	3	3
300 Gon	3	3	3
200 Gon	2	2	2

3 Auswertung

3.1 Bestimmbarkeit der inneren Orientierung

Die Auswertung der Testmessungen erfolgte mit dem Bündelausgleichungsprogramm CAP (KOTOWSKI, 1996). Der gewählte Ansatz für die innere Orientierung umfasst neben der Kamerakonstante die Lage des Bildhauptpunktes, radial-symmetrische Verzeichnung, Affini-

täts- und Nicht-Orthogonalitätsparameter (soweit dies durch die Orientierung der Kamera bei der Aufnahme möglich ist) sowie tangentielle und radial-asymmetrische Verzeichnung.

Auf Basis des mit 0 Gon orientierten Testfelddatensatzes der Kodak DCS Pro SLR/n (11 Bilder) wurden verschiedene Kombinationen mit gekanteten Aufnahmen in die Bündelausgleichung eingeführt, um deren Auswirkungen auf die innere Orientierung zu ermitteln. Die Abbildungen 3a, b zeigen die zum Teil starken Änderungen in Hauptpunktlage und Kamerakonstante. Die Bestimmungsgenauigkeit der Parameter c , x_H , y_H in der Bündelausgleichung betrug zwischen $1,5\mu\text{m}$ und $5\mu\text{m}$ in allen Berechnungsläufen.

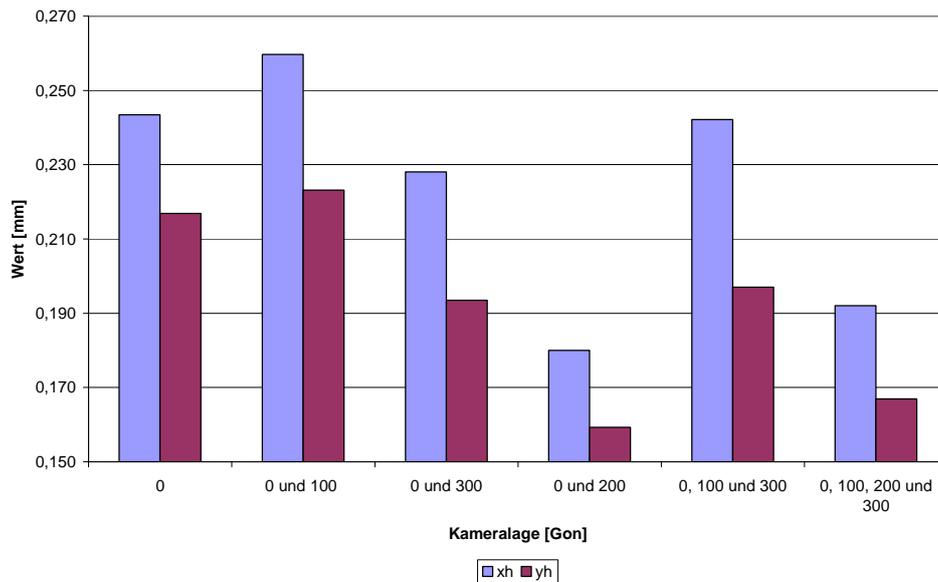


Abb. 3a Kodak DSC Pro SLR/n: Auswirkungen von Bilddatensätzen unterschiedlicher Orientierung auf die Hauptpunktlage

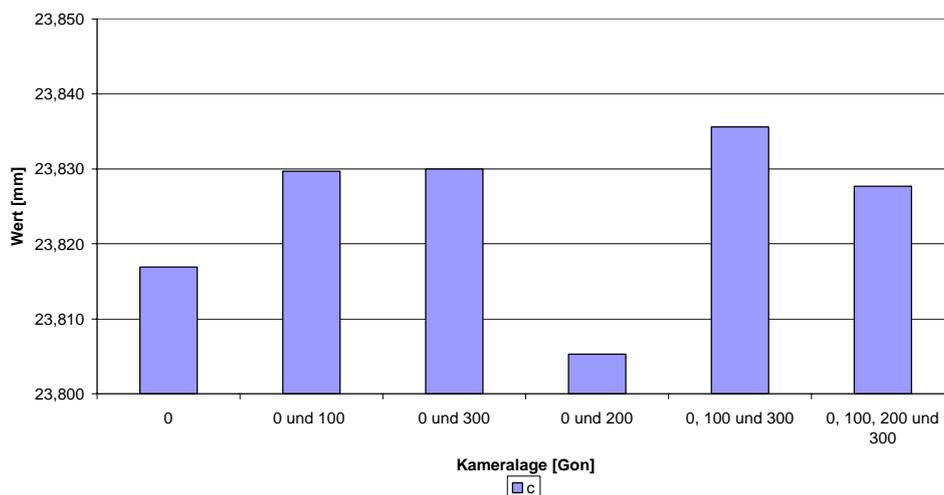


Abb. 3b Kodak DSC Pro SLR/n: Auswirkungen von Bilddatensätzen unterschiedlicher Orientierung auf die Kamerakonstante

Die Abbildungen 4a, b dokumentieren entsprechende Ergebnisse für die Rolleiflex 6008 mit 16 MB Digitalrückteil. Das Vorgehen unterscheidet sich jedoch insofern, als

- für die vier Kameralagen jeweils die gleiche Anzahl von 9 Bildern in die Bündelausgleichung eingehen,
- nach den zwei ersten Aufnahmereihen mit 0 Gon Orientierung jeweils das Objektiv von der Kamera ab- und angebaut wurde,
- nach Abschluss der Messreihen mit 100, 300 und 200 Gon eine erneute Aufnahmeserie in der 0 Gon-Lage erstellt wurde (kein vorheriger Objektivwechsel).

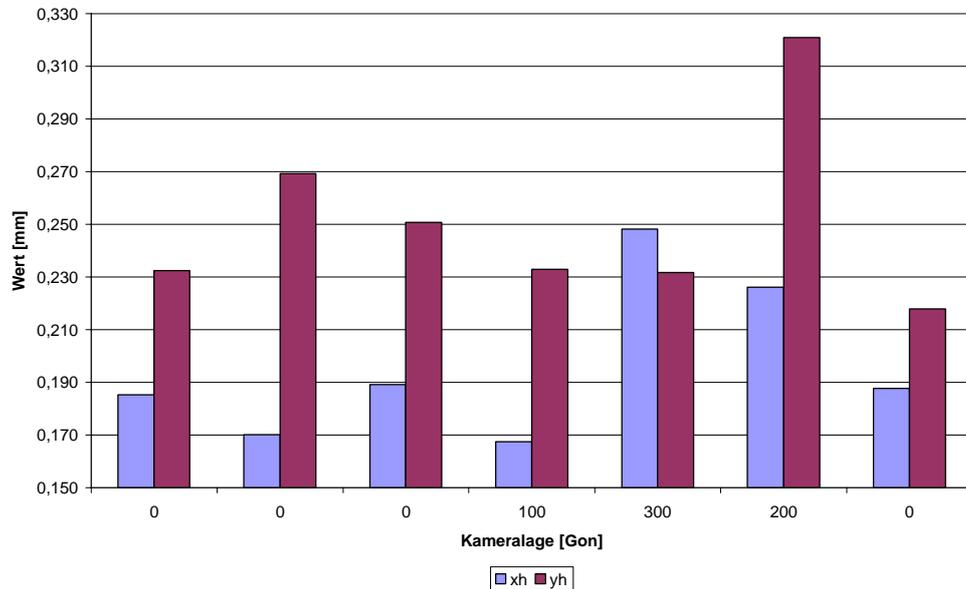


Abb. 4a Rolleiflex 6008: Auswirkungen von Bilddatensätzen unterschiedlicher Orientierung auf die Hauptpunktage

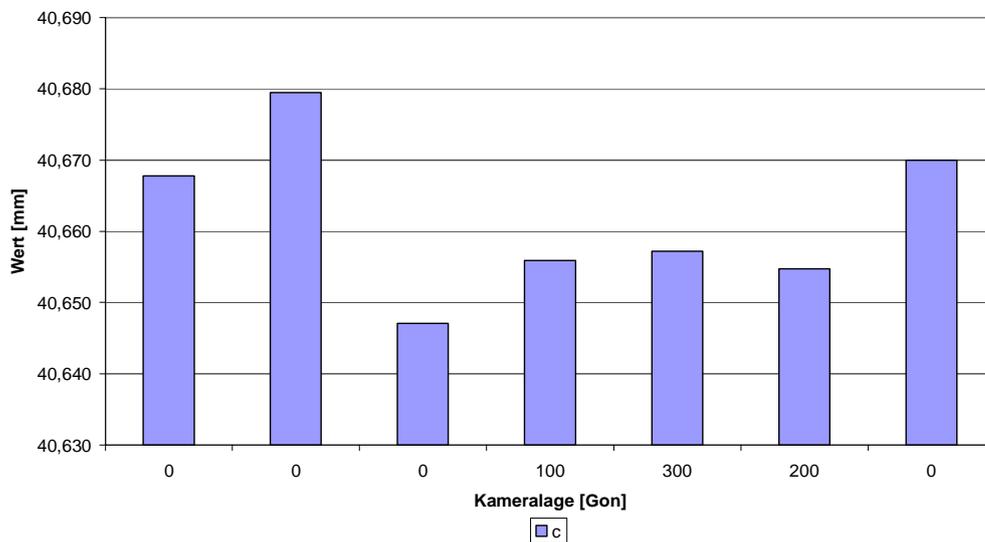


Abb. 4b Rolleiflex 6008: Auswirkungen von Bilddatensätzen unterschiedlicher Orientierung auf die Kamerakonstante

Die Abweichungen der berechneten Werte untereinander sind dabei im Vergleich zu ihrer Bestimmungsgenauigkeit überraschend groß. Die Notwendigkeit einer Einbeziehung bildvarianter innerer Orientierungsparameter in den Berechnungsprozess zeigt sich bei beiden Kamerasystemen deutlich. Bemerkenswert ist darüber hinaus, dass solche Effekte (mechanische Instabilitäten) auch bei höherpreisigen Systemen auftreten. Auch nach einer Werkstattprü-

fung der Sensorbefestigung im PhaseOne Digitalrückteil bestätigte sich dies bei weiteren Testmessungen.

3.2 Bemerkungen zur Genauigkeit

Für eine Formkontrolle des in Abb. 5a schematisch dargestellten Bauteils stellt sich die Frage nach den Modelldeformationen auf Grund instabiler innerer Orientierung und daraus ableitbaren sinnvollen Aufnahmestrategien am konkreten Messobjekt.

Für das mittels eines Rundum-Bildverbandes erfasste Objekt (Abb. 5b sowie Tab. 1) lagen Sollmaße für die Abstände der beiden äußeren Flächen vor, so dass ein unmittelbarer Vergleich mit den Ergebnissen der photogrammetrischen Messung erfolgen konnte. Abb. 6a zeigt Längenabweichungen am Messobjekt nach der Bündelblockausgleichung bei bildinvarianter, Abb. 6b bei bildvarianter innerer Orientierung.

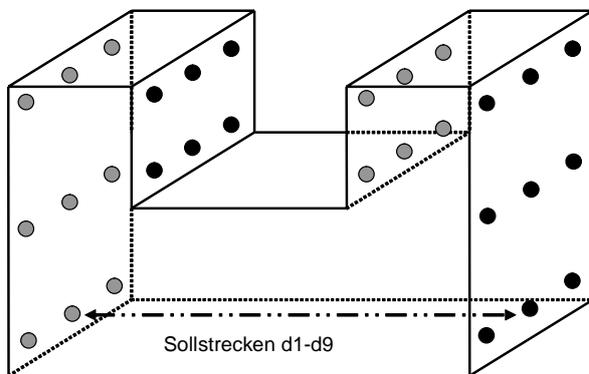


Abb. 5a Signalisiertes Objekt mit bekannten Abstandsmaßen

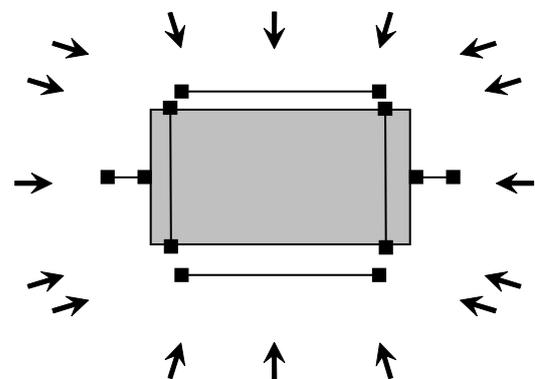


Abb. 5b Objekt (Grundriss), Massstäbe und Aufnahmezustände

Ausgehend von einer Messtoleranz von $\pm 0,1$ mm sind in Abb. 6a systematische Modelldeformationen bei der Verwendung aller Bilddaten (inklusive gekanteter Aufnahmen) in Verbindung mit einer bildinvarianten inneren Orientierung klar erkennbar. Wird der Bildverband dagegen ausschließlich mit Bildern in Normallage (0 Gon) trianguliert, reduzieren sich diese Deformationen bis in den Bereich der Messtoleranz! Vergleichbare Ergebnisse (Abb. 6b) lassen sich erreichen, wenn mit bildinvarianter innerer Orientierung kalibriert wird.

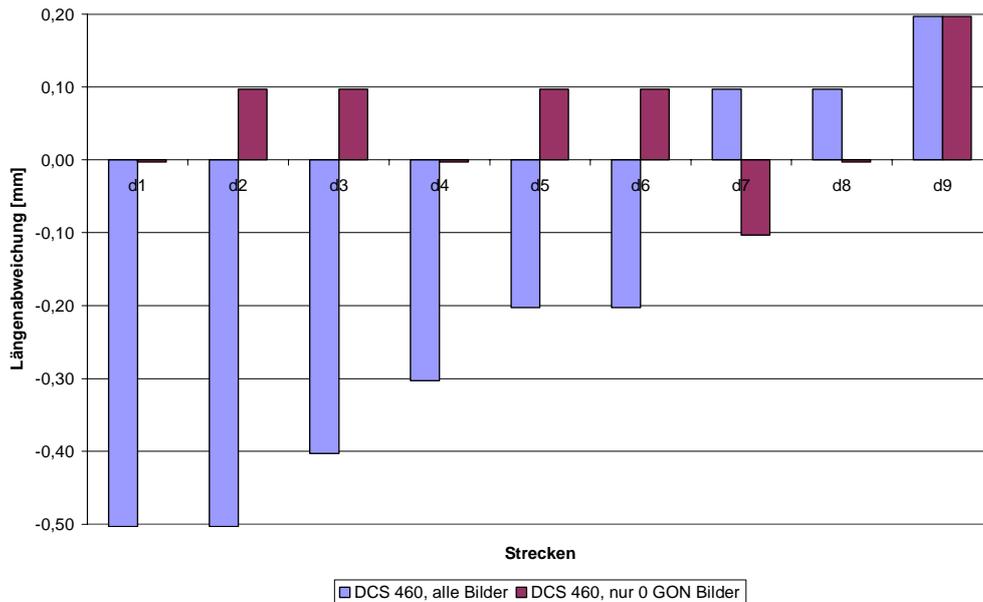


Abb. 6a Längenabweichungen am Messobjekt (bildinvariante innere Orientierung)

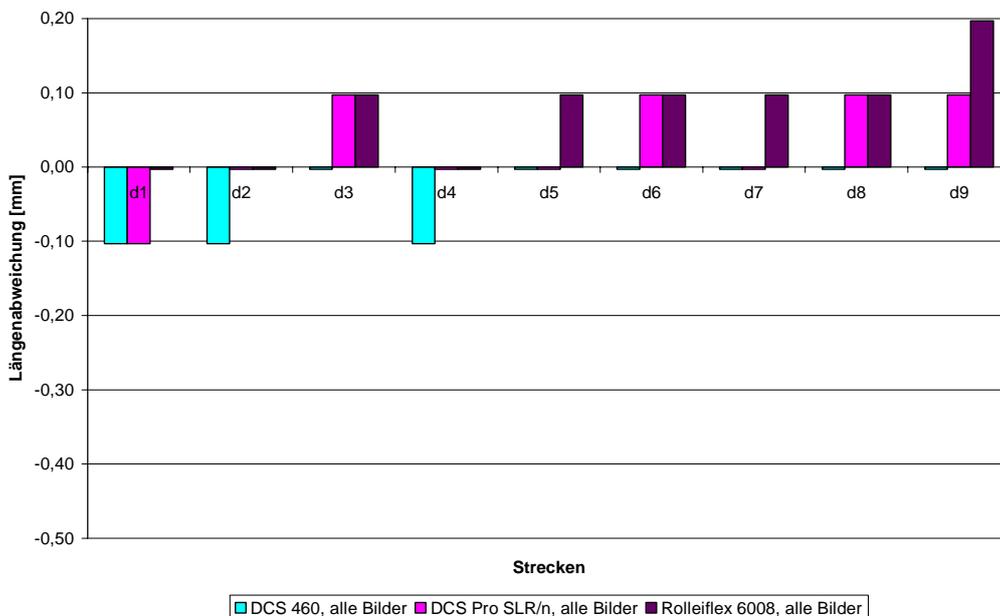


Abb. 6b Längenabweichungen am Messobjekt (bildvariante innere Orientierung)

4 Resümee

Der Kalibrierung photogrammetrischer Kameras ist in den letzten Jahren besondere Aufmerksamkeit gewidmet worden. Die Einbeziehung digitaler Aufnahmesysteme in den Messprozess, verbunden mit Instabilitäten und Inhomogenitäten der stetig größer werdenden Flächensensoren, war hierbei wesentlicher Auslöser. Die Untersuchung zeigt, dass bildvariante Ansätze auch bei teuren digitalen Kameras unverzichtbar sein können. Bemerkenswert ist andererseits, dass ein stabiler Rundum-Bildverband, auch ohne gewälzte Aufnahmen, in vielen Anwendungen zu zufrieden stellenden Ergebnissen führt – eine möglicherweise „etwas in Vergessenheit geratene“ Aufnahme- und Kalibrierstrategie (WESTER-EBBINGHAUS 1989, Abb.

23-24), der heute bei der vielfältigen Nutzung digitaler Consumer-Kameras im photogrammetrischen Messprozess Bedeutung zukommen kann.

5 Literatur

- GODDING, R., 1993: Ein photogrammetrisches Verfahren zur Überprüfung und Kalibrierung digitaler Bildaufnahmesysteme. Zeitschrift für Photogrammetrie und Fernerkundung, Heft 61(3), S. 82-90
- KODAK, 2005: Website „Professional Digital Cameras“, www.kodak.com/global/en/professional/products/cameras/camerasIndex.jhtml?id=0.1.18.22.3&lc=en
- KOTOWSKI, R., 1996: Photogrammetrische Bündeltriangulation zur 3D-Objektrekonstruktion und simultanen Sensorkalibrierung in der Nahbereichsphotogrammetrie. VDV-Schriftenreihe, Band 12, S. 22-31
- MAAS, H.G., 1999: Ein Ansatz zur Selbstkalibrierung von Kameras mit instabiler innerer Orientierung. Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung, Band 7, S. 47-53
- PHASEONE, 2005: Datenblatt zum Digitalrückteil H20, www.phaseone.com/upload/h20_datasheet_us.pdf
- ROLLEI, 2005: Website „Produkte, Sondertechnik“, www.rollei.de/index_d.html
- TECKLENBURG, W. & LUHMANN, T., 2001: Kameramodellierung mit bildvarianten Parametern und Finiten Elementen. Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung, Band 9, S. 140-149
- WESTER-EBBINGHAUS, W. 1989: Trends In Non-Topographic Photogrammetry Systems. In: Non-Topographic Photogrammetry, Second Edition, Chapter 23 (Ed. H. M. Karara). ASPRS Falls Church, Virginia, USA, S. 377-387

Ein Beitrag zur Georeferenzierung der mit Laserscannern erzeugten Punktwolken

THOMAS MARTIENßEN¹

Zusammenfassung: Der folgende Beitrag beschreibt ein Zuordnungsverfahren, welches eine vollautomatische Orientierung (Georeferenzierung) einer mit einem Laserscanner erzeugten Punktwolke erlaubt. Dieser Vorgang, den Bezug auf ein äußeres Referenzsystem herzustellen, ist immer noch ein vom Anwender interaktiv auszuführender Arbeitsschritt und muss der Auswertung der Punktwolke vorangestellt werden. Nur wenige Hersteller von Laserscannern haben bisher die vollautomatische Orientierung der erzeugten Punktwolken in ihrer Messsoftware verwirklicht, so dass oft eine durchreifende Kontrolle der Ergebnisse vor Ort fehlt. Das hier beschriebene Zuordnungsverfahren beruht auf einem einfachen Vergleich der Raumstrecken zwischen dem gegebenen Netz der Passpunkte im absoluten Bezugssystem und dem gemessenen Netz der gescannten Passpunkte im lokalen System. Die Ähnlichkeit der Netze, ihr Design, führt schließlich zur automatischen Passpunktzuordnung und schafft die Voraussetzungen für eine automatische Georeferenzierung unmittelbar nach dem Scann.

1 Orientierung von Punktwolken

1.1 Einleitung

Der Einsatz terrestrischer Laserscanner auf geodätischem Gebiet gewinnt immer mehr an Bedeutung. Die letzten Jahre zeigen, dass sich immer wieder neue Anwendungen ergeben, in denen die dreidimensionale Messung von Objekten durch Laserscanning die effektivere Methode darstellt. Sind die Startparameter vor einem Scann eingestellt, ist der Messvorgang selbst ein vollautomatischer Prozess. So verwundert es, dass sich die vollautomatische Orientierung der Punktwolken noch nicht überall durchgesetzt hat. Die Voraussetzungen sind gegeben, schenken die Hersteller der Laserscanner doch der automatischen Erkennung von Passpunkten, die Grundlage der Georeferenzierung ist, besondere Aufmerksamkeit.

Die heutigen Softwareentwicklungen der Hersteller konzentrieren sich vor allem auf die automatisierte „Interpretation“ der gemessenen Punktwolken. Schließlich will man auch vermessen können, was man aufgrund der hohen Dichte der Punkte sofort wahrnehmen kann. Also jene Dinge, die man bei der Visualisierung der Punktwolke in der Auswertesoftware zwar sofort sieht, aber deren metrische und morphologische Informationen noch nicht greifbar sind. Diese Informationen möglichst schnell zu gewinnen und abfragen zu können, ist der Schwerpunkt derzeitiger Forschungen. Besonders vorteilhaft ist, wenn sich die Lasersensoren mit digitalen Bildsensoren kombinieren lassen, so dass zusätzliche Objektinformationen aus digitalen Quellen einerseits dem Anwender die Interpretation erleichtern und andererseits die automatische Objekterkennung stützen (JAHN, KERSTEN, & KINZEL, 2004). Dem Prozess der Auswertung muss die Georeferenzierung der Punktwolke vorangestellt werden.

Dieser Beitrag beschreibt ein Verfahren der Passpunktzuordnung, welches die Prozesskette der automatischen Messung und Auswertung vervollständigt. Es geht um die automatische Georeferenzierung der mit Laserscannern gemessenen Punktwolken.

¹ Dr.-Ing. Thomas Martienßen, Institut für Markscheidewesen und Geodäsie, TU Bergakademie Freiberg, Agricolastraße 1, 09599 Freiberg, e-mail: Thomas.Martienssen@mabb.tu-freiberg.de

1.2 Netzdesign

Die automatische Orientierung der mit Laserscanner gemessenen Punktwolken gelingt mit Hilfe des Vergleiches der Raumstrecken zwischen dem gegebenen Netz der Passpunkte im absoluten Bezugssystem und dem gemessenen Netz der gescannten Passpunkte im lokalen System. Die Hersteller der Laserscanner benutzen zur Signalisierung der Passpunkte unter anderem Targets, Kugeln, Retroreflektoren oder Prismen (NIEMEIER, THOMSEN & SCHÄFER 2002), welche entweder durch einen separaten Arbeitsgang oder während des eigentlichen Scannvorgangs automatisch erkannt und mit höchster Auslösung erfasst werden.

Ausgangspunkt der Passpunktzuordnung sind zwei Netze, wie sie in Abb. 1 beispielgebend dargestellt sind. Einmal links das gegebene Netz der Passpunkte im absoluten Bezugssystem und rechts das gemessene Netz der gescannten Passpunkte im lokalen System.

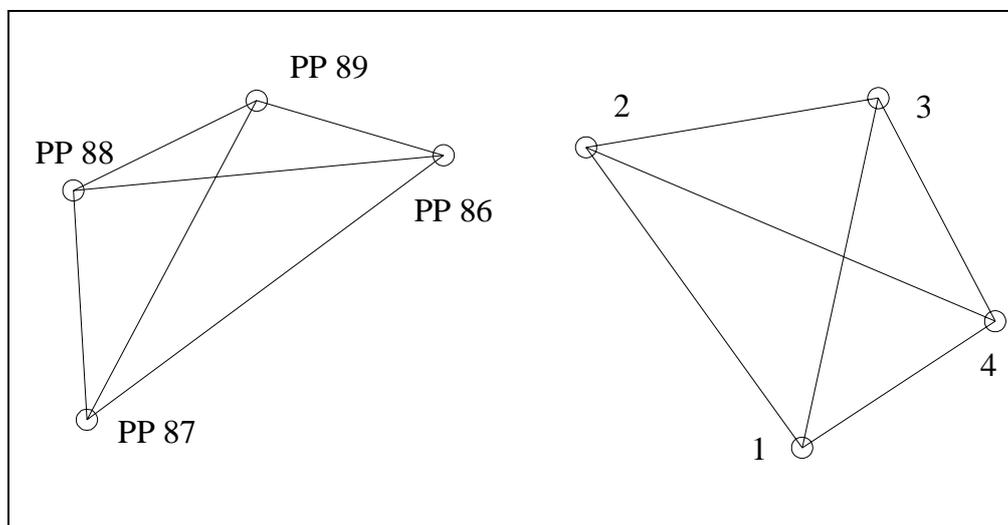


Abb. 1: Das gegebene Netz der Passpunkte im absoluten Bezugssystem (Links) und dem gemessenen Netz der gescannten Passpunkte im lokalen System (Rechts)

Entscheidend für den Erfolg der Zuordnung ist die unregelmäßige Anordnung der Passpunkte im Raum. Wo der Scanner selbst steht, spielt für die Zuordnung keine Rolle. Hauptsache es konnte eine hinreichende Anzahl von Passpunkten aus der Punktwolke extrahiert werden.

Das Verfahren kann in Ausnahmefällen versagen und zwar dann, wenn die Anordnung der Passpunkte im Raum keine eindeutige Zuordnung zulässt. In der Ebene betrachtet wäre das der Fall, wenn vier Passpunkte exakt ein Quadrat oder drei Passpunkte ein gleichseitiges Dreieck aufspannen. Dies sind Sonderfälle, welche in der Praxis kaum vorkommen dürften, da der Anwender einerseits mit dem Wissen darüber die Anordnung bewusst steuern und andererseits die Passpunkte nach den Objektgegebenheiten festlegen wird, was naturgemäß zu einer unregelmäßigen Anordnung führt.

Aus der Bildung des Netzdesign ergeben sich nach Formel 1 für n Punkte eines Netzes r mögliche Streckenkombinationen.

$$r = \frac{n}{2}(n-1) \quad (1)$$

Für das Beispiel aus Abb. 1 sind es $r = 6$ Möglichkeiten. Sie lassen sich in einer Designmatrix vom Typ (n, n) ausdrücken. Belegt man jede Zeile und Spalte der Matrix mit einem Passpunkt des Netzes, so ist die Designmatrix symmetrisch aufgebaut und die Elemente der oberen Dreiecksmatrix werden an der Hauptdiagonale gespiegelt. Die Kombination eines Passpunktes mit sich selbst führt zum Nullelement auf der Hauptdiagonale.

Es soll nun im Weiteren die Designmatrix des Bezugssystems mit B vom Typ (k, k) und die Designmatrix des gemessenen Netzes mit M vom Typ (l, l) bezeichnet werden. Abb. 2 stellt die berechneten Matrizen dar.

B	86	87	88	89	M	1	2	3	4
86	0.000	158.050	132.032	69.190	1	0.000	132.038	127.933	81.140
87	158.050	0.000	81.141	129.940	2	132.038	0.000	105.263	158.030
88	132.032	81.141	0.000	72.548	3	127.933	105.263	0.000	89.952
89	69.190	129.940	72.548	0.000	4	81.140	158.030	89.952	0.000

Abb. 2: Die Designmatrizen B des Bezugssystems und M des gemessenen Netzes

1.3 Ein einfacher Zuordnungsalgorithmus

Im ersten Bearbeitungsschritt wird in M eine beliebige Strecke $(m_{i,j})$ ausgewählt. Zum Beispiel die Strecke von 1 nach 2 mit $m_{2,1} = 132.038$ m (Abb. 2). Im Anschluss wird die Differenzmatrix DB (Abb. 3) nach Formel 2 berechnet.

$$DB = |B - m_{i,j}| \quad (2)$$

DB enthält dann eine eindeutige Lösung der Streckenzuordnung, wenn zwei Differenzen unter einem vorgegeben Grenzwert liegen. Dieser Grenzwert kann plausibel aus der erreichbaren Messgenauigkeit der Passpunktbestimmung und der realen Möglichkeit über die Nachbarschaft zweier Passpunkte abgeleitet werden. Er soll in diesem Beispiel 2 cm betragen.

DB	86	87	88	89
86	132.038	26.012	0.006	62.848
87	26.012	132.038	50.897	2.098
88	0.006	50.897	132.038	59.49
89	62.848	2.098	59.49	132.038

Abb. 3: Differenzmatrix DB

Gibt es keine oder mehr als zwei Lösungen, wird eine andere Strecke aus M benutzt und der erste Bearbeitungsschritt wiederholt.

Aus DB in Abb. 3 lässt sich bisher ablesen, dass das Passpunkt-paar 86 - 88 dem Messpunkt-paar 1 - 2 eindeutig zugeordnet werden kann. Ob der Messpunkt 1 dem Passpunkt 86 oder 88 entspricht, ist noch offen und wird im Anschluss geklärt.

Zu Beginn des zweiten Bearbeitungsschrittes wird einer der beiden Messpunkte als Suchkriterium festgelegt. Wählt man den Messpunkt 1, werden die Zeilen von M nach den Strecken aus Spalte 1 in aufsteigender Reihenfolge sortiert. Die Punktnummer in den Zeilen wird als Index mitgeführt (Abb. 4).

M	1	2	3	4
1	0.000	132.038	127.933	81.140
4	81.140	158.030	89.952	0.000
3	127.933	105.263	0.000	89.952
2	132.038	0.000	105.263	158.030

Abb. 4: Die nach der ersten Spalte sortierte Designmatrix M

Analog geschieht dies für B, wobei hier zwei neue Matrizen B1 und B2 (Abb. 5) aufgestellt werden, die im Anschluss den Algorithmus nacheinander durchlaufen.

B1	86	87	88	89
86	0.000	158.050	132.032	69.190
89	69.190	129.940	72.548	0.000
88	132.032	81.141	0.000	72.548
87	158.050	0.000	81.141	129.940

B2	86	87	88	89
88	132.032	81.141	0.000	72.548
89	69.190	129.940	72.548	0.000
87	158.050	0.000	81.141	129.940
86	0.000	158.050	132.032	69.190

Abb. 5: Aufstellung der Matrizen B1 links und B2 rechts für den Zuordnungsalgorithmus

Der Zuordnungsalgorithmus entspricht einem einfachen Zeilenvergleich der Elemente von M mit denen von B1 und B2. Miteinander verglichen werden jene Spalten, nach denen die Matrizen sortiert wurden. Es ist in Abb. 4 die Spalte 1 in M, im Vergleich mit den Spalten 86 in B1 und 88 in B2 aus Abb. 5. Das erste Element der ersten Zeile ist dabei immer Null. Es wird auch immer ein zweites Element geben, für das eine Übereinstimmung existiert. Im angegebenen Beispiel ist es die Strecke 132.038 m, das ausgewählte Startelement $m_{i,j}$. Für die Abfrage auf Gleichheit wird der bereits eingeführte Grenzwert verwendet. Die Annahme der Zuordnung wird akzeptiert, wenn die Differenz unter dem Grenzwert liegt. Außerdem wird als Hauptkriterium die Eindeutigkeit der Zuordnung eines jeden Elementes von M zu denen von B1 und B2 gefordert. So kann eine Zuordnung auch keine Lösung besitzen oder es kann Mehrdeutigkeit vorliegen, was durch entsprechende Abfragen festzustellen ist. Die Ursachen hierfür sind unterschiedlich. Es könnten zufällig gleichlange Strecken in einem Netz vorkommen, was Mehrdeutigkeit bedeutet. Häufiger wird aber der Fall auftreten, dass das Bezugssystem mehr Passpunkte enthält, als mit dem Scann erfasst wurden (z.B. Passpunkt 89), so dass für diese jeweilige Strecke keine Lösung existiert. Andererseits ist damit zu rechnen, dass der Scanner aus der gemessenen Punktwolke Passpunkte interpretiert, die eigentlich keine sind (z.B. Punkt 3). So könnten stark reflektierende Oberflächen als Prismen, oder kugelförmige Objekte als sphärische Zielmarken erkannt werden.

M	B1	B2
1	0.000	86 0.000 88 0.000
		89 69.190 89 72.548
4	81.140	87 81.141
3	127.933	
2	132.038	88 132.032 86 132.032
		87 158.050

Abb. 6: Ergebnisse des Zuordnungsalgorithmus für B1 und B2

Die Entscheidung, ob die Spalte des Passpunktes 86 in B1 oder die Spalte des Passpunktes 88 in B2 die richtige Zuordnung für den Messpunkt 1 in M liefert, fällt mit der Anzahl der erfolgreichen Zuordnungen. Abb. 6 gibt die Ergebnisse des Beispiels an.

Eine anschließende räumliche 7-Parameter-Transformation der Punktwolke auf das Bezugssystem wird von den Herstellern entweder über drei Passpunkte als Minimallösung, oder bei hinreichender Überbestimmung im Rahmen einer Ausgleichung gelöst. Es sind also mindestens drei erfolgreiche Zuordnungen nötig. Das Ergebnis von B2 liefert diesen eindeutigen Fall, was leicht aus Abb. 1 abzulesen ist. Werden weitere Passpunkte des Bezugssystems gescannt und erkannt, erhöht sich die Anzahl der erfolgreichen Zuordnungen entsprechend. In der falschen Designmatrix, im Beispiel ist dies B1, würden nach wie vor nur zwei Lösungen vorkommen.

Eine unabhängige Kontrolle der Zuordnung erhält man, wenn der Algorithmus mit einem anderen Startelement $m_{i,j}$ neu durchlaufen wird und man zum gleichen Ergebnis in der Zuordnung kommt. Die 7-Parameter-Transformation dient ebenfalls der Kontrolle. Sie ist auch in der Lage, weitere Übereinstimmungen in den Mess- und Passpunkten automatisch zu lokalisieren. Es sind jene, die zuvor im Fall der Mehrdeutigkeit ausgeblendet werden mussten. Auf diese Art und Weise kann der Arbeitsgang der Georeferenzierung automatisch bewerkstelligt werden.

2 Fazit und Ausblick

Für die Vermessung von räumlichen Objekten durch Laserscanner ergeben sich immer neue Anwendungen. Ihre Vorteile bestehen vor allem in der schnellen und zugleich dreidimensionalen Erfassung von räumlichen Objekten. Die Messung selbst ist ein vollautomatischer Prozess. Der automatischen Erkennung und Messung signalisierter Passpunkte widmen die Hersteller der Laserscanner besondere Aufmerksamkeit. Sie werden für die Georeferenzierung der Punktwolken benötigt. So verwundert es, dass kaum eine Messsoftware der Hersteller die Möglichkeit bietet, die mit den Laserscannern erzeugten Punktwolken automatisch vor Ort zu orientieren.

Im vorgestellten Beitrag wurde ein Zuordnungsverfahren erläutert, welches eine vollautomatische Orientierung (Georeferenzierung) einer mit einem Laserscanner erzeugten Punktwolke erlaubt. Die Idee der automatischen Georeferenzierung basiert auf einem Vergleich der Raumstrecken zwischen dem gegebenen Netz der Passpunkte im absoluten Bezugssystem und dem gemessenen Netz der gescannten Passpunkte im lokalen System. Ihr Aufbau (Netzdesign) ist in Teilen ähnlich und ermöglicht eine automatische Passpunktzuordnung. Gelingt diese, dient sie der 7-Parameter-Transformation. Es wäre zukünftig von Vorteil, wenn alle Laserscanner eine „genäherte“ Georeferenzierung über Passpunkte bereits vor Ort in ihrer Messsoftware integrieren würden. Der Anwender hat dann unmittelbar nach dem Scannen eine gewisse Sicherheit und ausreichende Kontrolle über sein Messergebnis, so wie er es bisher in seinem fachlichen Empfinden von seinen klassischen Instrumenten erwartet und gewöhnt ist. Man kann es mit der Angabe der Abschlussfehler am Ende eines Polygonzuges aus den Programmen der Totalstationen vergleichen.

Der genäherten Georeferenzierung in der Messsoftware sollte eine endgültige Georeferenzierung in der Auswertesoftware folgen. Die Erkennung von Objektstrukturen in Über-

lappungsbereichen benachbarter Punktwolken, wie sie beispielgebend von (KLEIN & DÜPPE 2005) vorgestellt wurde, ist aufwändiger und fällt in den Bereich der Nachbearbeitung. Sie stützt, kontrolliert und vervollständigt die reine Georeferenzierung über Passpunkte.

3 Literaturverzeichnis

NIEMEIER, W., THOMSEN, S. & SCHÄFER, M., 2002: 3-D-Geometrieerfassung mit terrestrischen Laserscannern. Photogrammetrie und Laserscanning, Wichmann Verlag, S. 15-26

JAHN, I., KERSTEN, T. & KINZEL, R., 2004: Erfahrungen mit einem 3D-Laserscanning-System bei der Erfassung einer Industrieanlage und des Lübecker Holstentores. Photogrammetrie Laserscanning Optische 3D-Messtechnik, Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2004, Wichmann Verlag, S. 222-229

KLEIN, B., & DÜPPE, R-D., 2005: Blockausgleichung mit Flächen für Laserpunktwolken. Photogrammetrie Laserscanning Optische 3D-Messtechnik, Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2005, Wichmann Verlag

Gletschermonitoring und Gletscherseebrüche am Inyltschik (Zentraler Tianshan) - Interpretation mit optischen und Radarsatelliten

HANS-ULRICH WETZEL¹, ANDREAS REIGBER², ANDREAS RICHTER²
& WASSILI MICHAJLJOW³

Zusammenfassung: Die vergletscherten Tianshan-Gebirgsketten Kyrgyzstans sind das Hauptreservoir für den Wasserhaushalt großer Teile Zentralasiens. Die international diskutierten globalen Klimaveränderungen (u. a. Rückgang der Vergletscherung) führen zur Veränderung der Gletscherdynamik, die sich derzeit in der Häufung von Schlammlawinen und Muren und Durchbrüchen von Gletscherseen in den kirgisischen Hochgebirgsregionen äußert. Im Testgebiet liegt der größte Gletschersee Zentralasiens (Merzbacher-See). Durchbrüche dieses Gletschersees nehmen in den letzten Jahren drastisch zu (Dammbrüche: 27./28. Juli 2001; 1./2. August 2002; 22./23. Juli 2003; 6./7. August 2004) und zerstören auch Infrastrukturen. Am Beispiel des Inyltschik, dem bedeutendsten Gletschersystem des Tianshans, sollen verändertes Abschmelzverhalten und Vergletscherung (Wasserangebot) untersucht und Dammdurchbrüche überwacht werden. In das im vergangenen Jahr mit einer Expedition zu diesem Gletscher gestartete Projekt sind das Zentralasiatische Institut für angewandte Geowissenschaften in Bischkek (ZAIAG) und kirgisische Partnerinstitutionen integriert. Optische Satellitendaten (Landsat-MSS, -TM, -ETM, ASTER-Terra) ermöglichen die Abschätzung der Gletscherdynamik der letzten 30 Jahre. Erst in den letzten Jahren sind optisch generierte (z. B. ASTER-Terra) und aus Radardaten (SRTM, ERS, ENVISAT) generierte DGM verfügbar geworden. Zusammen liegen damit Ausgangsmodelle vor. Für die unabhängige Validierung der Dynamik wurde ein lokales Diff-GPS-Netz installiert. Die komplexe Interpretation der Datensätze wird gekoppelt mit einem neuen Ansatz zur Radarinterpretation (Offset-tracking). Im Beitrag werden vorrangig erste Ergebnisse und Interpretationsansätze von Radardaten diskutiert, die für die Vorbereitung der Expedition „Inyltschik 2005“ (20. Juli - 15. August 2005) erarbeitet wurden.

1 Einführung und regionale Situation

Die vergletscherten Tianshan-Gebirgsketten Kyrgyzstans sind das Hauptreservoir für den Wasserhaushalt eines großen Teils von Zentralasien. Die international diskutierten globalen Klimaänderungen (u. a. Rückgang der Vergletscherung) führen zur Veränderung der Gletscherdynamik, die sich derzeit in der Häufung von Schlammlawinen und Muren sowie Durchbrüchen von Gletscherseen in den kirgisischen Hochgebirgsregionen äußert. Am größten Gletschersystem des Tianshans (Abb. 1: Inyltschik-Gletschersystem) sollen verändertes Abschmelzverhalten und Vergletscherung (Entwicklung des Wasserangebots als

¹ Dr. Hans-Ulrich Wetzel, Geoforschungszentrum Potsdam, Department 1, Sektion 1.4, Telegrafenberg A17, D-14473 Potsdam, e-mail: wetz@gfz-potsdam.de

² Dr.-Ing. Andreas Reigber, Andreas Richter, Technische Universität Berlin, Computer Vision and Remote Sensing, Franklinstr. 28/29 (FR3- 1), D-10587 Berlin, e-mail: anderl@cs.tu-berlin.de

³ Dr. Wassili Michajljow, Geoforschungszentrum Potsdam, Department 1, Telegrafenberg A17, D-14473 Potsdam c/o. Zentralasiatisches Institut für angewandte Geowissenschaften, ZAIAG, Bischkek, Kyrgyzstan, e-mail: caiaq@caiaq.kg

Ausdruck der Klimaänderung) und auch Mechanismen der Dammdurchbrüche untersucht werden.

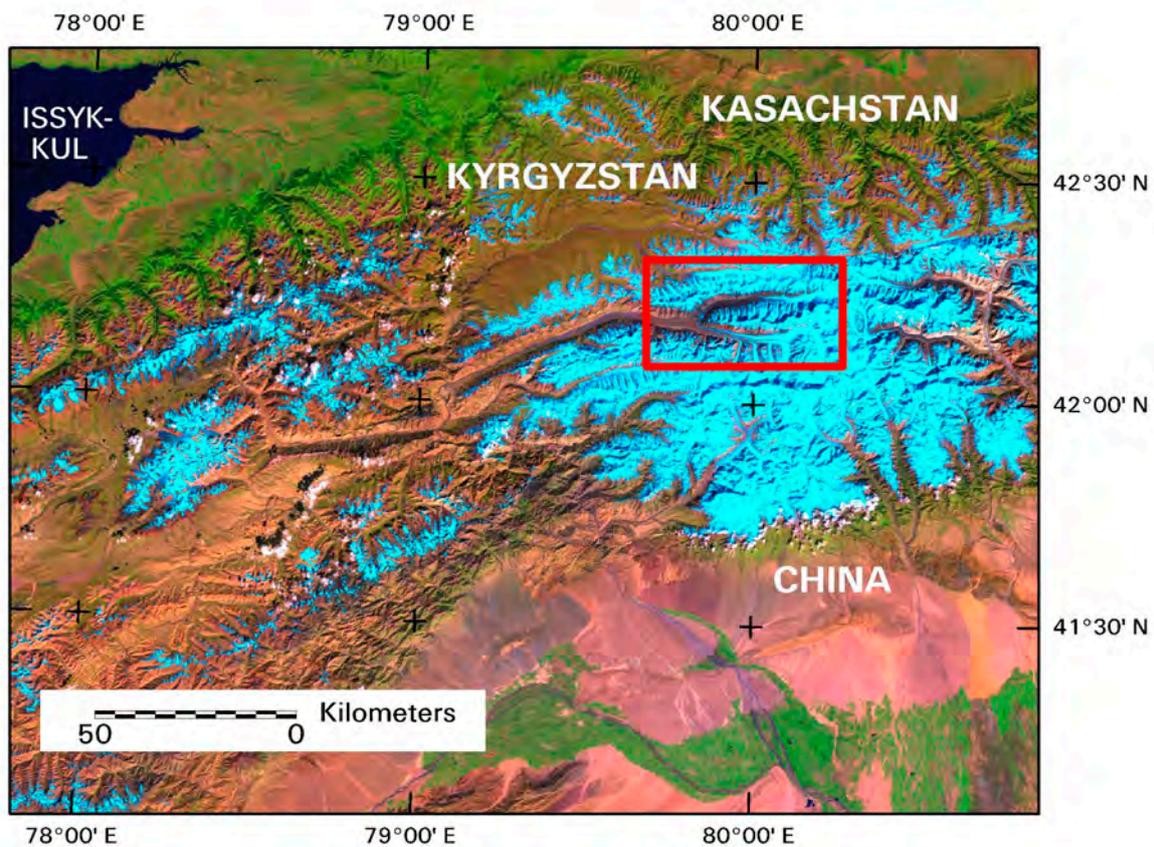


Abb. 1: Inyltschik-Gletschersystem/Ostkyrgyzstan im Grenzgebiet zu Kasachstan und China
 ETM-Mosaik, bands 7,4,1 (147-31-32; 148-30-31)

Der Gletscher (Abb. 2 a) gliedert sich in den Nord- und den Süd-Inyltschik-Gletscher (Punkte 2 und 3 in Abb. 2a). Das Gletschersystem hat insgesamt mehr als 65 km Länge und umfasst eine Fläche von 815 km². Im Grenz- und Verschmelzungsbereich beider Teilgletscher befindet sich in etwa 3300 m Höhe über NN der 130 m tiefe Merzbacher-Gletschersee, der sich über eine Länge von 4 km und eine Breite von etwa 1 km erstreckt (Abb. 2 a, Punkt 1). Ein See (Abb. 2 b) mit derartigen Ausmaßen, der sich in der Moräne eines Hochgebirgsgletschers befindet, ist ein unikales natürliches Phänomen. Im Zusammenhang damit, bildet sich jährlich, für den unterirdischen Abfluss der Schmelzwässer aus dem Merzbacher-See heraus, ein mächtiges Höhlensystem, das den gesamten südlichen Inyltschik-Gletscher auf einer Länge von 14 km bis zur Gletscherzunge (Abb. 2 a, Punkt 4) durchzieht und ein Durchlassvermögen bis 2000 m³ /sec hat. Durchbrüche des Merzbacher-Sees nehmen in den letzten Jahren drastisch zu (Dammbüche: 27./28. Juli 2001; 1./2. August 2002; 22./23. Juli 2003; 6./7. August 2004) und zerstören als Schlammlawinen Infrastrukturen in den Talbereichen.

Für den diskutierten Gletscherbereich gibt es seit den 70-er Jahren glaziologische Untersuchungen (z. B. ARAPETYANTS & BAKOV, 1971; GOLUBOV, 1974). Der Schwerpunkt der Arbeiten lag aber auf der Analyse der Dambruchmechanismen (MAVLYUDOV, 1997; MACHRET et al., 1993).

Eine moderne Interpretation (Satellitentechnik) der gegenwärtigen Gletscherdynamik und des historischen Entwicklungstrends fehlt bisher. Der Merzbacher-See (Punkt 1 in Abb. 2a), so

benannt von Pogrebezki, einem Teilnehmer einer glaziologischen Expedition aus den dreißiger Jahren, zu Ehren von Gottfried Merzbacher, einem Professor der Universität München, der diesen See 1903 entdeckt hatte, wird durch einen vom Eiszufluss des Südinyltschiks gebildeten Eisdamm aufgestaut. Im Bereich der Aufpressung hat das Eis etwa 300 m Mächtigkeit (MACHERET et al., 1993).

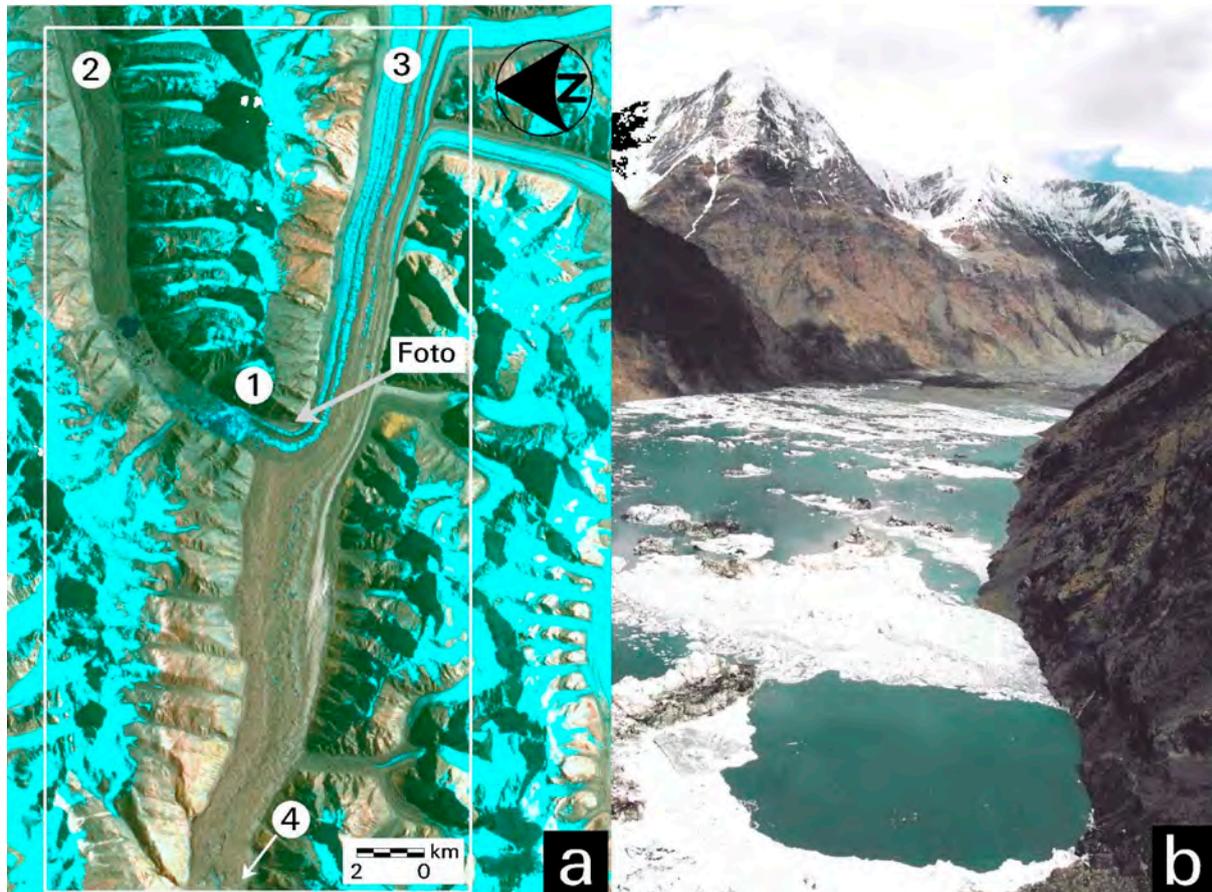


Abb. 2: Inyltschik-Gletschersystem

- a) Aster-Terra vom 5. 10. 2002, bands 4,3,2 > R,G,B; 1- Merzbacher-See; 2-Nordinyltschik, 3- Südinyltschik, 4- Gletscherzunge, markierter Rahmen- Radarinterpretation:.. Abb. 4 und 5;
- b) Helikopter-Foto des Merzbacher-Sees; Blickrichtung markiert in Abbildungsteil a

Für den Durchbruch des Gletschersees gibt es einige Arbeitshypothesen (ARAPETYANTS & BAKOV, 1971; GOLUBOV, 1974; MAVLYUDOV, 1997). Das Schmelzwasser, das den See auffüllt, erreicht im Hochsommer einen kritischen Wasserspiegel, bei dem das Material des Damms, das aus dem leichteren Eis besteht, aufschwimmt und so den Eingang zu Abflusskanälen und Spaltensystemen öffnet. Von diesem Moment an strömen Schmelzwassermengen in den tiefer liegenden Teil des Südinyltschik hinein. Der Durchbruch des Sees dauert zwei bis drei Tage. Der Wasserdurchfluss erreicht dabei bis zu 1000 m³/sek.

2 Detektion von Gletscherbewegungen mit optischen Daten

Optische Satellitendaten (Landsat-MSS,-TM, -ETM, ASTER-Terra) ermöglichen die Abschätzung der Gletscherdynamik der letzten 30 Jahre. Für die Erfassung der Gletscher- und Moränenverteilung und die Interpretation von Seefüllungen und Eiszuflüssen sind bisher 12

optische Datensätze (7 Datensätze MSS: 1975, 1976, 1977; 2 Datensätze Landsat-TM bzw. -ETM: 1990 und 2000; 3 Datensätze Aster-Terra: 2002 und 2003) analysiert worden (Abb. 3). Zusätzlich sind in den letzten Jahren optisch generierte (z. B. ASTER-Terra) und aus Radar-daten (SRTM, ERS, ENVISAT) generierte DGM verfügbar geworden. Die Erfassung der Gletscher- und der Seebeckentopographie stützt sich auf ASTER-DGM (8. Juli 2002: Seefül-lung vor Dammbbruch; 5. Oktober 2002: nach Dammbbruch, beginnende Wiederauffüllung; 25. Juni 2003: Auffüllung) und das X-SRTM-DGM vom Februar 2000.

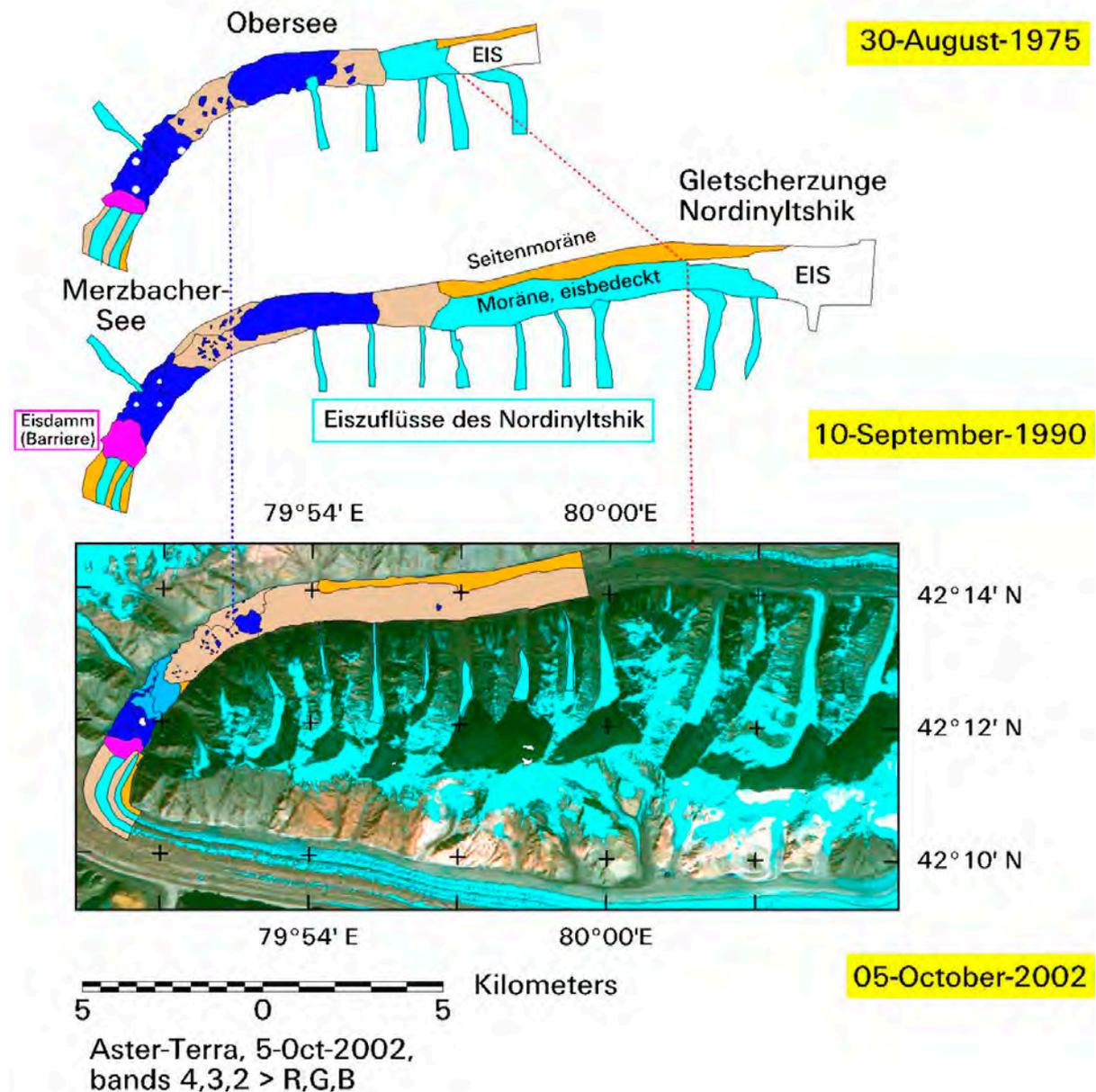


Abb. 3: Entwicklung des Inyltshik-Gletschersystems von 1975-2002 (optische Satelliten-Daten; 1975:MSS; 1990: Landsat-TM; 2002: Aster-Terra)

Die Zeitschnitte aus den optischen Daten (einschließlich der Radardatensätze von 2004, vgl. 3.2) erlauben eine erste Abschätzung der Gletscherentwicklung in den vergangenen 29 Jahren. In den Jahren 1975-1977 (oberer Teil Abb. 3) bildet sich, gespeist aus mächtigen Eiszuf-

flüssen des Nordnyltschiks, zunächst ein etwa 5 km langer, als Obersee bezeichneter, Schmelzwassersee, der sein Wasser über ein Abflusssystem an den tiefer liegenden Merzbacher-See abgibt. Die Eisbedeckung ist zumindestens ab 1990 rückläufig (mittlerer Teil Abb. 3).

Die nördliche Seitenmoräne des Nordnyltschik ist über einen weiten Teil nicht mehr eisbedeckt. Das über der Moräne liegende Gletschereis ist bereits mehrere Kilometer zurückgewichen (vergleichbare Zeitpunkte: 30. August 1975 und 10. September 1990). Das Schmelzwasser füllt auch 1990 noch einen vergleichbar großen Obersee. Ab 2000 (Beispiel: 5. Oktober 2002; unterer Teil Abb. 3) ist das Obersee-Becken bis auf seinen tiefsten, westlichsten Teil wasserfrei. Weite Teile der Moräne sind nicht mehr eisbedeckt. Seitliche Eiszuflüsse in das Tal sind merklich zurück gegangen. Nur im östlichen Bereich gibt es noch Eiszuflüsse aus dem Nordnyltschik (Seitentäl und im Bereich der nördlichen Seitenmoräne). Größe und Position des Merzbacher-Sees bleiben erhalten. Die durch den Südynltschik aufgepresste Eisbarriere (Eisdamm) verändert ihre Position nicht. Das erlaubt die Arbeitshypothese, dass die Speisung des Merzbacher-Sees ab den 90-iger Jahren und gegenwärtig vornehmlich aus dem Südynltschik erfolgt, was auch durch die Interpretation der Radardaten (2004) belegt wird (vgl. 3.2). Damit ist anscheinend auch eine Veränderung der Abfluss- und Durchbruchdynamik ausgelöst worden. Im Zeitraum 1975-1990 ist ein Rückgang des Nordnyltschiks von etwa 6 km zu verzeichnen. Insgesamt ist der Nordnyltschik im Betrachtungszeitraum von 27 Jahren (1975-2002) sogar um ca. 8 km zurückgegangen.

Bei der Expedition 2004 wurde für die unabhängige Validierung der Dynamik ein lokales Diff-GPS-Netz installiert (20 Punkte auf aktiven Gletscherteilen und auf Festgesteinsbereichen). Die ersten Wiederholungsmessungen erfolgen bei der Expedition 2005. Damit werden die berechneten DGM und die mit ENVISAT SAR Daten abgeleiteten Bewegungsgeschwindigkeiten (vgl. 3) validierbar. Diese Ausgangsdatensätze verknüpft mit glaziologischen Untersuchungen (Albedo- und Ablationsmessungen) und Feldarbeiten werden dann den Ausgangspunkt für Modelle zur Ableitung von Wasserbilanz und Gletscherdynamik darstellen.

3 Detektion von Gletscherbewegungen mit ENVISAT SAR Daten

In den letzten Jahren hat sich satellitengestützte differentielle SAR Interferometrie (DInSAR) als ein leistungsfähiges Verfahren zur Vermessung von Eis- und Gletscherdynamiken etabliert (BAMLER & HARTL, 1998; LANG, RABUS & DECH, 2003). Durch kombinierte Phasenauswertung von mehreren SAR-Aufnahmen werden bei der differentiellen SAR Interferometrie topographische Effekte von Bewegungseffekten im SAR Signal getrennt. Dies ermöglicht eine Genauigkeit bei der Messung von Oberflächenbewegungen im Subwellenlängenbereich, also bis zu Zentimetern und darunter. Dieser extrem hohen Genauigkeit des Verfahrens stehen aber auch eine Reihe von Einschränkungen gegenüber. So kann mit DInSAR prinzipiell nur die Bewegungskomponente in Blickrichtung des Sensors bestimmt werden; die Komponente entlang der Flugrichtung bleibt unbekannt. Auch kann bei verhältnismäßig starken Bewegungen, wie sie bei großen Gletschern innerhalb des hier 35 Tage dauernden Wiederholzyklus von Satelliten nicht ungewöhnlich sind, eine solch hohe Anzahl von Interferenzringen entsteht, dass eine genaue Auswertung der Bewegung sehr erschwert bzw. nicht mehr möglich ist.

Die größte Einschränkung bei der Untersuchung von alpinen Gletschern dürfte aber die oft sehr geringe Kohärenz der Aufnahmen sein. Während der Sommermonate taut die Oberfläche eines Gletschers stark an, was seine Oberflächenstruktur ändert und damit zu starken Dekorrelationseffekten führt (ZEBKER & VILLASENOR, 1992). Gleiches gilt auch im Winter, wenn

Schneefall auf die Gletscheroberfläche ebenfalls eine Oberflächenänderung verursacht. Da die Zeitabstände zwischen interferometrisch nutzbaren Datensätzen häufig mehrere Monate betragen können, ist in vielen Fällen eine Auswertung der Gletscherbewegung mit den Methoden der DInSAR nicht möglich.

Offset-tracking ist ein alternatives Verfahren zur Bestimmung von Bewegungen im Fall von zu geringer Kohärenz (LUCKMANN, MURRAY, WEGMANN & WERNER, 2002). Beim Offset-Tracking wird versucht, den Ort von einzelnen charakteristischen Objekte auf der Gletscheroberfläche in allen zur Verfügung stehenden Aufnahmen genau zu bestimmen. Aus charakteristischen Änderungen in der Lokalisation dieser Objekte lässt sich im Anschluss ein Bewegungsbild ableiten. Offset-Tracking ist rein auf der Bildamplitude basiert und vermeidet somit größtenteils obengenannte Probleme mit zu geringer Kohärenz, welche sich vor allem in der Bildphase auswirken. Außerdem können selbstverständlich die Bewegungskomponenten in zwei orthogonalen Richtungen detektiert werden, was mit differentieller Interferometrie nicht möglich ist. Erkauft wird dies allerdings durch eine erheblich geringere Genauigkeit im Vergleich zur DInSAR; sie liegt beim Offset-Tracking nur leicht unterhalb der Bildauflösung des Sensors, also etwa im Meterbereich im Fall von aktuellen Satellitensensoren. Die verhältnismäßig geringe Genauigkeit im Vergleich zu interferometrischen Verfahren kann im Fall von schneller Gletscherbewegung durchaus nur von untergeordneter Bedeutung sein.

3. 1 Offset-Tracking zur Bewegungsdetektion

3.1.1 Offsetbestimmung über Bildkorrelationen

Offset-tracking basiert auf der Bestimmung der Verschiebungen von einzelnen charakteristischen Objekten auf der Gletscheroberfläche. Im vorliegenden Fall des Inylschik-Gletschers ist die Eisoberfläche selbst sehr stark strukturiert, so dass eine Suche nach geeigneten Objekten nicht nötig ist. Die Bewegung des Gletscher kann also über die zeitliche Verformung seiner Oberflächentextur analysiert werden. SAR Daten bieten sich hierfür an, da sie trotz der durch Specklerauschen relativ schlechten Bildqualität eine recht hohe Auflösung bieten und insbesondere auf Oberflächen mit starker Morphologie einen sehr hohen Bildkontrast zeigen. Ein relativ robustes und gleichzeitig genaues Verfahren zur Bestimmung von Verschiebungen zwischen texturierten Flächenelementen ist die Methode der Amplitudenkorrelation. Um die lokale Verschiebung zwischen einer Aufnahme 1 und einer Aufnahme 2 zu bestimmen, schneidet man an der zu untersuchenden Stelle einen kleinen Bildausschnitte der Größe $N \times N$ aus beiden Aufnahme aus und berechnet die zweidimensionale Korrelationsfunktion $C(i, j)$ ihrer Amplituden:

$$C(i, j) = \sum_{n=-N/2}^{N/2} \sum_{m=-N/2}^{N/2} S_1(i, j) S_2(i + n, j + m) \quad (1)$$

wobei S_1 die Amplitude des Bildausschnitts 1 und S_2 die Amplitude des Bildausschnitts 2 bezeichnet. Die Lage des Maximum der Korrelationsfunktion gibt direkt an, um wie viel S_2 gegenüber S_1 verschoben ist, wobei sich sowohl der horizontale Versatz aus der horizontalen Lage des Maximum in C ableiten lässt, als auch der vertikale Versatz aus der vertikalen Lage des Maximums in C . In der Regel ist es aus Effizienzgründen vorzuziehen, die Amplitudenkorrelation in Gl. 1 im Spektralbereich zu implementieren:

$$C(i, j) = \text{FFT}^{-1} (\text{FFT}(S_1(i, j)) \text{FFT}(S_2(i, j))^*) \quad (2)$$

Die Genauigkeit einer solchen einfachen Amplitudenkorrelation liegt bei einem Pixel bzw. Auflösungselement. Im Fall des ENVISAT Sensors, welcher im Rahmen dieser Studie verwendet wurde, entspricht das nur etwa 5 Metern in Flugrichtung sowie ca. 20m quer zur Flugrichtung. Eine Verbesserung der Auflösung der Korrelationsmethode lässt sich durch Interpolation des Maximums der Korrelationsfunktion erreichen. Dafür existieren mehrere Möglichkeiten; eine relativ einfache und leistungsfähige besteht in der Verwendung von *Zero-Padding* vor Anwendung der inversen Fourier-Transformation in Gl. 2. Zero-Padding im Spektralbereich führt zu einer Überabtastung der Korrelationsfunktion mittels sinc-Interpolation. Bei starkem Bildkontrast und guter Korrelation lässt sich so eine Verbesserung in der Koregistrierungsgenauigkeit um einen Faktor 5-10 erreichen.

Zur Bestimmung des zweidimensionalen Bewegungsfeldes wird ein enges Raster von solchen Bildausschnitten über das Untersuchungsgebiet verteilt und an jeder Position der entsprechende lokale Bewegungsvektor bestimmt (vgl. Abb. 4).

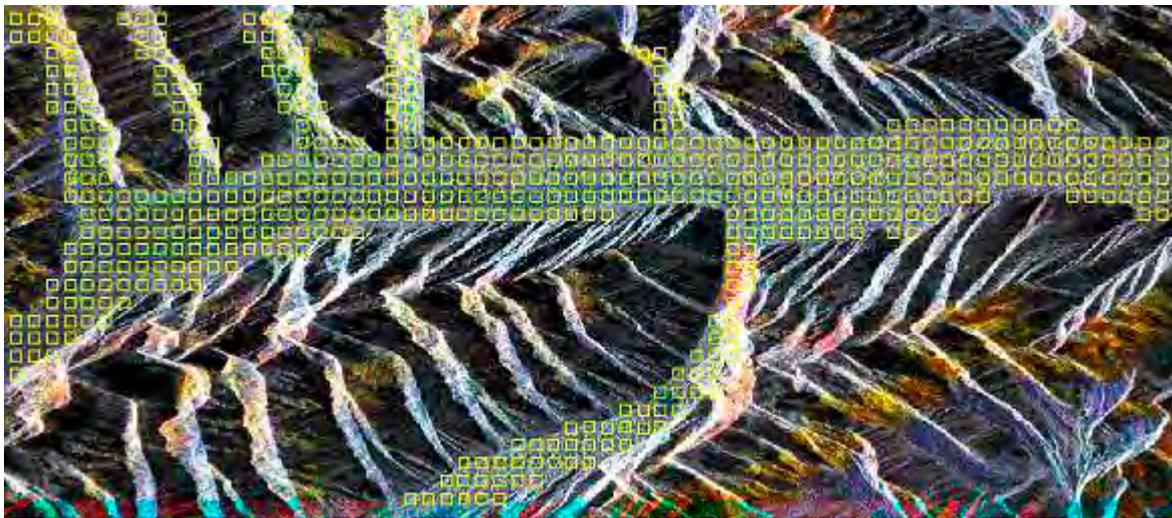


Abb. 4: Inyltschik-Gletschersystem/Ostkyrgyzstan – Anordnung der zu koregistrierenden Bildausschnitte, Envisat: Farbkomposit, 19.08.04, 23.09.04, 28.10.04

3.1.2 Fehlererkennung

Insbesondere bei niedriger Korrelation zwischen den Bildelementen ist nicht immer sichergestellt, dass die über Gl. 1 gefundenen Offsets der tatsächlichen Verschiebung entsprechen. Aus diesem Grund ist unabdingbar, Methoden zur Erkennung von fehlerhaft bestimmten Offsets einzuführen. Im Rahmen dieser Studie wurden dazu folgende 4 Kontrollmechanismen benutzt (WINTER, 2003):

- Untersuchung der Korrelationsfunktion $C(i,j)$ auf einen ausgeprägten Peak. Ist dieser nicht vorhanden, so kann davon ausgegangen werden, dass sich die untersuchte Oberfläche zwischen den Aufnahmezeitpunkten stark verändert hat und keine korrekten Offsets gefunden wurden. Als geeigneter Qualitätsparameter hat sich

$$\xi = \frac{\max(C) - \text{mean}(C)}{\text{mean}(C) - \min(C)} \quad (3)$$

erwiesen. Liegt ξ unter 2,0, so wird das Ergebnis einer Korrelation abgelehnt.

- Bildoffsets mit unvernünftig hohen Werten werden als ungültig markiert. Für einen sinnvollen Schwellwert sind gewisse Vorkenntnisse über die Gletscherbewegung notwendig. Im Falle dieser Studie wurden Offsets größer als 100 m aussortiert.
- Der Vergleich der Offsets eines Bildpatches mit dem Ergebnis umliegender Patches erlaubt es in vielen Fällen weitere Ausreißer zu detektieren. Dazu wird über eine Spline-Interpolation eine Vorhersage der zu erwartenden Offsets aus den 8 umliegenden Bildpatches gerechnet. Unterscheidet sich der tatsächlich bestimmte Vektor um mehr als 0.5 Pixel in Entfernung oder Azimut von der Vorhersage, wird er als ungültig markiert.
- Die kombinierte Auswertung von 3 Aufnahmen, so wie sie im vorliegenden Fall durchgeführt wurde, erlaubt eine weitere Plausibilitätsuntersuchung. So muss der Offset eines Patches zwischen Aufnahme 1 und 3 gleich der Summe der Offsets zwischen den Aufnahmen 1 und 2 sowie 2 und 3 sein. Bei Abweichungen hiervon, die größer als 0.25 Pixel in Entfernung oder Azimut sind, wird ein Patch ebenfalls als ungültig markiert.

3.1.3 Eliminierung der Topographie

Eine zeitliche Verformung seiner Oberflächentextur ergibt sich nicht nur durch die Bewegung des Gletschers selber, sondern ebenfalls aus der leicht unterschiedlichen Beobachtungsposition des Sensors zu den verschiedenen Aufnahmezeitpunkten. Entscheidend dabei ist die Komponente der Basislinie B zwischen den beiden Aufnahmepositionen parallel zu der lokalen Blickrichtung des Sensors $B_{||}$:

$$B_{||} = B \sin(\theta - \alpha) \quad (4)$$

wobei θ dem lokalen Off-Nadir-Winkel und α dem Steigungswinkel der Basislinie entspricht. $B_{||}$ entspricht dem Laufzeitunterschied zwischen den beiden Aufnahmepositionen und damit der aus der Geometrie bedingten Verschiebung zwischen den Bildern. Der lokale Off-Nadir-Winkel hängt dabei von der Entfernung des untersuchten Bildausschnitts zum Sensor, aber auch von der Topographie des Geländes ab. Zur Bestimmung des exakten Off-Nadir Winkels wurde ein, unter Verwendung von genauen Orbitdaten, in die Slant-Range Geometrie des Sensors rückgekodiertes SRTM-Höhenmodell verwendet (SRTM, 2000). Nach Bestimmung der Bildoffsets auf allen Bildausschnitten wurden von den gemessenen Werten die nach Gl. 4 aus der Topographie zu erwartenden Verschiebungen subtrahiert. Aufgrund von möglichen Abweichungen zwischen der Gletschertopographie zum Aufnahmezeitpunkt des Höhenmodells (2000) und der aktuellen zum Zeitpunkt der Aufnahme der ENVISAT Daten (2004) können sich gewisse Fehler in der Bestimmung der Offsets ergeben. Im Rahmen der Genauigkeit der Offset-Tracking Methode sollte dies aber von untergeordneter Bedeutung sein.

3.2 Experimentelle Ergebnisse

Durch blockweise Erfassung der Bewegung in 2 orthogonalen Richtungen kann die resultierende Bewegung als Vektor dargestellt werden (Abb. 5). Für die Interpretation wurden die ENVISAT SAR Datensätze 19. August 2004 und 28. Oktober 2004 genutzt. Der Zeitraum der abgebildeten Bewegung umfasst damit etwa 69 Tage. Die Richtung der Vektorpfeile zeigt die Bewegungsrichtung der koregistrierten Bildsegmente. Die Länge der dargestellten Vektorpfeile ist proportional zur Größe der Bewegung. Im dargestellten Bildzentrum wurden die größten Bewegungen des Eises festgestellt (Einfluss des Südynyltschik in den Merzbacher-See). Die größte gemessene Bewegung entspricht dort 15 Meter innerhalb des Interpretationszeitraumes. Das entspricht für die 69 Tage einer durchschnittlichen Geschwindigkeit von

22 cm/pro Tag. Nach terrestrischen Messungen war der Gletscher in den 70-iger Jahren doppelt so schnell (ARAPETYANTS & BAKOV, 1971; GOLUBOV, 1974). Aus den Ergebnissen ergeben sich auch erste Hinweise auf die innere Dynamik des Gletschersystems, die die Ergebnisse der Interpretation der optischen Daten (vgl. 2) stützen. Der wichtigste Zufluss zum Merzbacher-See erfolgt über den nördlichen Zufluss des Südinyltschiks (oberer rechter Bildteil, hellgraue Eissignatur).

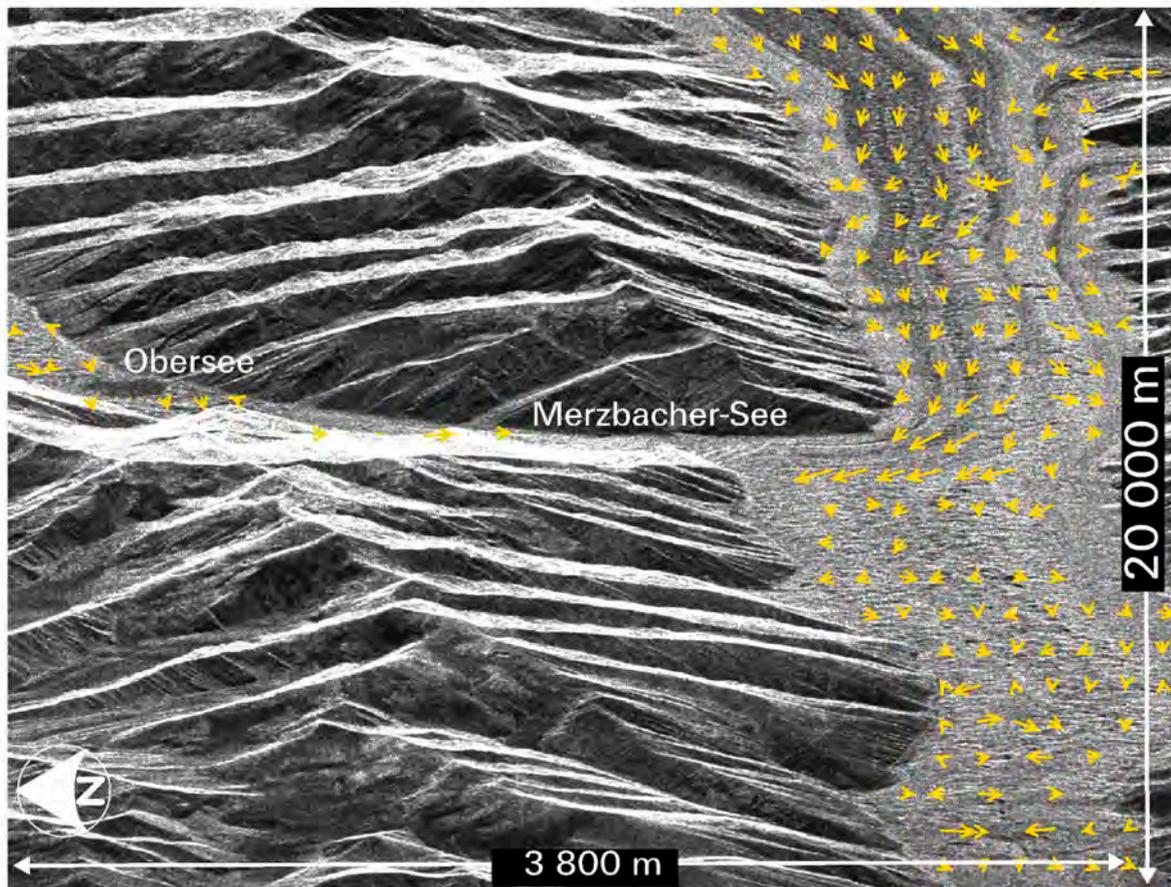


Abb. 5: Inyltschik-Gletschersystem – Offset-Trecking, ENVISAT, Bewegungskvektoren im Interpretationszeitraum 19. August-28. Oktober 2004

Beim Einbiegen des Eisflusses in die Senke des Merzbacher-Sees erhöht sich die Eisfließgeschwindigkeit (Aufpressung des Eisdammes). Der südliche Eisfluss des Südinyltschiks (vgl. rechts daneben) wird zusätzlich durch einen Seitengletscher (rechte obere Bildecke) gespeist. Das Eis dieses Zuflusses fließt nicht in den Merzbacher-See. Südlich der Einbiegung in die Senke des Merzbacher-Sees sind nur sehr geringe Fließbewegungen des Südinyltschiks detektierbar. Im Toteisbereich (im Bild unterhalb der Bezeichnung „Merzbacher-See“) wurden, wie erwartet, keine Bewegungen festgestellt. Unterhalb davon (Bereich der Gletscherzunge/untere rechte Bildecke) werden nur irreguläre, ungerichtete Bewegungen erkennbar, d. h. dass die Lage der Gletscherzunge gegenwärtig stabil ist. Oberhalb des Obersees (linker Bildbereich) sind nur untergeordnete Eisbewegungen des Nordinyltschik sichtbar. Die Speisung des Oberseereses und des Merzbachersees erfolgt durch den Nordinyltschik nur durch Schmelzwässer. Die Haupteisbewegung des Inyltschik-Gletschersystems verläuft somit gegenwärtig über den nördlichen Eisfluss des Südinyltschiks. Damit untersetzen die Radarinterpretationen die aus den optischen Daten abgeleiteten und können sie detailliert präzisieren.

4 Schlussfolgerungen

Die Verknüpfung von optischen Interpretationen und Radar-Offset-Tracking zeigt einen vielversprechenden Ansatz zur Interpretation schneller Gletscherbewegungen. Die Ergebnisse müssen jedoch noch durch Einbeziehung glaziologischer Ergebnisse und GPS-Beobachtungen validiert werden.

5 Literaturverzeichnis

- ARAPETYANTS, S. E. & BAKOV, E. K., 1971: Morphology of the Mertzbacher glacial lake and mechanism of its catastrophic breaks.- Nekotorye Osobennosti Oledeneniya Tyan-Shanya, Frunse, Ilim, S. 75-84 (Russian)
- BAMLER, R. & HARTL, P., 1998: Synthetic aperture radar interferometry, Inverse Problems, vol. 14; S. R1-R54
- GOLUBEV, G. N., 1974: Sthe Peculiarities of Outbursts of glacier-dammed lakes of different types, Materyaly Glatsiol. Isledovaniy, Vol. 24, S. 155-163 (Russian)
- LANG, O., RABUS, B. & DECH, S. W., 2003: Velocity Map of the Thwaites Glacier Catchment, West Antarctica, Submitted to Journal of Glaciology.
- MACHERET, Y. Y, NIKITIN, S. A., BABENKO, A. N., VESNIN, A. V., BOBROVA, L. I. & SANKINA, L. V., 1993: Thickness and Structure of the Yushniy Inylchek Glacier from the data of radio echo sounding, Materyaly Glatsiol. Isledovaniy, Vol. 77, pp. 86-97 (Russian)
- MAVLYUDOV, B. R., 1997: Drainage of the Ice-dammed Mertzbacher Lake, Tien Shan, Materyaly Glatsiol. Isledovaniy, Vol. 81, pp. 61-65 (English)
- SRTM, 2000: SRTM mission: <http://www.jpl.nasa.gov/srtm>
- STROZZI, T., LUCKMANN, A., MURRAY, T. & WEGMUELLER, U., WERNER, C., 2002: Glacier Motion Estimation Using SAR Offset-Tracking Procedures, IEEE Trans. on Geosci. and Remote Sens.
- WINTER, H., 2003: Koregistrierung niedrigkohärenter SAR Aufnahmen, Diplomarbeit der Technischen Universität Berlin, 2003
- ZEBKER, H. A. & VILLASENOR, J., 1992: Decorrelation in Interferometric Radar Echoes, IEEE Trans. on Geosci. and Remote Sens., 30, 5, S. 950-959

Near Real Time Überwachung des subglazialen Grímsvötn-Vulkanausbruchs Nov. 2004 auf Island mit ENVISAT-ASAR Daten

Ulrich Münzer¹, Kilian Scharrer¹, Ágúst Gudmundsson²

Zusammenfassung: Nach einer Ruhephase von 6 Jahren brach der subglaziale Vulkan Grímsvötn unter dem Vatnajökull in Island am 01.11.2004 gegen 22 Uhr (GMT) erneut aus.

Der westliche Vatnajökull ist eines der Testgebiete im Rahmen des derzeit an der LMU laufenden ENVISAT Projektes ID 142 „Hazard Assessment and Prediction – Longterm Observation of Icelandic Volcanoes and Glaciers Using ENVISAT-ASAR and Other Radar Data“, deshalb werden kontinuierlich ENVISAT-ASAR Daten aufgezeichnet.

Speziell für die Überwachung der vulkanischen Ereignisse an der Grímsvötn konnten SAR-Daten des Umweltsatelliten ENVISAT binnen kürzester Zeit von der ESA bezogen und anschließend verarbeitet werden, als wichtiger Baustein für ein Katastrophen-Monitoring.

Einleitung

Vorrangiges Ziel des ESA-Projektes „Hazard Assessment and Prediction – Longterm Observation of Icelandic Volcanoes and Glaciers Using ENVISAT-ASAR and Other Radar Data“, ID 142 PI: U. Münzer ist, durch eine kontinuierliche Langzeit-Überwachung mit Radardaten des europäischen Umweltsatelliten ENVISAT und den Aufbau eines umfassenden geographischen Informationssystems (GIS) eine frühzeitige Vorhersage von Naturereignissen an Vulkanen und Gletschern in der hochaktiven neovulkanischen Zone im Süden Islands zu erreichen.

Die Untersuchungen konzentrieren sich auf die hochgefährdeten Testgebiete Mýrdalsjökull und Vatnajökull-West (Abb. 1).

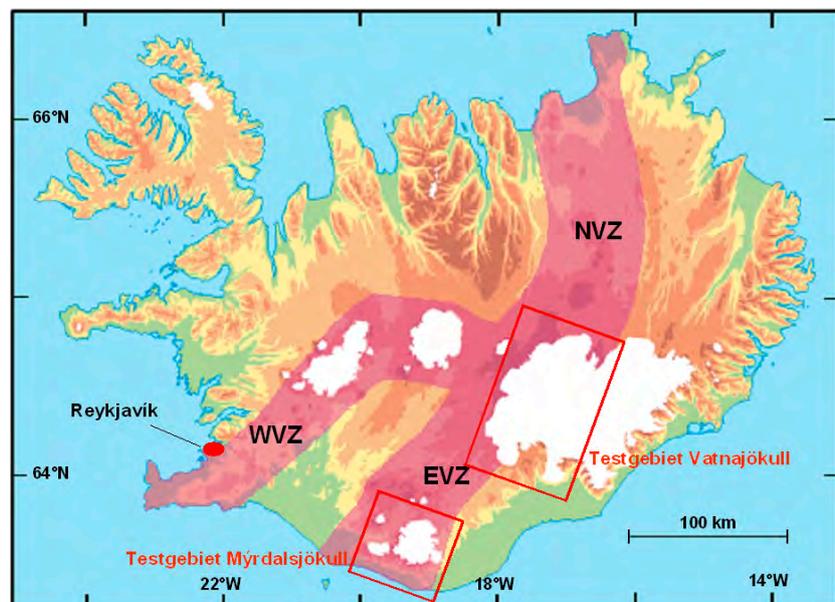
Abb. 1:

Lage der Testgebiete Mýrdalsjökull und Vatnajökull-West mit Verlauf der Neovulkanzone durch Island.

WVZ = Western Volcanic Zone

EVZ = Eastern Volcanic Zone

NVZ = Northern Volcanic Zone



¹ Dr. Ulrich Münzer, Department für Geo- und Umweltwissenschaften, Sektion Geologie, Ludwig-Maximilians-Universität München, Luisenstr. 37, 80333 München, e-mail: ulrich.muenzer@iaag.geo.uni-muenchen.de

¹ Dipl. Geogr. Kilian Scharrer, e-mail: k.scharrer@iaag.geo.uni-muenchen.de

² Ágúst Gudmundsson, Fjarkönnun ehf, Furugrund 46, 200 Kópavogur, Island, e-mail: fjarkonn@simnet.is

Aufgrund der seit 1992 durchgeführten diversen Forschungsprojekte (ESA AO2.D116, NASDA JERS-1/0410) am Department für Geo- und Umweltwissenschaften, Sektion Geologie der Ludwig-Maximilians-Universität, steht für beide Untersuchungsgebiete ein einzigartiges SAR-Datenarchiv über einen Zeitraum von mehr als 10 Jahren zur Verfügung. Erweitert wird das Monitoring durch ein Archiv von Daten optischer Satellitensysteme (Landsat MSS, -TM, SPOT, JERS-1/OPS, ASTER) bis in das Jahr 1973 zurückreichend.

Der europäische Umweltsatellit ENVISAT umkreist die Erde in etwa 800 Kilometern Höhe auf einem sonnensynchronen, polnahen Orbit. Da es sich um ein aktives Fernerkundungssystem handelt, kann die ASAR (Advanced Synthetic Aperture Radar) –Antenne wetter- und beleuchtungsunabhängig Daten von den Testgebieten liefern (ESA 1998). Daher eignet sich die Radartechnik besonders gut für ein kontinuierliches Monitoring auf Island mit seinen ungünstigen klimatischen Verhältnissen.

Für dieses Projekt wurden aus den diversen Konfigurationsmöglichkeiten der ASAR-Antenne, die Aufzeichnungsparameter so ausgewählt, dass zum einen eine Kontinuität zu den älteren ERS-1/2 Daten mit einem Einfallswinkel von 21,5° (identisch ENVISAT-ASAR Mode IS2) besteht. Zum anderen wurde wegen der starken Reliefunterschiede in den Testgebieten auf ASAR-Szenen des Antennenschwad IS5 (Einfallswinkel von 37,5°) zurückgegriffen (Abb. 2).

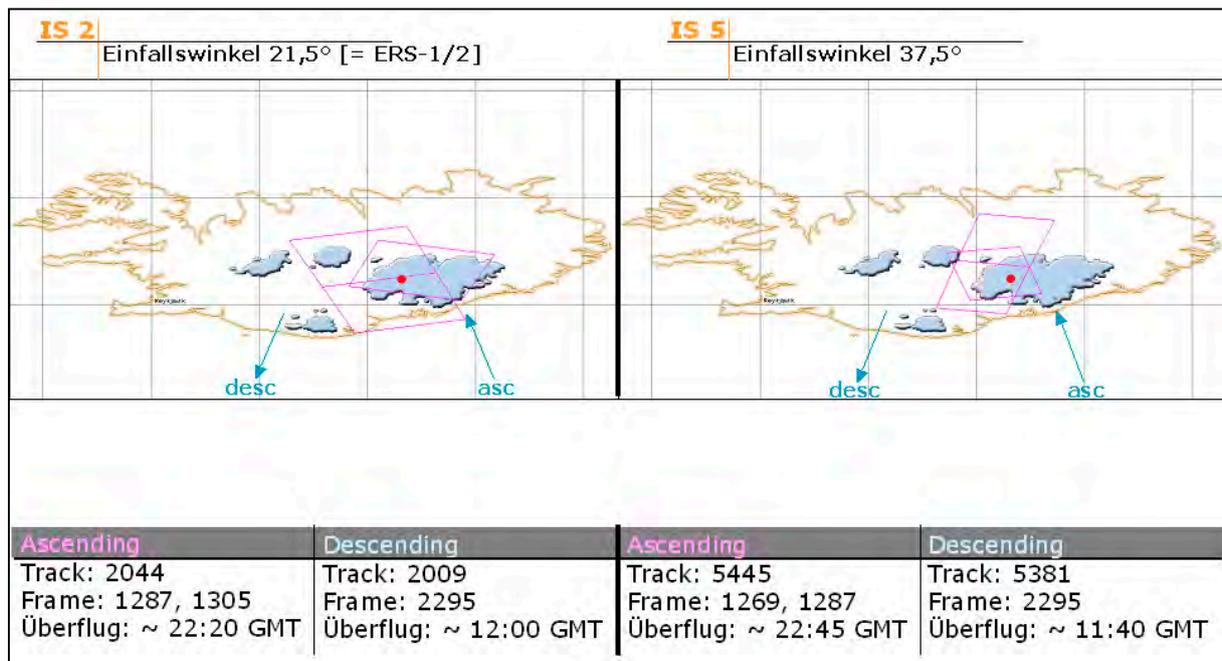


Abb. 2: ENVISAT-ASAR Datenaufzeichnung über dem Testgebiet Vatnajökull-West

ENVISAT besitzt eine Bahnwiederholungsrate von 35 Tagen. Durch die Möglichkeit dasselbe Gebiet der Erdoberfläche aus verschiedenen Aufnahmewinkeln aufzuzeichnen, können wesentlich kürzere Repetitionsraten erreicht werden (ESA 2002). Für die Testgebiete Mýrdalsjökull und Vatnajökull-West kann etwa alle 9 Tage (Swath IS 2 und IS 5) auf eine weitere Aufnahme zurückgegriffen werden.

Darüber hinaus wird vor allem ein reichhaltiges, geowissenschaftliches Datenmaterial (seismische, hydrologische, strukturgeologische, glaziologische, meteorologische und andere Datensätze) von den in- und ausländischen Co-Investigatoren des ENVISAT-Projektes zur Verfügung gestellt. Für die weitere Verarbeitung, Untersuchung und Integration in das neu zu entwickelnde Katastrophen-Monitoring-System wird auch im Testgebiet Vatnajökull-West ein Geographisches Informationssystem (GIS) aufgebaut (MÜNZER et al. 2004).

Die Grímsvötn Eruption 2004

Mit seinen 8100 km² Fläche ist der Vatnajökull nicht nur Islands, sondern auch Europas größter Plateaugletscher. Seine durchschnittliche Eismächtigkeit wird mit rund 400 m von BJÖRNSSON & EINARSSON (1990) angegeben, die mächtigsten Eisbereiche mit rund 1000 m sind am Zentralvulkan Bárðarbunga im Norden des Eisplateaus anzutreffen.

Mit 2119 m NN ist der Hvannadalshnjukur im Süden des Vatnajökull, d.h. auf dem subglazialen Zentralvulkan Oraefajökull, die höchste Erhebung Islands.

Der östliche Ast der Neovulkanzone Südislands durchzieht in SW-NE Richtung den westlichen Teil des Vatnajökull und bedingt dort somit eine äußerst hohe seismische und vulkanische Aktivität. Spaltenschwärme wie z.B. Askja-Bárðarbunga-Hamarinn-Foggrufjöll oder Laki-Thórdarhyrna-Grímsvötn-Kverkfjöll folgen dieser Richtung. In enger Verbindung zu diesen Spaltenschwärmen stehen die subglazialen Zentralvulkane wie der Oraefajökull, Thórdarhyrna (1), Esjufjöll, Grímsvötn (2), Hamarinn (3), Bárðarbunga (4), Kverkfjöll (5) und Godahnukar (Abb. 3) (BJÖRNSSON & EINARSSON 1990, EINARSSON et al. 1997).

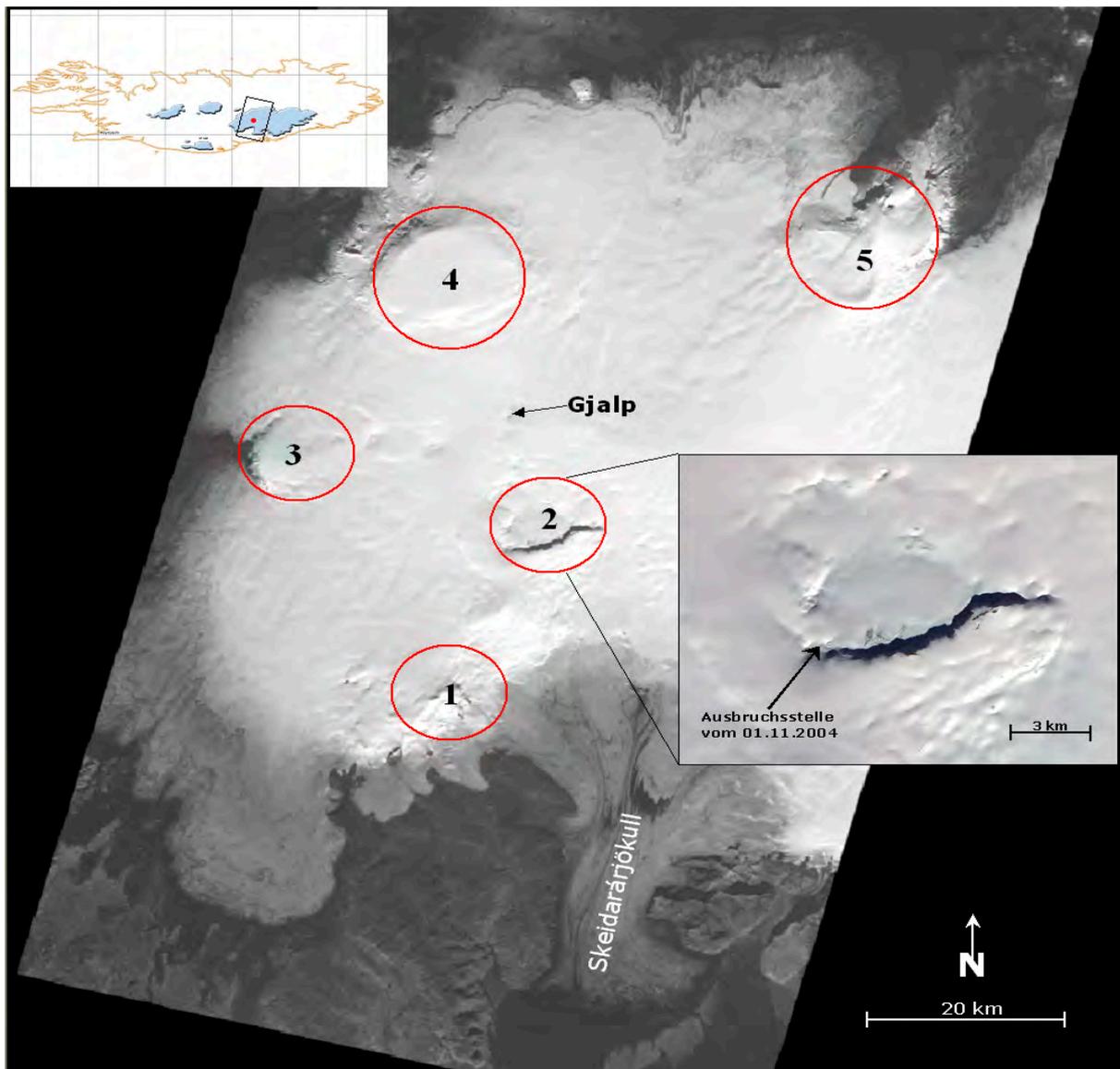


Abb. 3: Geokodiertes ASTER-Mosaik vom 27.09.2004 des westlichen Vatnajökull mit der Lage der subglazialen Zentralvulkane (1-5) und der Gjalp-Eruption 1996, sowie ein Detailausschnitt der Grímsvötn-Caldera
© NASA 2004

Der subglaziale Zentralvulkan Grímsvötn (N 64° 24', W 17° 22') liegt im zentralen Bereich des westlichen Vatnajökull. Eine ca. 62 km² große Caldera paust sich durch die Eisschichten und ist somit morphologisch gut auf allen Satellitenzenen erkennbar. Nur der südliche Rand der Caldera prägt sich als ca. 5 km langer, E-W gezogener Rücken (Grímsfjall) mit den Erhebungen Sviahnúkur West und Ost mit ca. 1730 m NN aus dem Eis.

Der Innenbereich der Grímsvötn Caldera ist mit einer ca. 250 m mächtigen Eisschicht bedeckt, aufgelagert auf ein subglaziales Wasserreservoir – dem See Grímsvötn. Durch die anhaltende geothermale Aktivität füllen seit dem großen Ausbruch 1938 Schmelzwässer in einem fast regelmäßigen Rhythmus von 4-6 Jahren dieses subglaziale Wasserreservoir, bis es bei einer kritischen Höhe von ca. 1440 m NN schlagartig subglazial als Gletscherlauf (Jökulhlaup) mit unvorstellbaren Wassermengen an der Stirnfront des Skeidarárjökull, einer ca. 50 km nach Süden reichenden Gletscherzunge, ausfließt und weite Bereiche des Skeidarásandur überflutet (EINARSSON et al. 1997).

Seit dem gewaltigen Vulkanausbruch am Grímsvötn im Jahr 1934 (THÓRARINSSON 1953, SCHMIDT-TANNWALD 1954) traten Gletscherläufe in einer engen Zeitabfolge in den Jahren 1938, 1941, 1945, 1948, 1954, 1960, 1965, 1972, 1976, 1982, 1983, 1986, 1991, 1996, 1998 und anschließend mit geringen Abflusssummen in den Jahren 1999, 2000, 2002, 2003, 2004 und 2005 auf (SNORRASON et al. 1997, SIGURDSSON mdl. Mitteilung 2005).

Die Grímsvötn ist einer der aktivsten Vulkane Islands mit insgesamt 20-35 Eruptionen seit der Besiedlung des Landes im Jahre 874 und einem geschätzten Fördervolumen von 30-35 km³ seit diesem Zeitraum (GUDMUNDSSON & BJÖRNSSON 1991). Seit den beiden großen Ausbrüchen in den Jahren 1934 und 1938 ereigneten sich in letzter Zeit am südlichen Rand der Grímsvötn Caldera 1983 und 1998 kleinere Vulkanausbrüche (MÜNZER et al. 2000). Der spektakuläre Gjálp- Ausbruch ereignete sich nur wenige Kilometer nördlich der Grímsvötn Caldera im Jahre 1996 (30.9. – 13.10.). Dabei wurde dort das ca. 400 m mächtige Gletschereis auf einer Länge von ca. 9 km aufgerissen und rund 3,4 km³ Eis abgeschmolzen (MÜNZER et al. 2000; EINARSSON et al. 1997). Während der zweitägigen Flutkatastrophe mit einem maximalen Abfluss von 53.000 m³/s und einer Abflussmenge von ~ 3,4 km³ (SNORRASON et al. 1997) wurde die Infrastruktur (Straßen, Brücken, Stromleitungen etc.) erheblich beschädigt. Im Vergleich zu den Flutkatastrophen der Jahre 1934 und 1938 mit Abflusssummen von ~4,5 bzw. 4,7 km³ waren die Folgen des 1996er Gletscherlaufes jedoch „weitaus“ geringer.

Die vorerst letzte Eruption des subglazialen Vulkans Grímsvötn begann am 01.11.2004 gegen 22 Uhr (GMT) und dauerte bis zum 06.11.2004 an.

Die Eruption wurde von lang- und kurzfristigen Vorzeichen angekündigt. So verstärkte sich die seismische Aktivität ab Mitte des Jahres 2003 deutlich, ebenso wurde eine kontinuierliche Hebung innerhalb der Caldera mittels GPS-

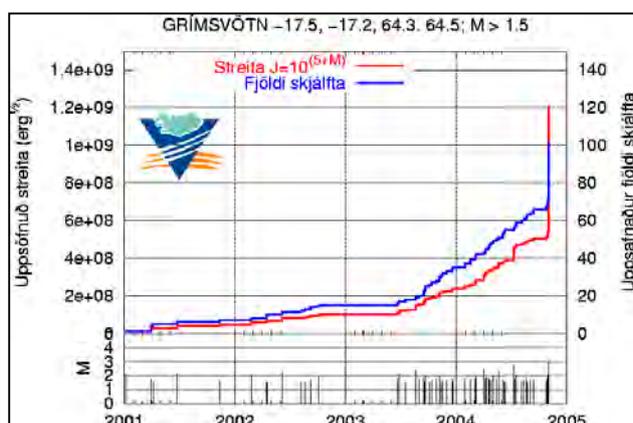


Abb. 4: Anstieg der seismische Aktivität im Bereich der Grímsvötn-Caldera.

© Icelandic Meteorological Office, 2004.

Dataen festgestellt (SIGMUNDSSON & GUDMUNDSSON 2004). Die Anhebung erreichte bereits im September 2004 in etwa dieselbe Höhe wie vor der letzten Eruption 1998. Der subglaziale Schmelzwassersee innerhalb der Caldera erreichte schließlich eine kritische Höhe von 1423 m NN, durchbrach am 28. Oktober subglazial die Eisbarriere und floss durch Schmelzwassertunnel über eine Strecke von 50 km unter dem Skeidarárjökull mit einer relativ geringen Abflusssumme von 0,8 km³ zur Südküste hin ab (VOGFJÖRD et al. 2005). Die so entstandene Druckentlastung innerhalb der Grímsvötn-Caldera löste letztendlich die neue Eruption aus, deren Beginn sich am

1. November durch zahlreiche Erdbebenschwärme ankündigte (Abb. 4). Sowohl der Grímsvötn-Ausbruch im Jahr 1998 (18.12. – 28.12.), als auch der vorerst letzte im Jahr 2004 (01.11. – 06.11.) hatte eine kurze Dauer von 10 bzw. 6 Tagen. Beide Ausbrüche hatten phreatischen Charakter mit stark sinkender Intensität nach einigen Tagen.

Near Real Time SAR Monitoring

Eine der wichtigsten Weiterentwicklungen des ENVISAT-ASAR Instruments - im Vergleich zu den ERS-Satelliten- ist die Schwenkbarkeit der Antenne in sieben verschiedene Positionen

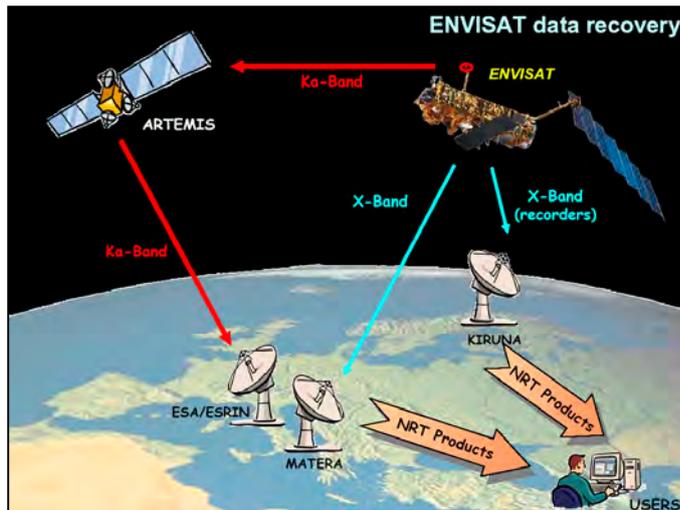


Abb. 5: Schema der Near Real Time Übertragung von ENVISAT Daten. © ESA, 2004

(IS1 – IS7), mit einem Einfallswinkel zwischen 15° und 42°. Daraus ergibt sich theoretisch die Möglichkeit dasselbe Gebiet der Erboberfläche alle 2,5 Tage aufzuzeichnen, würde man alle „Swathes“ sowohl des aufsteigenden, als auch des absteigenden Orbits akquirieren (ESA 2002). Diese kurze Wiederholungsrate ist essentiell für ein Katastrophen-Monitoring. Wie bereits erwähnt, werden innerhalb des ESA-Projektes ID 142 fortlaufend SAR-Daten der Aufnahmemodi IS 2 und IS 5 aufgezeichnet (Abb. 2). Als sich die Anzeichen einer bevorstehenden Eruption an der Grímsvötn verdichteten, wurden von Seiten der ESA die Aufnahmesysteme des ENVISAT speziell für das laufende AO-Projekt so umprogrammiert, dass alle in Frage kommenden Aufnahmemodi (IS 1 – IS 7) für die Grímsvötn-Eruption aktiviert wurden. Über einen eigens eingerichteten FTP-Zugang zum ESA Rolling Archive in Kiruna (Schweden), war es möglich ASAR-Daten 5 Stunden nach Überflug des Untersuchungsgebietes Vatnajökull-West zu erhalten und in die für unser Frühwarnsystem aufgebaute Prozessierungskette unter Verwendung der Softwarepakete ERDAS Imagine (Leica Geosystems) und RSG (Joanneum Research Center, Graz) einzubinden. Somit konnte bei diesem Vulkanausbruch erstmals ein Near Real Time SAR-Monitoring mit den ENVISAT-ASAR Szenen angewendet werden. Dabei durchlaufen die Daten – als wichtigste Schritte – eine Extraktion der Amplitudeninformation, anschließend wird über mehrere Zwischenschritte eine subpixelgenaue Terraingeokodierung durchgeführt. Das Zeitintervall von der Datenaufzeichnung des Satelliten, bis hin zur kompletten

nahmesysteme des ENVISAT speziell für das laufende AO-Projekt so umprogrammiert, dass alle in Frage kommenden Aufnahmemodi (IS 1 – IS 7) für die Grímsvötn-Eruption aktiviert wurden. Über einen eigens eingerichteten FTP-Zugang zum ESA Rolling Archive in Kiruna (Schweden), war es möglich ASAR-Daten 5 Stunden nach Überflug des Untersuchungsgebietes Vatnajökull-West zu erhalten und in die für unser Frühwarnsystem aufgebaute Prozessierungskette unter Verwendung der Softwarepakete ERDAS Imagine (Leica Geosystems) und RSG (Joanneum Research Center, Graz) einzubinden. Somit konnte bei diesem Vulkanausbruch erstmals ein Near Real Time SAR-Monitoring mit den ENVISAT-ASAR Szenen angewendet werden. Dabei durchlaufen die Daten – als wichtigste Schritte – eine Extraktion der Amplitudeninformation, anschließend wird über mehrere Zwischenschritte eine subpixelgenaue Terraingeokodierung durchgeführt. Das Zeitintervall von der Datenaufzeichnung des Satelliten, bis hin zur kompletten

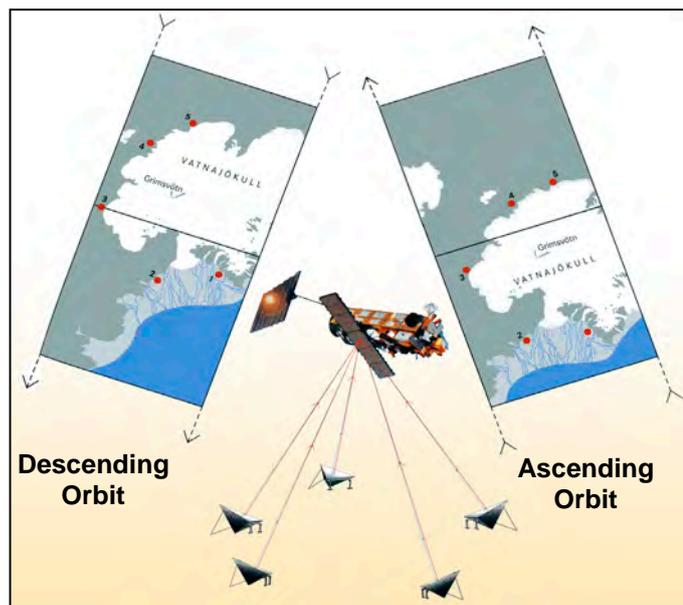


Abb. 6: Lage der Corner-Reflektoren im Testgebiet Vatnajökull-West

Implementierung in unser Hazard-Monitoring-GIS, konnte so erstmals auf unter 6 Stunden reduziert werden.

Durch die schnelle Datenlieferung über den FTP-Server der ESA (5 Std. nach Überflug) und die schnelle SAR Datenprozessierung war es möglich, die Vorgänge während des subglazialen Vulkanausbruchs kontinuierlich in nahezu Echtzeit zu verfolgen. Voraussetzung einer schnellen Datenprozessierung ist die Verwendung von Corner-Reflektoren in den glazialen Gebieten Islands, da die Suche nach geeigneten Passpunkten aus topographischen Karten sich als sehr zeitaufwendig erwiesen hat. Die spezielle Geometrie, sowie die sorgfältig ausgewählte Position der Reflektoren in Bereichen geringer Oberflächenrauigkeit führen zu sehr hohen Rückstreuwerten in den Radarbildern (ERLACHER 1997). Da ENVISAT die gleiche Flugbahn wie die ERS-Satelliten besitzt, konnten im Testgebiet Vatnajökull-West alle 10 Reflektoren (jeweils 5 für den aufsteigenden und absteigenden Orbit) aus dem ERS-Projekt AO2.D116 verwendet werden (Abb. 6).

Durch die Verwendung der Corner-Reflektoren werden bei der Terraingeokodierung Lagegenauigkeiten im Subpixel-Bereich erzielt. Die Prozessierungszeit für die Terraingeokodierung, GIS-Integration und Datenanalyse konnte bei allen ENVISAT-ASAR Daten auf unter 1 Stunde reduziert werden, Voraussetzung für ein Near Real Time Monitoring.

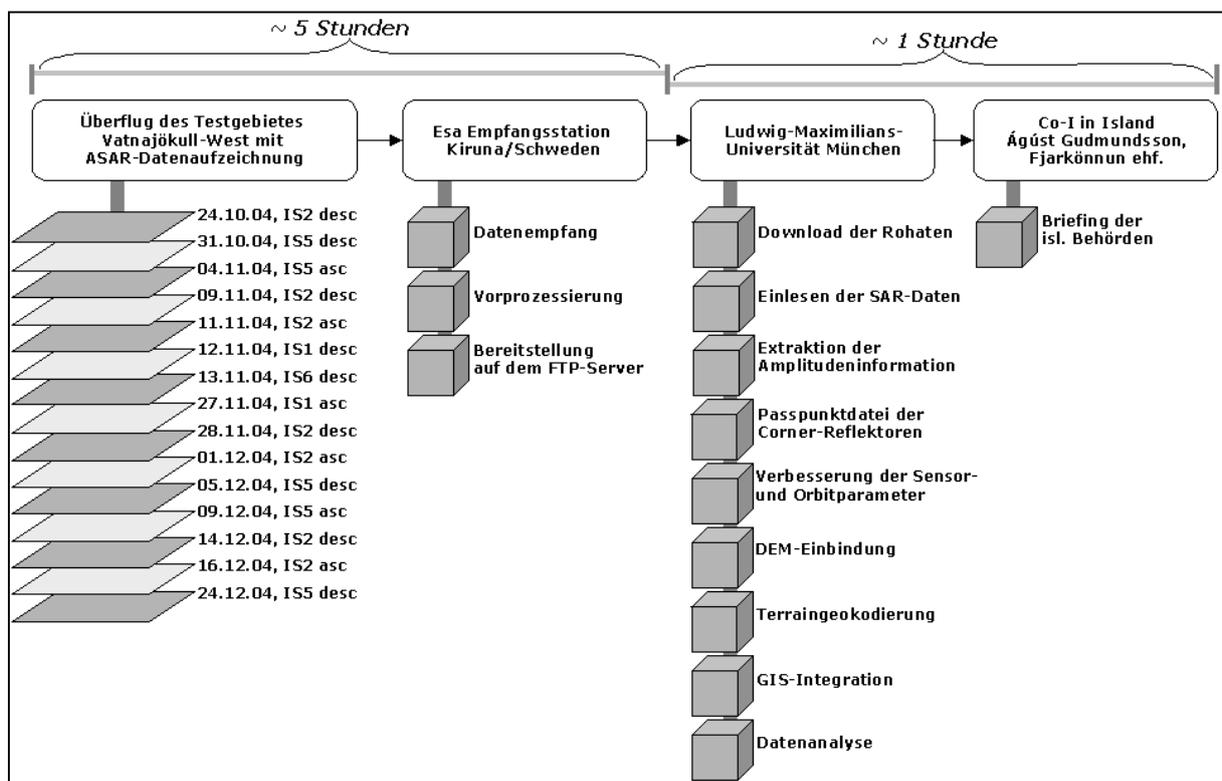


Abb. 7: Schematischer Ablauf des NRT-Monitorings während der Grímsvötn Eruption Nov. 2004

Die Auswertungen der ASAR Daten vom Testgebiet Vatnajökull-West ergaben, dass sich bereits am 24.10.04 (IS 2, desc.) d.h. 8 Tage vor dem subaerischen Vulkanausbruch die Eruptionsstelle im Gletschereis der Grímsvötn Caldera durchpauste. Am 31.10.04 (IS5, desc), also 35 Std. vor dem Ausbruch waren auf der Radarszene Veränderungen an der Eisoberfläche im Detail zu erkennen. Die Auswertungen ergaben somit, dass mindestens 8 Tage vor dem subaerischen Vulkanausbruch ein erhöhter Wärmegradient durch aufsteigendes Magma dazu führte, dass das Gletschereis im Bereich der späteren Eruptionsstelle von unten angeschmolzen wurde und langsam einsank (Abb. 8).

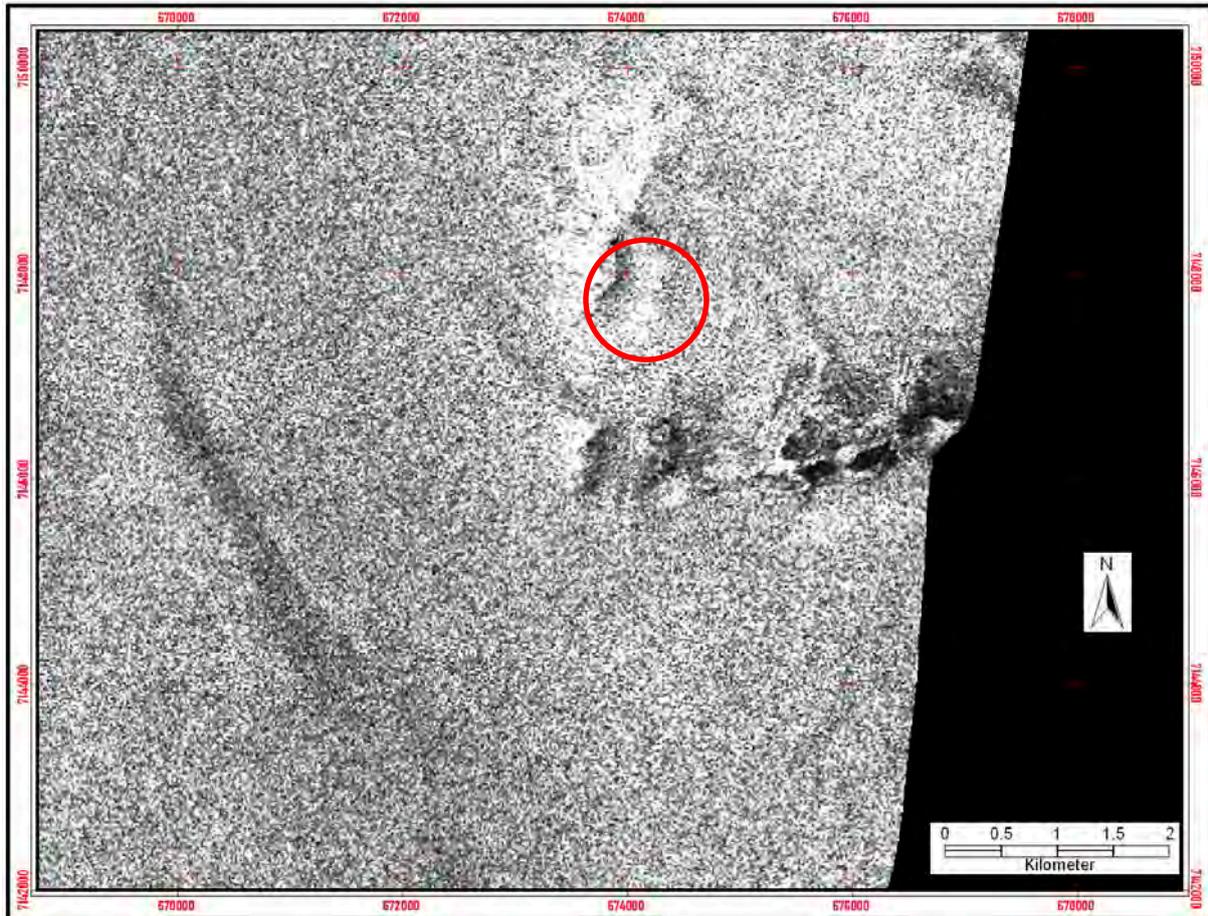


Abb. 8: Terraingeokodierte ENVISAT-ASAR Szene (IS 5, desc) vom 31.10.2004, ca. 35 Stunden vor dem Ausbruch. Die spätere Eruptionsstelle 01.11.04, 22:00 GMT (s. Kreis) zeichnet sich bereits deutlich ab.
© ESA, 2004

Anhand der dichten Zeitabfolge der aufgenommenen ASAR Daten konnte festgestellt werden, dass sich die Ausbruchsstelle über den Verlauf der Eruption (1.11. – 6.11.04) kaum verändert hat. Ihre E-W Ausdehnung von 693 m und N-S von 606 m blieb nahezu konstant. Die Fläche der Ascheablagerungen wurde auf der ASAR Szene vom 4.11.04 (IS 5, asc.) mit 2,85 km² bestimmt.

Die beiden Aschefächer richten sich – anhand der damals vorherrschenden Windrichtung - nach NNW (348°) und NNE (23°) aus, bedecken hauptsächlich die gesamte Grímsvötn Caldera und können bis zum subglazialen Zentralvulkan Bárdarbunga im Norden des Vatnajökull auf einer Länge von 18,4 bzw. 19,6 km detektiert werden (Abb. 9, Abb. 10).

Das frühzeitige Ende der Grímsvötn Eruption am 6.11.2004 führte dazu, dass die dichte Abfolge der Datenaufnahme ab dem 1.12.2004 unterbrochen wurde und vorerst wieder mit den regulären Aufzeichnungen für das Projekt ID 142 (Mode IS 2, IS 5) fortgesetzt wird.

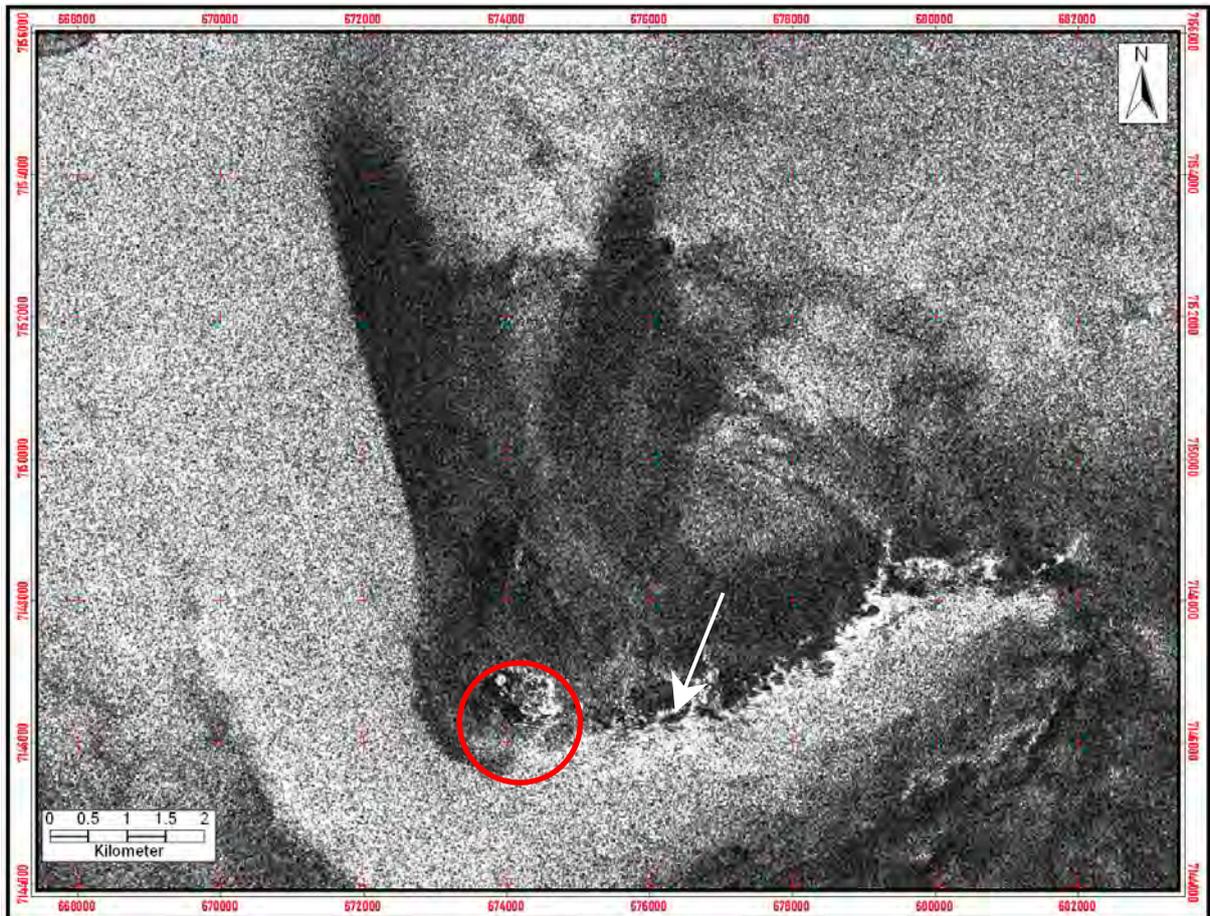


Abb. 9: Terraingeokodierte ENVISAT-ASAR Szene (IS5, asc.) vom 04.11.2004 während der Eruptionsphase mit den Aschefächern in der Grímsvötn Caldera. Die 3 Tage alte Eruptionsstelle ist mit einem Kreis markiert, die Ausbruchsstelle von 1998 mit einem Pfeil. © ESA 2004

Auf der ENVISAT-Szene vom 13.11.04, d.h. sieben Tage nach Ende der Eruption, ist die zwischeneitlich mit Schmelzwasser gefüllte Schmelzwasserfläche wurde aus den Schrägluftbildaufnahme, sondern auch in der „Schmelzwassersee“ der eigentliche Schlot, zu erkennen. Das nahezu kreisförmige von 53 m eindeutig in der ENVISAT-Szene kleine Vulkankegel um den Schlot mit einer zerklüfteten Eisabbrüche um die hohe Rückstreuwerte und grenzen sich „Schmelzwassersee“ mit glatter Oberfläche Deutlich kommt der hohe Stellenwert unterschiedlicher Dateninformation (ENVISAT-ASAR, ASTER und Luftaufnahmen, Seismik) für eine zweifelsfreie Interpretation am Beispiel des Grímsvötn Ausbruchs zur Geltung. Auch hier zeigte sich der große Vorteil eines GIS-basierten Auswertungssystems für weitere Prognosen beim Katastrophen-Monitoring.

7 Tage nach Ende der Eruption, ist die zwischeneitlich mit Schmelzwasser gefüllte Schmelzwasserfläche wurde aus den Schrägluftbildaufnahme, sondern auch in der „Schmelzwassersee“ der eigentliche Schlot, zu erkennen. Das nahezu kreisförmige von 53 m eindeutig in der ENVISAT-Szene kleine Vulkankegel um den Schlot mit einer zerklüfteten Eisabbrüche um die hohe Rückstreuwerte und grenzen sich „Schmelzwassersee“ mit glatter Oberfläche Deutlich kommt der hohe Stellenwert unterschiedlicher Dateninformation (ENVISAT-ASAR, ASTER und Luftaufnahmen, Seismik) für eine zweifelsfreie Interpretation am Beispiel des Grímsvötn Ausbruchs zur Geltung. Auch hier zeigte sich der große Vorteil eines GIS-basierten Auswertungssystems für weitere Prognosen beim Katastrophen-Monitoring.



Abb. 10: Schrägluftbildaufnahme der Grímsvötn Eruption, aufgenommen am 02.11.2004, mit Blickrichtung nach SE.
© Roberts 2004

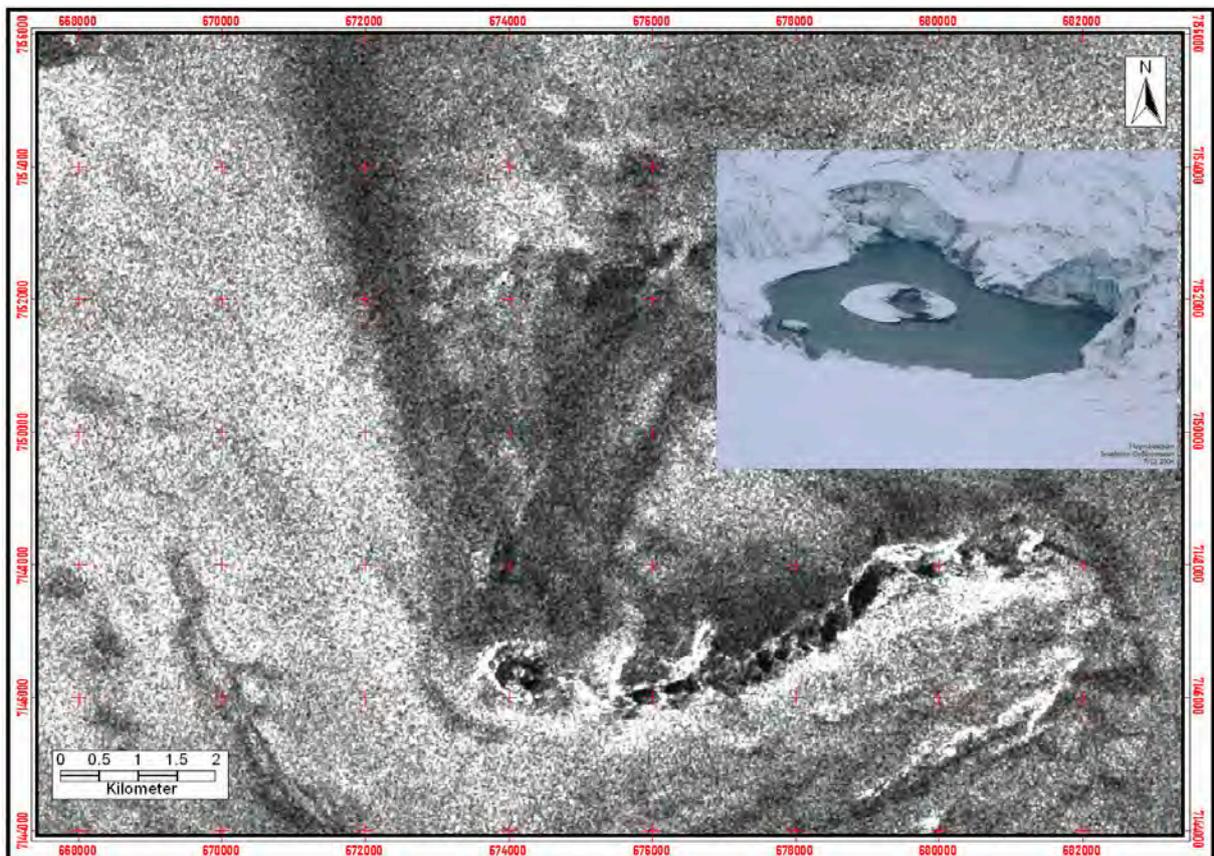


Abb. 11: Terrängecodierte ENVISAT-ASAR Szene vom 13.11.2004 (IS 6, desc.) 7 Tage nach Beendigung des Grímsvötn Ausbruchs mit Schrägluftbild vom 7.12.04 der Eruptionsstelle
© ESA 2004 , © Gudbjörnsson 2004

Zusammenfassung und Ausblick

Bereits in Rahmen des vorangegangenen ERS-Projektes AO2 D116 war mit Hilfe der Radarfernerkundung eine Früherkennung des subglazialen Vulkanausbruchs Gjálp (30.9.-13.10.96) und Grímsvötn (18.-28.12.98) möglich und die sich nun zum 3. mal bei dem erneuten Grímsvötn Ausbruch bestätigte (MÜNZER et al. 2000). Besonders die Wetter- und Beleuchtungsunabhängigkeit der SAR-Daten, sowie die kurzen Beobachtungsintervalle, aufgrund der unterschiedlichen Aufnahmemodi (IS1 – IS7) der ENVISAT-ASAR Antenne, erwiesen sich als entscheidende Vorteile zum Aufbau eines Frühwarnsystems an subglazialen Vulkanen.

Vor allem im Hinblick auf die genaue Lokalisierung der Ausbruchsstelle wird die große Bedeutung eines kontinuierlichen SAR-Monitorings deutlich. So konnte durch die Überwachung und Analyse der seismischen Aktivität die Eruption nur auf den Großraum Grímsvötn Caldera (62 km²) eingegrenzt werden (VOGFJÖRD et al. 2005).

Dagegen war es anhand der vorhandenen ENVISAT-ASAR Szenen später möglich, die Lage der Ausbruchsstelle bereits 35 h vor der tatsächlichen Eruption exakt zu bestimmen. Besonders im Hinblick auf den Abflussweg der Schmelzwasserfluten, die durch eine Eruption entstehen, ist die genaue Kenntnis der Eruptionsstelle von entscheidender Bedeutung.

So kann innerhalb des entwickelten Hazard-Monitoring-GIS durch die Verschneidung mit hydrologischen Daten auf die potentiellen Abflusswege geschlossen und das Gefährdungsgebiet im Vorfeld des Gletschers ausgewiesen werden. Es wird deutlich, dass ein effektives System zur Überwachung subglazialer Eruptionen und deren Auswirkungen nur durch eine Kombination fortlaufender ENVISAT-Aufzeichnungen mit zusätzlichen geowissenschaftlichen Daten erreicht werden kann.

In Zusammenarbeit mit der ESA konnte während der Grímsvötn Eruption im November 2004 die Zeitspanne von der Datenaufzeichnung des Satelliten, bis hin zur kompletten Implementierung in das Hazard-Monitoring-GIS, auf unter 6 Stunden reduziert werden. Dies ist ein weiteres Kriterium für die Effizienz der Überwachung von Naturgefahren.

Gegenwärtig wird daran gearbeitet die Prozessierungskette weitgehendst zu automatisieren, um somit den Zeitraum für die Integration weiter zu verkürzen.

Ziel ist es, innerhalb der Projektlaufzeit, in enger Zusammenarbeit mit der ESA die 1 Stundenmarke von der Datenaufnahme über die Prozessierung, bis hin zur Analyse für die isländischen Testgebiete zu erreichen und anschließend die entwickelte Methodik weltweit auf andere subglaziale Vulkane in ähnlicher Weise zu übertragen.

Danksagung

Der ESA sei für die großzügige Bereitstellung des benötigten Datenmaterials im Rahmen des ENVISAT-Projektes (ID142) zum Katastrophen-Monitoring in Island gedankt, vor allem für die z.T. nur einige Stunden dauernde Datenauslieferung nach der Überfliegung des Grímsvötn Vulkans zum Aufbau eines NRT-Monitoring.

Ein besonderer Dank geht an den Co-I H. Rott, Institut für Meteorologie und Geophysik, Universität Innsbruck, für die gute, wissenschaftliche Zusammenarbeit und fachlichen Ratschläge.

Die Hilfe und spezielle Anpassung des Software Paketes RSG an unsere Anforderungen durch J. Raggam, W. Hummelbrunner und K.H. Gutjahr, Joanneum Research Center Graz, war eine große Unterstützung für die laufenden Forschungsarbeiten.

Die Untersuchungen im ENVISAT-Projekt werden durch ein Doktorandenstipendium der Bayerischen Forschungsförderung (Förderkennzeichen: DPA-37/04) unterstützt.

Die Münchner Universitätsgesellschaft ermöglichte durch einen Zuschuss die laufenden Geländearbeiten in Island. Beiden Institutionen sei ein herzlicher Dank ausgesprochen.

Dem Icelandic Meteorological Office (Vedurstofa), Reykjavík, sei für Bereitstellung der seismischem SIL-Daten für dieses Projekt gedankt, sowie dem Icelandic Research Council (RANNIS), Reykjavík, für die Genehmigung der wissenschaftlichen Arbeiten in Island (Declaration Nr. 1/2005; 5/2005).

Literaturverzeichnis

- BJÖRNSSON, H. & EINARSSON, P.(1990): Volcanoes beneath Vatnajökull, Iceland: Evidence from radio echo-sounding, earthquakes and jökulhlaups.- *Jökull*, 40: 147-169. Reykjavík.
- EINARSSON, P.; BRANDSDOTTIR, B.; GUDMUNDSSON, M. T.; BJÖRNSSON, H. & GRÖNVOLD, K., (1997): Center of the Icelandic Hotspot Experiences Volcanic Unrest.- *EOS Transactions, American Geophysical Union*, Vol. 79, No. 35, 369, 374-375.
- ERLACHER, G. (1997): Das Rückstreuverhalten natürlicher Oberflächen in Island aus ERS-SAR Daten und Feldmessungen.- unv. Diplomarbeit, 175 S., Leopold-Franzens-Universität Innsbruck.
- ESA (Hrsg.), (1998): Envisat Mission. Opportunities for Science and Applications.- SP-1218. Noordwijk.
- ESA (Hrsg.), (2002): ASAR Product Handbook. Barcelona.
- GUDMUNDSSON, M. T. & BJÖRNSSON, H., (1991): Eruptions in Grímsvötn, Vatnajökull Iceland 1934-1991.- *Jökull*, 41: 21-45. Reykjavík.
- MÜNZER, U.; BAHR, T. & WEBER.DIEFENBACH, K., (2000): Katastrophen-Monitoring am Beispiel Islands. Schlussbericht Förderkennzeichen 50 EE 9706. 62 S. München.
- MÜNZER, U.; SCHARRER, K.; WEBER.DIEFENBACH, K. & GUDMUNDSSON, Á., (in press): Integration of ENVISAT-ASAR Data in a Hazard-Monitoring-GIS. ENVISAT Project [ID 142].- Proceedings of the ERS-ENVISAT Symposium, Salzburg, Austria, 6-10 Sept. 2004, ESA. Publ.
- ROTT H., MAYER, C. & FISCHER, A., (2001): The application of ERS SAR interferometry for the assessment of hazards related to slope motion and subglacial volcanism. Proc. of ERS-ENVISAT Symposium, Gothenburg, Sweden, 16-20 Oct 2000. ESA SP-461, CD-ROM, ISBN 92-9092-685-6, Paper ID: 234, 12 S.
- SCHMID-TANNWALD, K., (1954): Der untereisische Ausbruch des Vulkanes Grímsvötn 1934 im Vatnajökull auf Island.- *Naturwiss. Monatszeitschrift des deutschen Naturkundevereins*, Heft 7/8, 153-159, Tübingen.
- SIGMUNDSSON, F. & GUDMUNDSSON, M. T., (2004): Eldgosið í Grímsvötnum í nóvember 2004. – The Grímsvötn eruption, November 2004.- *Jökull*, 54: 139-143. Reykjavík.
- SNORRASON, Á.; JÓNSSON, P.; PÁLSSON, S.; ÁRNASON, S.; SIGURDSSON, O.; VÍKINGSSON, S.; SIGURDSSON, Á. & ZÓPHONIASSON, S., (1997): Hlaupið á Skeiðarásandi Haustið 1996. Útbreiðsla, Rennsli og Aurburður.- VEGAGERDIN (Hrsg.): Vatnajökull. Gos og Hlaup 1996: 79-137. Reykjavík.
- THÓRARÍNSSON, S., (1953): The Grímsvötn Expedition June-July 1953.- *Jökull*, 3: 6-22. Reykjavík.
- VOGFJÖRD, K. S. et al., (in press): Forecast and Multidisciplinary Monitoring of a Subglacial Eruption in Iceland.- submitted to EOS.

Remote Sensing and GIS Contribution to Tsunami Risk Detection

BARBARA THEILEN-WILLIGE

Abstract: Data from the Shuttle Radar Topography Mission (SRTM,2000) LANDSAT ETM and ENVISAT ASAR data have been evaluated from five test sites in NW-Sumatra, NW-Turkey, S-Italy, W- Portugal and NE-Venezuela in order to detect traces of earlier tsunami events and to map potential tsunami risk sites. The GIS embedded evaluations of LANDSAT ETM imageries merged with digitally processed and enhanced SRTM data clearly show areas that must have been flooded in earlier times. In some cases as Southern Italy morphologic traces of waves as curvilinear scarps open to the sea-side are visible. The overlay of the evaluation results with infrastructural facilities as roads and railroads allows the detection of potential damages.

1. Introduction

Tsunamis have been reported since ancient times. They have been documented extensively, especially in Japan and the Mediterranean areas. The Mediterranean and Caribbean Seas both have small subduction zones, and have histories of locally destructive tsunamis. However, our knowledge of tsunamis still is incomplete. On December 26, 2004 a magnitude 9.3 earthquake struck Indonesia. The tsunami triggered by the earthquake destroyed a great part of the coast of southeast Asia and many islands in the Indian Ocean in an unforeseen dimension. The earthquake was one of the five largest quakes in last 100 years and is the largest since the 1964. As many of earthquake- and tsunami prone countries cannot afford expensive tsunami research and alert systems which would support risk and alert planning, it would be very helpful for those countries to use all the possibilities of remote sensing data and GIS-technology combining all necessary data sources. International organisations as UNOSAT or ESA have already provided many data for this purpose. For monitoring tsunami hazard prone areas the data availability is crucial. GIS and satellite observations can help considerably to show vulnerable areas, enhance mapping, and ameliorate the understanding of tsunami hazards and to detect risk sites of infrastructural facilities. The present study is an attempt to contribute to this aspect.

2. Approach

For this study satellite mapping products were generated from several countries prone by tsunami risk to allow more detailed orientations concerning areas which might be affected by tsunami waves. The maps were either produced from archived pre-disaster imagery or from newly collected post-disaster satellite images. Examples from Northwest-Indonesia, Northwest-Turkey, Southern Italy, West-Portugal and Northeast-Venezuela are presented showing LANDSAT ETM imageries combined with SRTM data, ENVISAT and GTOPO30 DEM data from the coasts of these countries (Fig. 1).

The evaluation of the satellite data was carried out in a GIS environment with specific components suited for tsunami research (Fig. 2 and 3). The various data sets as LANDSAT ETM and satellite radar data, topographic, geological and geophysical data from the investigation area were integrated as layers into GIS using the software ArcView GIS 3.2 with the extensions Spatial Analyst und 3D-Analyst and ArcGIS 9 of ESRI. This mapping procedure was used to detect tsunami hazard risk sites. In order to combine the different data and to learn the special spectral reflectance characteristics of tsunami affected sites on LANDSAT ETM im-

ages digital image processing methods were tested. Various image tools delivered by ENVI Software/ CREASO were investigated, for example for finding the best suited RGB combinations or contrast stretching parameters.

For getting a geomorphologic overview, structural analysis and for tsunami traces detection SRTM data derived image products were used as shaded relief and slope degree maps, as well as minimum and maximum curvature maps. Contour lines were created. LANDSAT ETM and SRTM data were provided by the Global Land Cover Facility, Institute for Advanced Computer Studies, University of Maryland, College Park, USA (<http://glcf.umiacs.umd.edu>) and the German Aerospace Research Center (DRL, Oberpfaffenhofen). Height maps based on DEM-Data provided by USGS (<http://www.diva-gis.org/Data.htm>) were used as base maps.

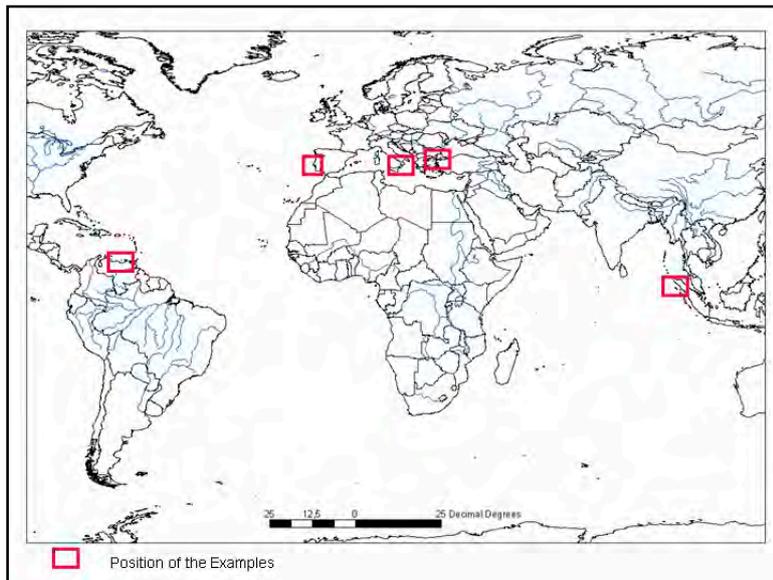


Fig. 1: Position of the investigation areas

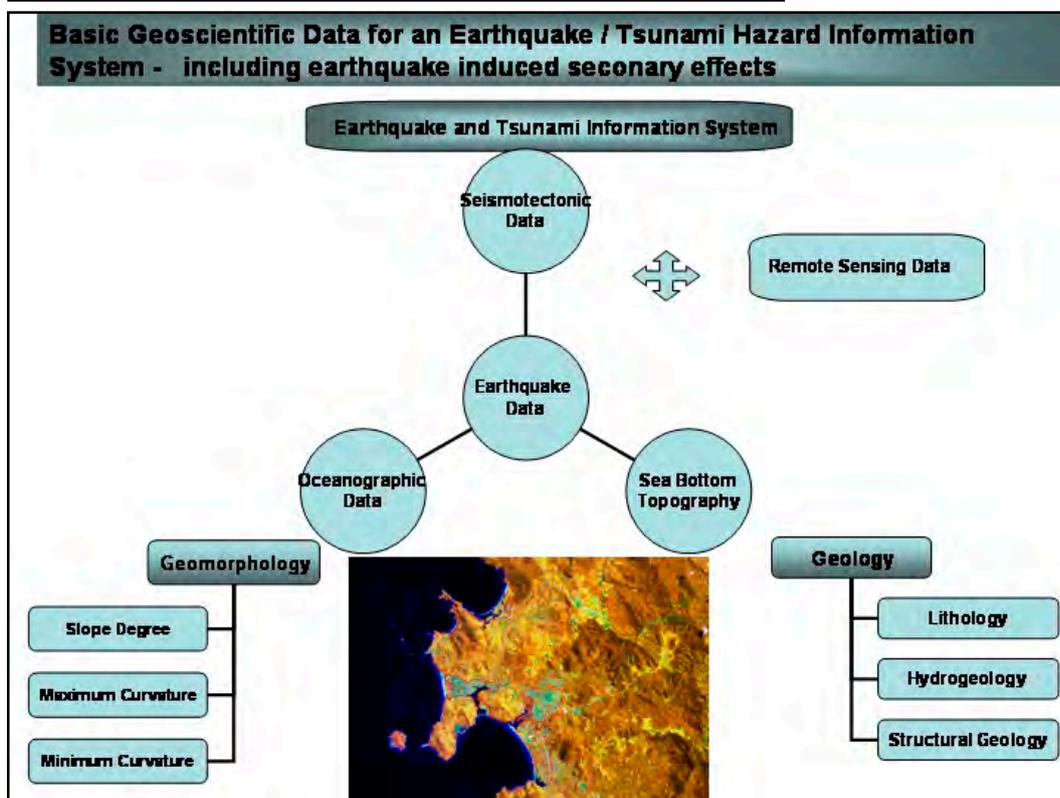


Fig. 2: GIS and Remote Sensing Approach

The remote sensing contribution is described in Fig. 3.

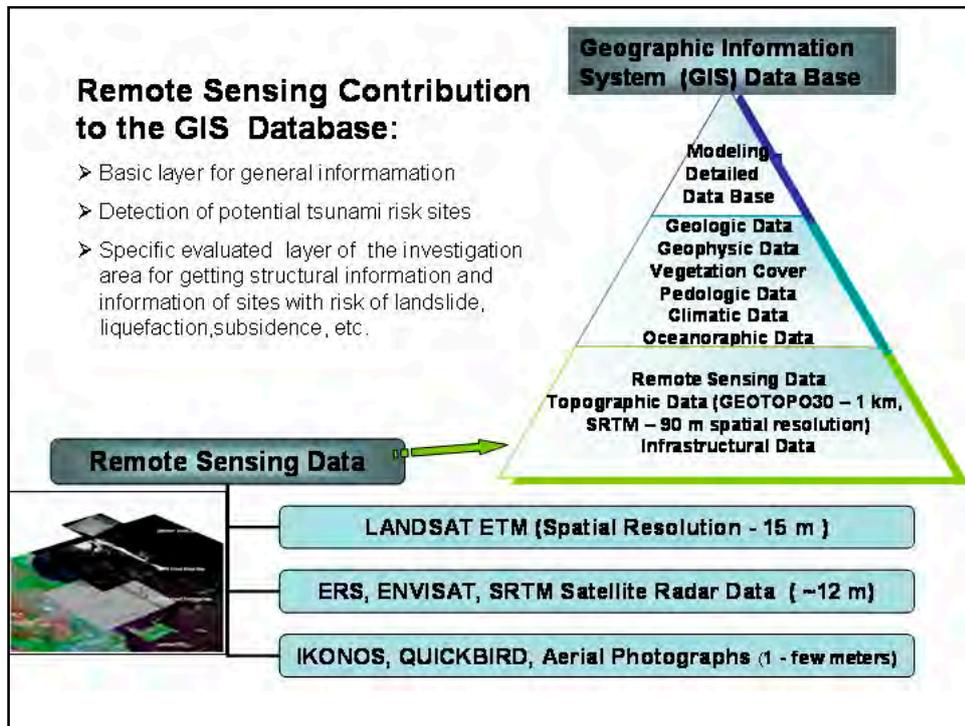


Fig. 3: Remote Sensing Contribution

3. Evaluations of the Data Sets

Some evaluation results of the different investigation areas are presented in the next chapters.

3.1. Remote Sensing Analysis of the Tsunami prone Areas in Northwest- Sumatra and Malaysia

The December 26 tsunami on Indonesia's island of Sumatra documented wave heights of 20 to 30 m (65 to 100 ft) at the island's northwest end and found evidence suggesting that wave heights may have ranged from 15 to 30 m (50 to 100 ft) along a 100-km (60 mi) stretch of the northwest coast (<http://walrus.wr.usgs.gov/tsunami/sumatra05/>). Especially enhanced and processed LANDSAT ETM imageries taken before this catastrophic event clearly indicate areas that had been affected by tsunami events in earlier times (Fig. 4). Combining LANDSAT ETM, SRTM hillshade data and contour lines these tsunami prone areas can be mapped very detailed. Comparing the mapped tsunami areas based on the LANDSAT ETM and SRTM imageries before the event with the flooded areas during and after the 26.12.04 event there is a strong coincidence. Nearly the same areas identified on the older images as tsunami risk sites were flooded on 26.12.04 (Fig. 4 and 5). Within several minutes after the 26.12.04 earthquake, the initial tsunami split into a tsunami that travelled out to the deep ocean (distant tsunami) and another tsunami that travelled towards the nearby coast (local tsunami). Wave run-up at the coast was highly variable: some coasts have been struck by a towering wall of water while others have experienced a tremendous surge of water. Much of this variability depends on the configuration of the coastline and changes in bathymetry as the waves approach. The west-facing coastlines were struck by the highest waves, some more than 30 m high. The area's low-lying land allowed those waves to penetrate far inundation distances in the province (USGS,2005, <http://walrus.wr.usgs.gov/tsunami/sumatra05/measurements.html>). Remote sensing data have the potential to visualize water streams. In Fig. 6 is presented an example of a LANDSAT ETM scene from Thailand showing the water stream pattern.

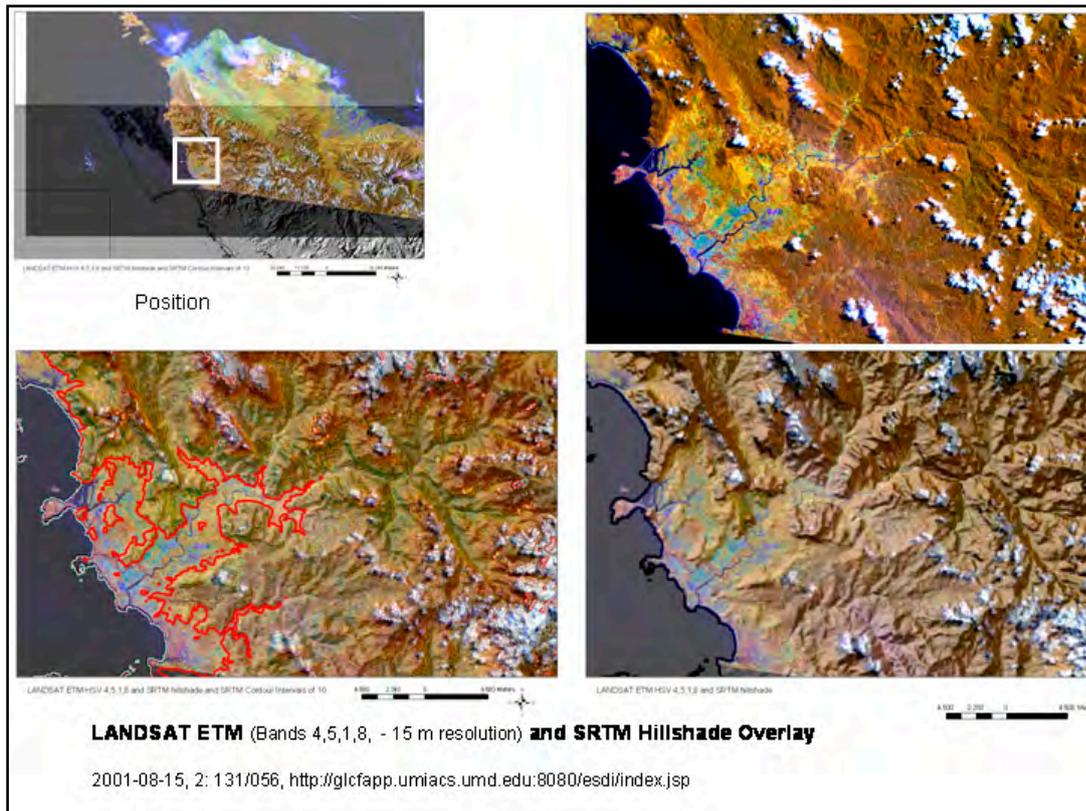


Fig. 4: Mapping of potential tsunami risk site areas based on LANDSAT ETM imagery from 15.August 2001

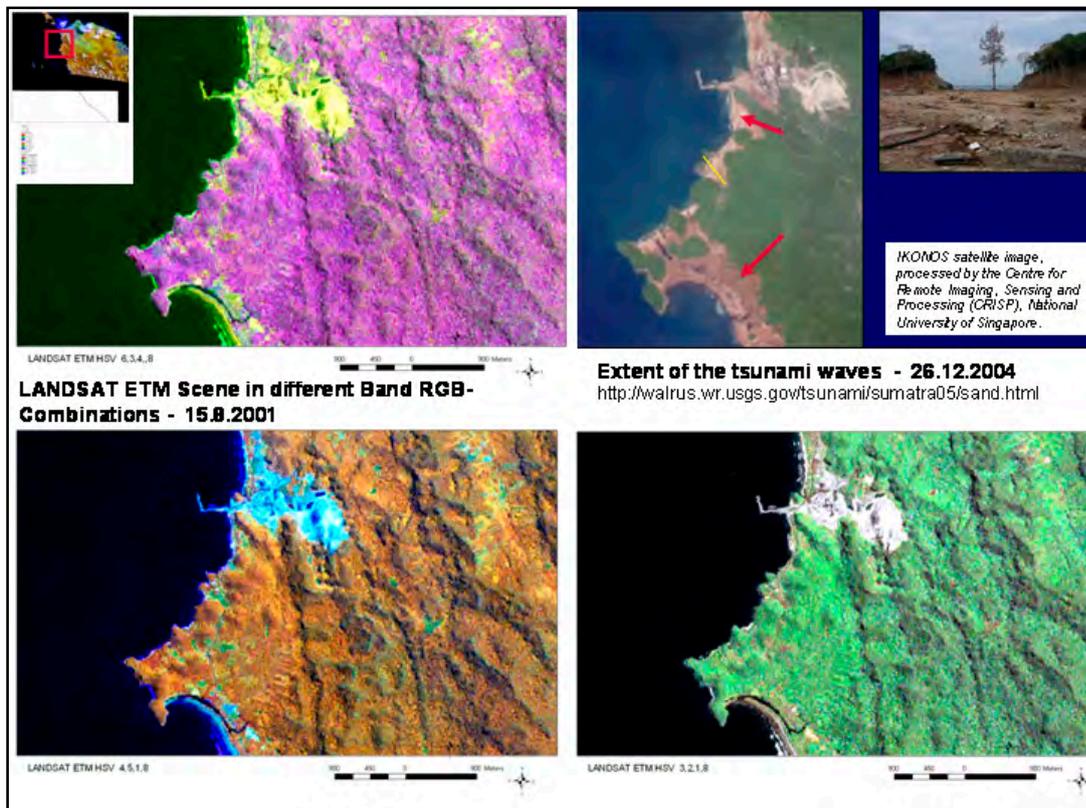


Fig. 5: Comparison of satellite data before and after the tsunami from 26.12.04
 Traces of earlier tsunami events can be detected on the LANDSAT ETM scene...

LANDSAT ETM imageries can contribute to a better understanding of streaming mechanisms in coastal areas by visualizing the stream pattern as the thermal pattern of surface-near water visible on the LANDSAT imageries is related to convection, circulation, wind influence and evaporative cooling over water bodies (Fig. 6).

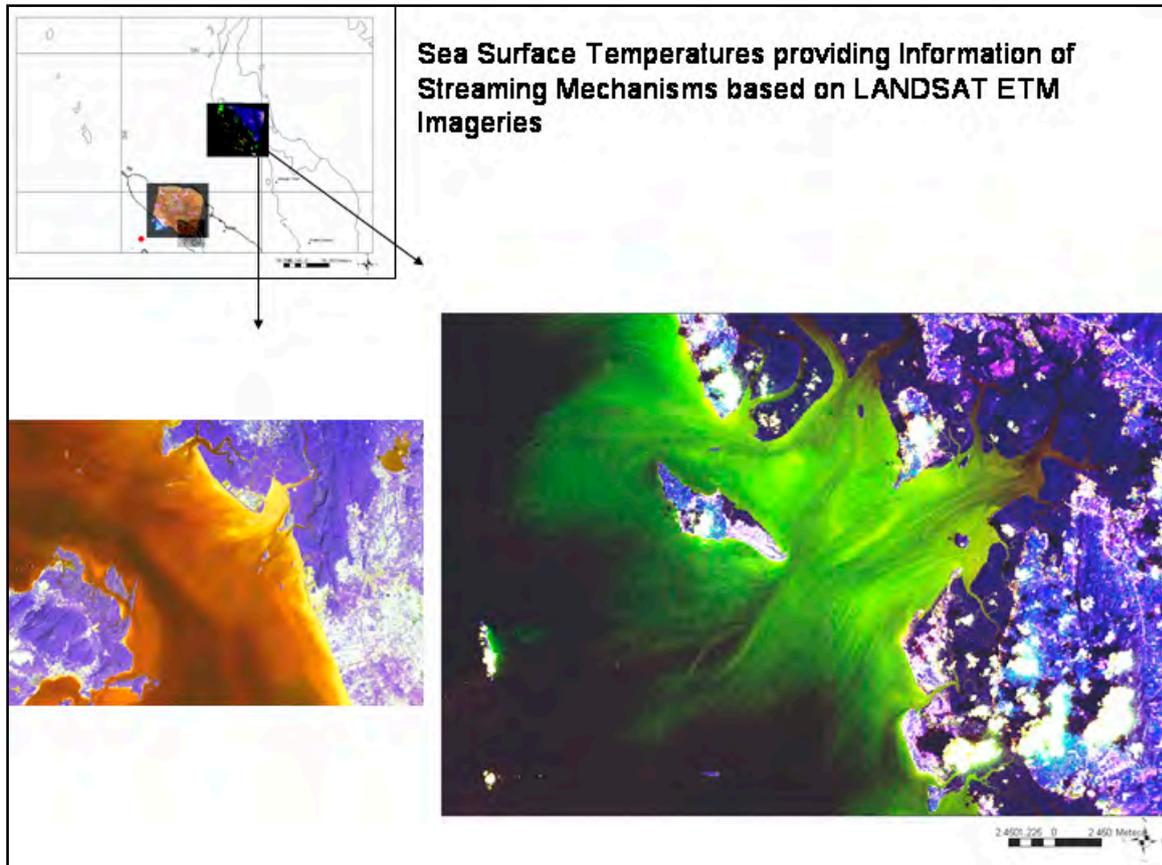


Fig. 6: Sea surface temperatures visible on the LANDSAT ETM scene from the west coast of Thailand providing information of stream mechanisms

3.2. Evaluations of LANDSAT ETM Data from Northwest Turkey

The Marmara Sea has histories of locally destructive tsunamis as for example related to the Kocaeli earthquake (17.8.1999). Large sea waves were reported then in Izmit Bay. Run-up heights ranged up to 2.5m along the shores of the middle basin of the Gulf of Izmit between Hereke and Degirmendere after a general depression. The cause of this phenomenon is argued to be near shore tectonic subsidence and submarine sediment slumping (ERDIK, 2000). As the Marmara Sea is intersected by larger fault zones (North Anatolian Fault –NAF segments) further earthquakes causing tsunamis have to be expected (YALCINER et al.).

Combining LANDSAT ETM data with bathymetric data contributes to a better understanding of the stream mechanisms that might be of importance for tsunami research. In Fig. 7 and 8 some amplifications of the LANDSAT ETM scene are presented merged with bathymetric data.

Strong rupture directivity effects can be assumed which will affect the distribution of strong ground motion. Due to the expected right-lateral fault movements the main seismic shock front might occur in the southern part of the Marmara Sea (Fig. 9). The tsunami front wave pattern might be influenced as well by earthquake induced submarine landslides mainly occurring in the south-eastern part of the Marmara Sea. These circumstances render a precise modeling of tsunami wave propagation difficult.

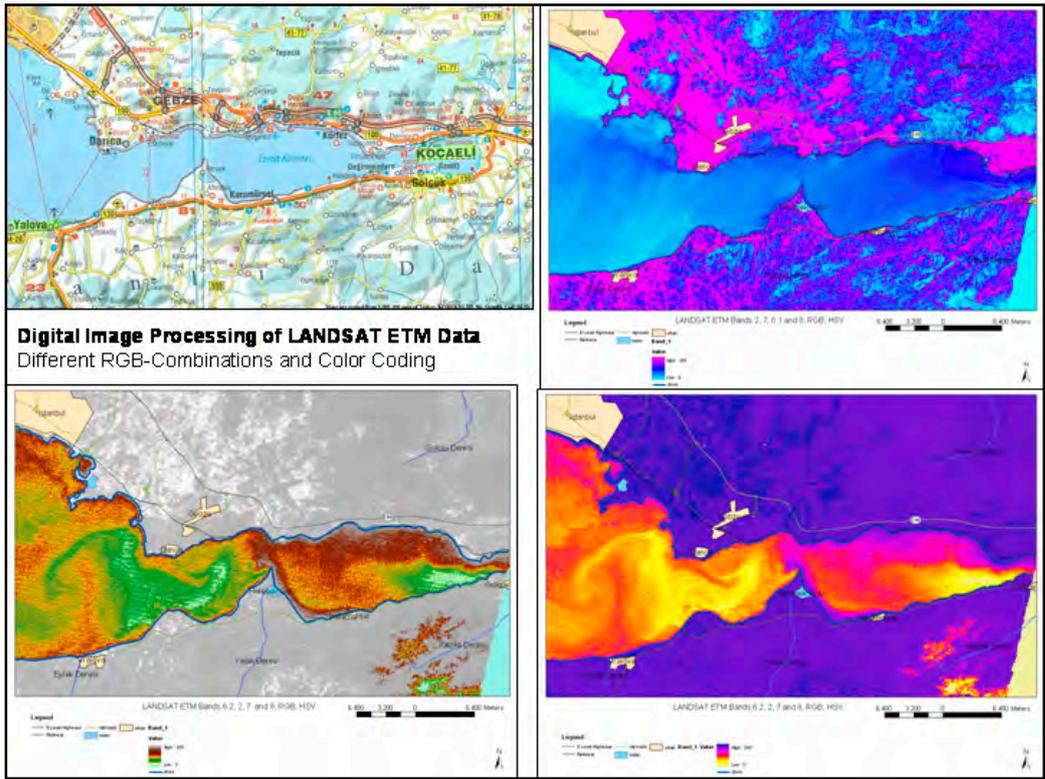


Fig. 7: Sea surface temperatures providing information of water streams in the Eastern Marmara Sea

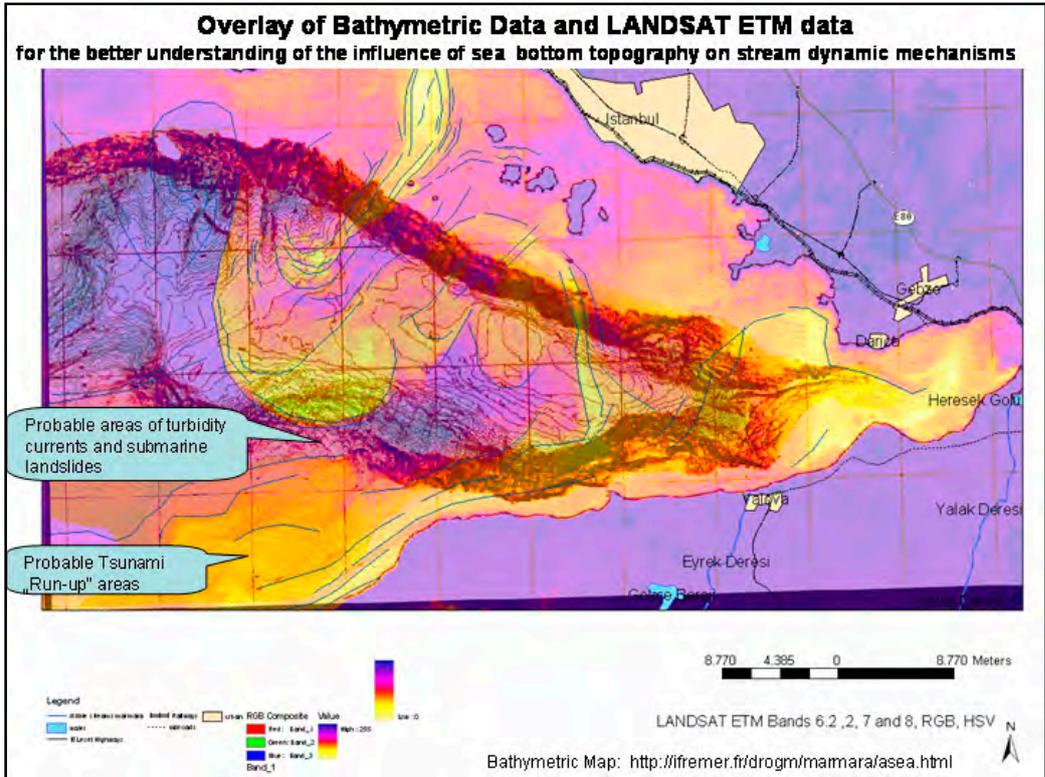


Fig. 8: Merging LANDSAT ETM data with bathymetric maps from the Marmara Sea

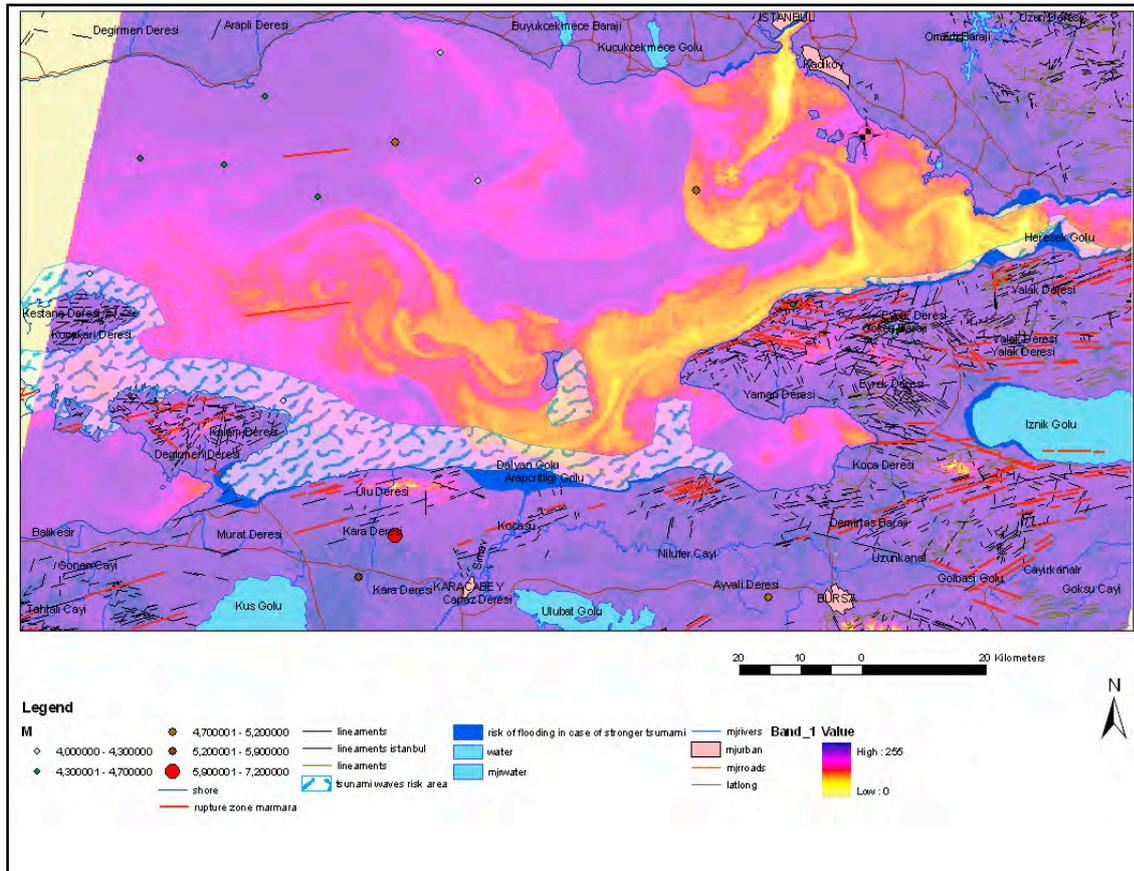
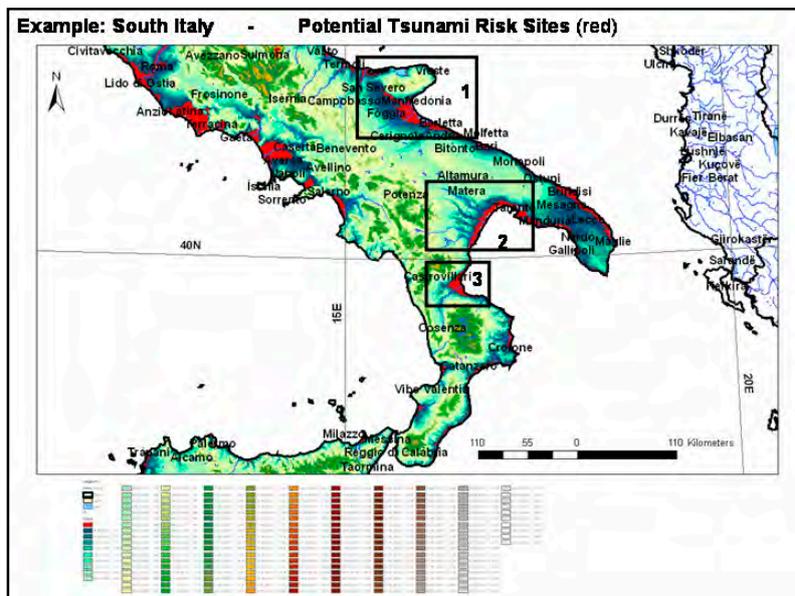


Fig. 9: Tsunami Risk Sites

3.3. Evaluations of LANDSAT ETM and SRTM Data from Southern Italy



Similar work flow approach has been carried out evaluating remote sensing data from Southern Italy.

Fig.10 presents an overview of potential risk sites (red) and of the position of the next examples.

Fig.10 : Height map of Southern Italy indicating potential tsunami risk sites

SRTM data based hillshade, slope, minimum and maximum curvature maps were overlain in GIS to get information about probable geomorphologic traces of tsunami waves.

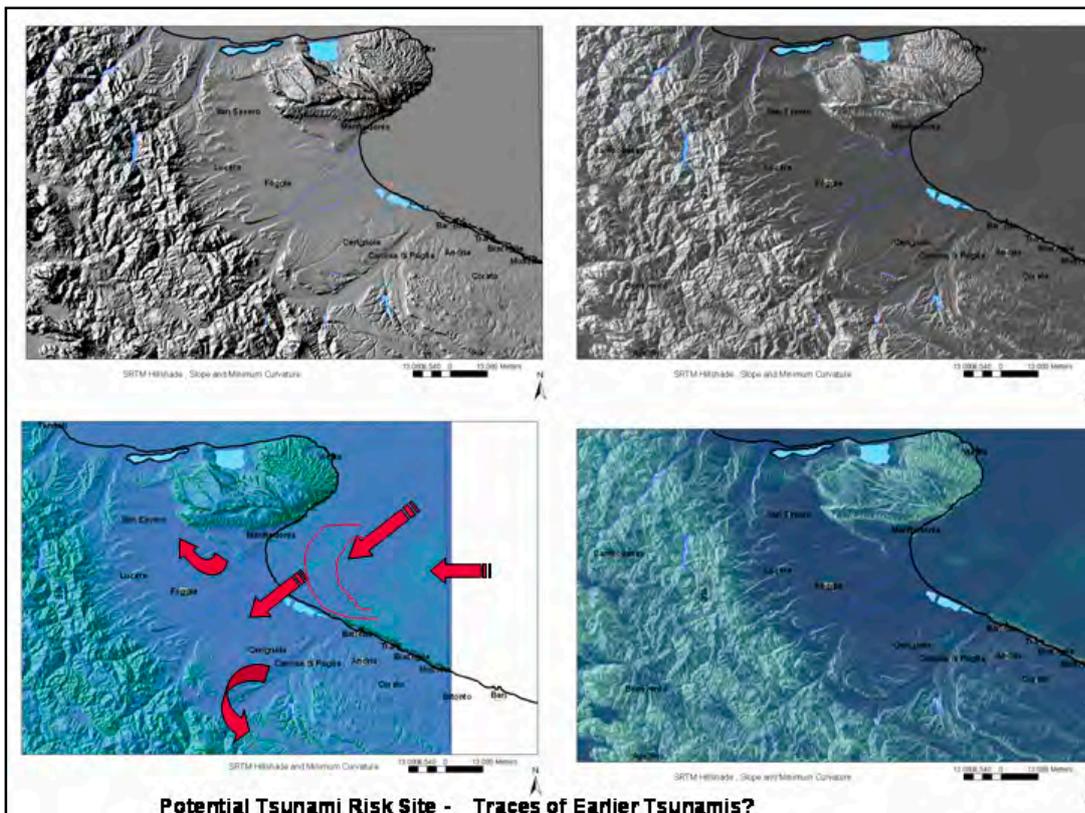
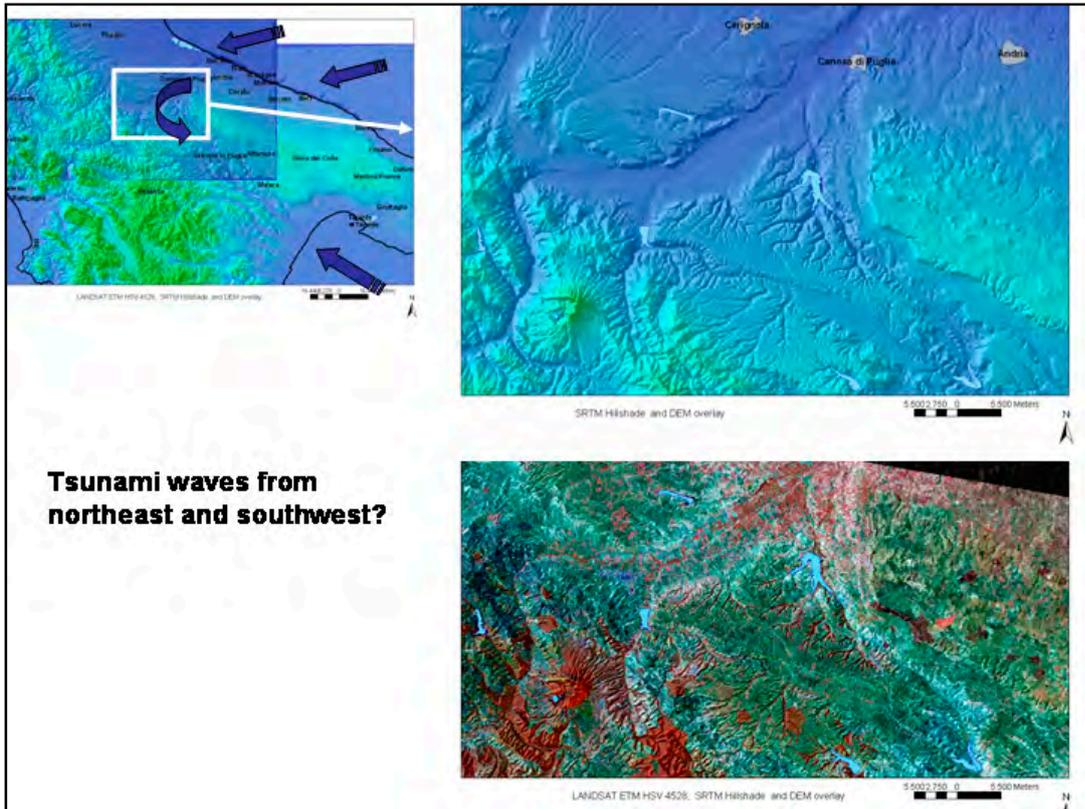


Fig.11a and b: Hillshade and slope degree maps, combined with minimum and maximum curvature maps based on SRTM data (Example 1 on Fig.10)
 The arc-shaped - open to the sea, fan-like morphology seems to trace earlier tsunami events.
 SRTM Data: Global Land Cover Facility, Institute for Advanced Computer Studies, University of Maryland, College Park, USA , <http://glcf.umiacs.umd.edu>

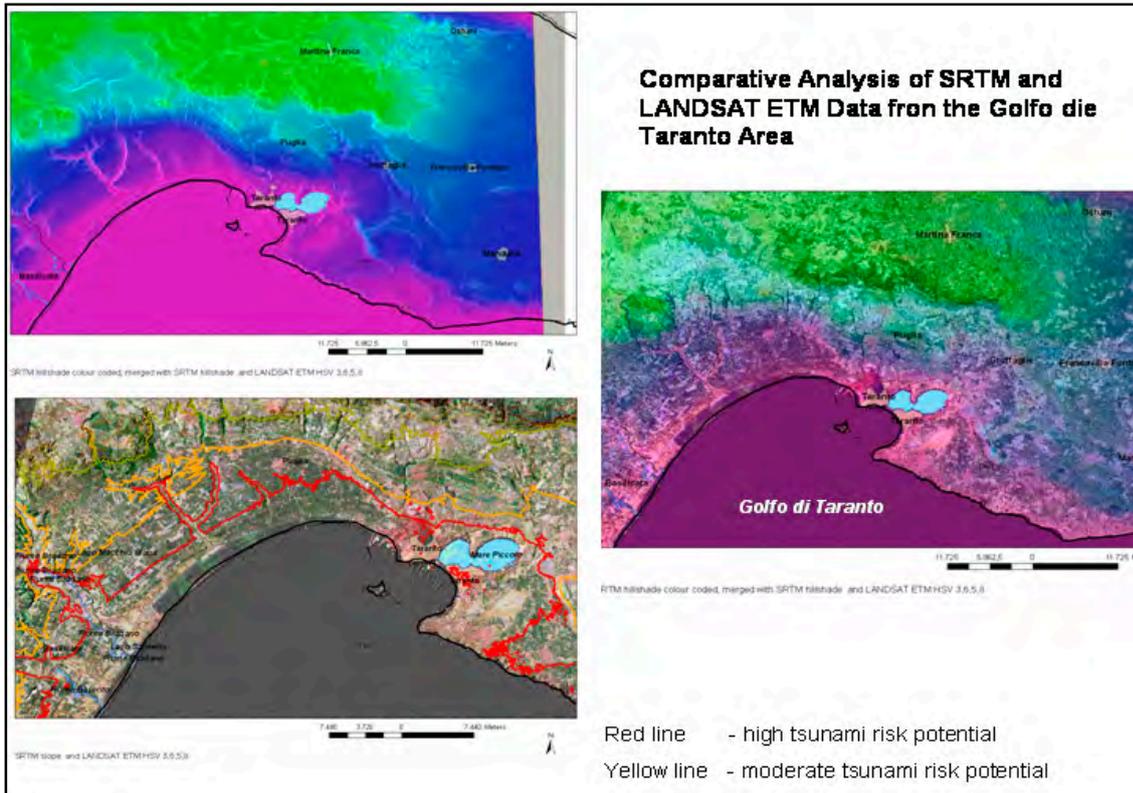


Fig. 12: Potential Tsunami risk sites in the Golfo di Taranto Bay (Example 2 on Fig.10)
 The red line is indicating areas below 20 m height above sea level.

The next example shows an area from the western part of the Golfo di Taranto bay. Based on SRTM derived image products as overlays of slope, minimum and maximum curvature maps traces of flood waves probably related to a tsunami event can be visualized.

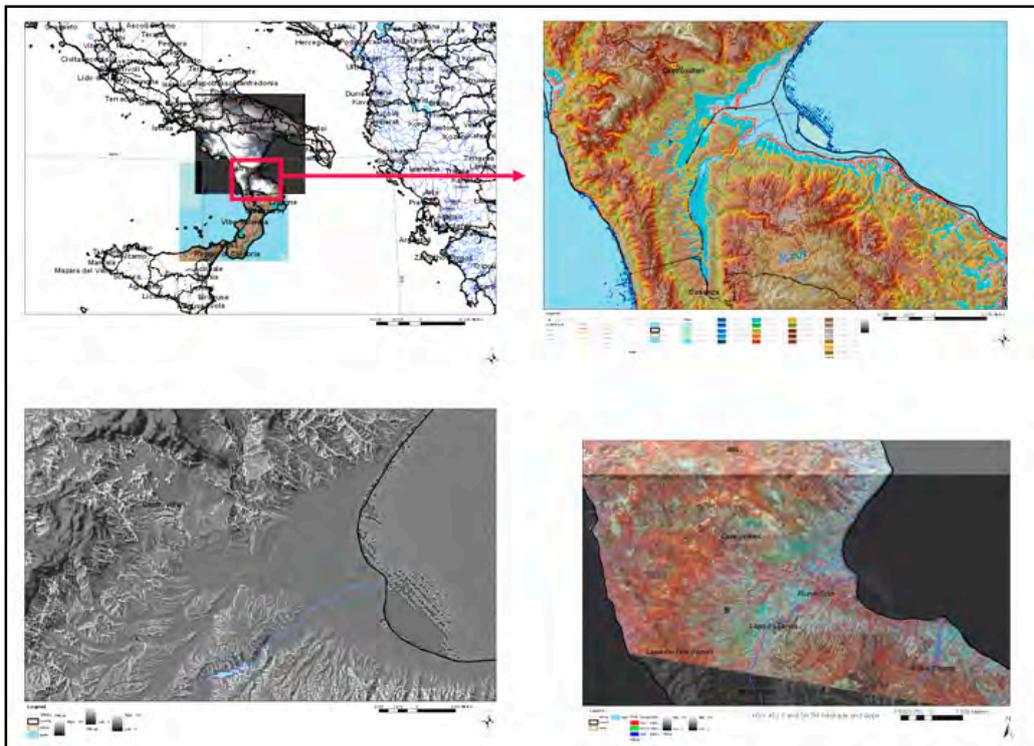


Fig. 13: LANDSAT ETM and SRTM imagery from the western part of the Golfo di Taranto bay

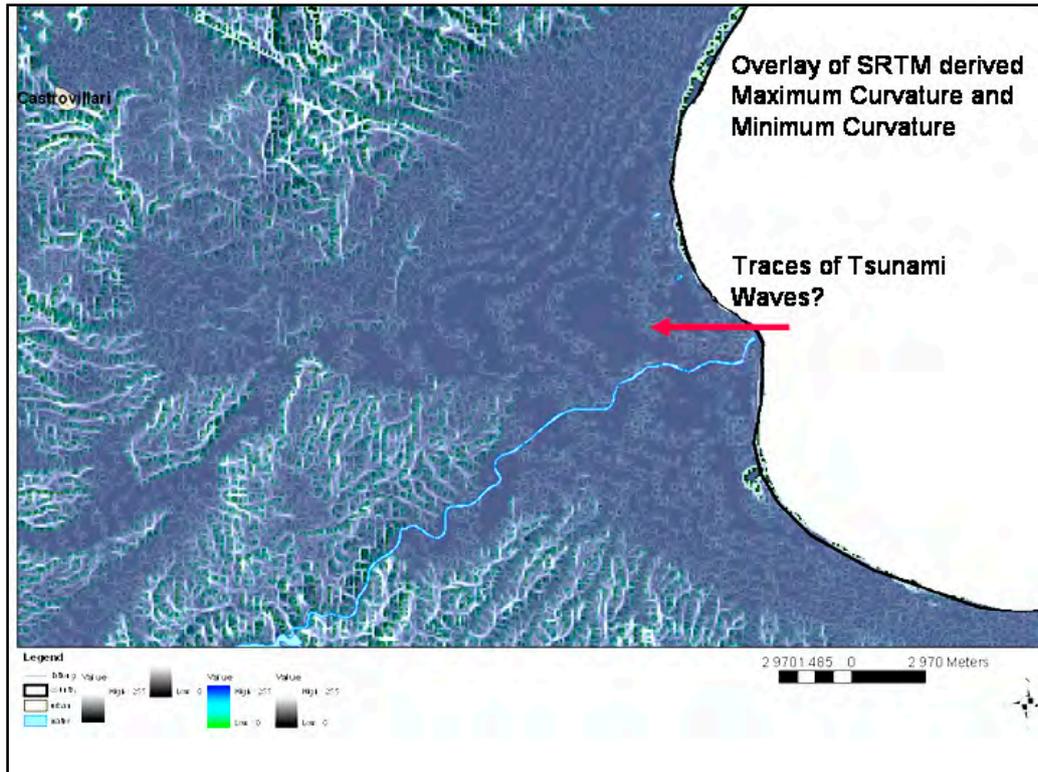


Fig. 14: Traces of flood waves probably related to a tsunami event

3.4. Evaluations of LANDSAT ETM and SRTM Data from West –Portugal

The next example presents an area of West-Portugal affected by the 1755 Lisbon earthquake that took place on November 1, 1755, at 9:30 in the morning. It was one of the most destructive and deadly earthquakes in history, killing well over 100,000 people. Several tens of minutes after the earthquake, an enormous tsunami engulfed the harbor and downtown, rushing up the Tagus river. It was followed by two more waves. In the areas unaffected by the tsunami, fire quickly broke out, and flames raged for five days. The earthquake was centered in the Atlantic Ocean, about 200 km WSW of Cape St. Vincent. Effects from the earthquake were far reaching. The worst damage occurred in the south-west of Portugal. The oscillation of suspended objects at great distances from the epicenter indicate an enormous area of perceptibility. The observation of seiches as far away as Finland, suggest a magnitude approaching 9.0 (<http://nisee.berkeley.edu/lisbon/>, <http://www.answers.com/topic/1755-lisbon-earthquake>). In Fig. 15 and 16 SRTM height and hillshade data and contour lines are used to demonstrate the potential tsunami risk.

The amplification of the LANDSAT ETM scene merged with infrastructural data as railroads allows the detection of risk sites.

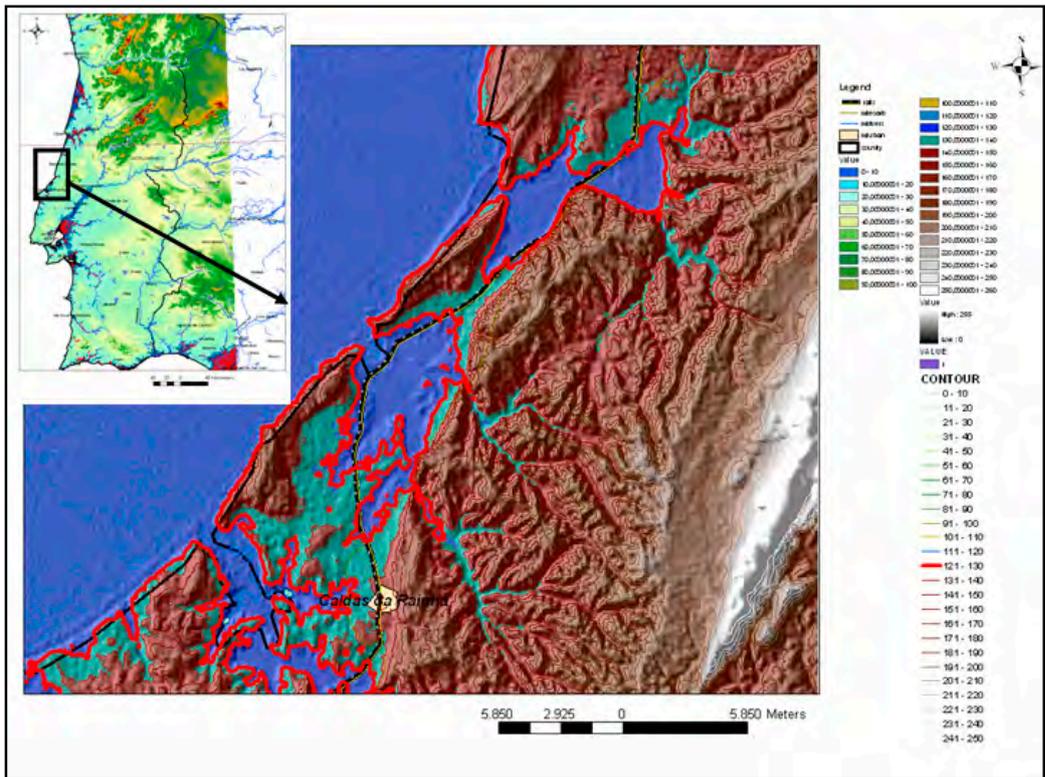


Fig. 15: SRTM based height and hillshade map of the west coast of Portugal

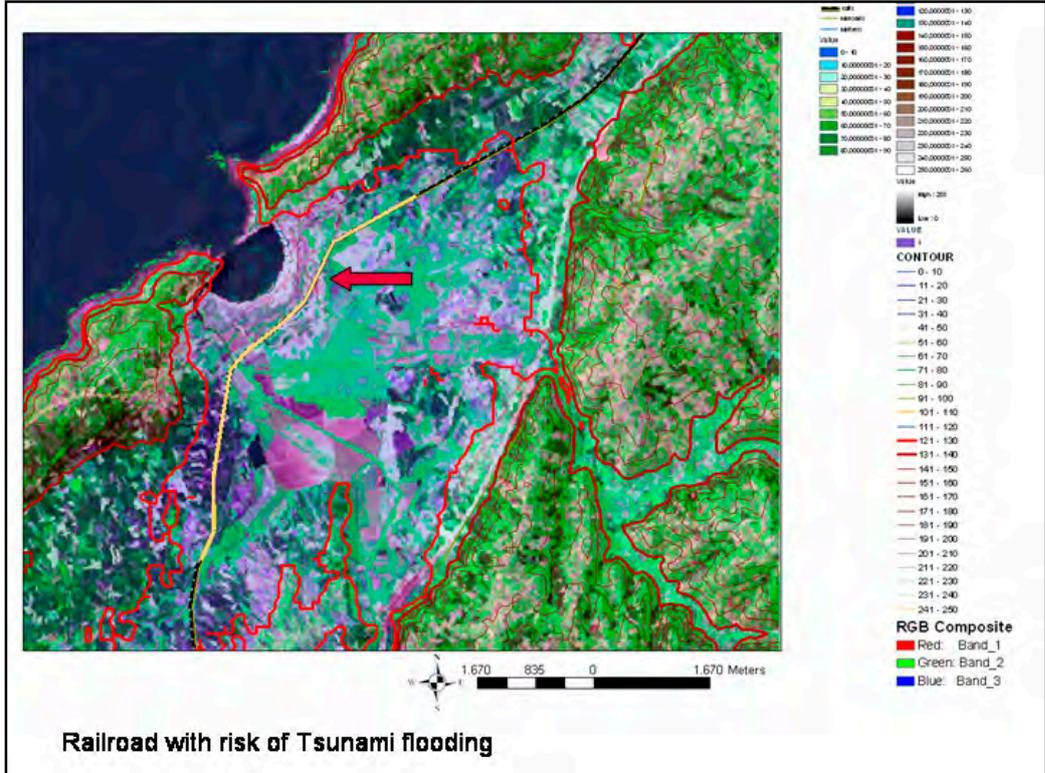


Fig. 16: LANDSAT ETM and SRTM contour lines overlay for showing risk sites of rail roads
Railroads situated below 20 m height are presented as yellow lines.

3.5. Evaluations of LANDSAT ETM and SRTM Imageries from Northeast Venezuela

As last example in this study is chosen an area in Northeast Venezuela. LANDSAT ETM data merged with SRTM derived maps visualize potential tsunami risk sites.

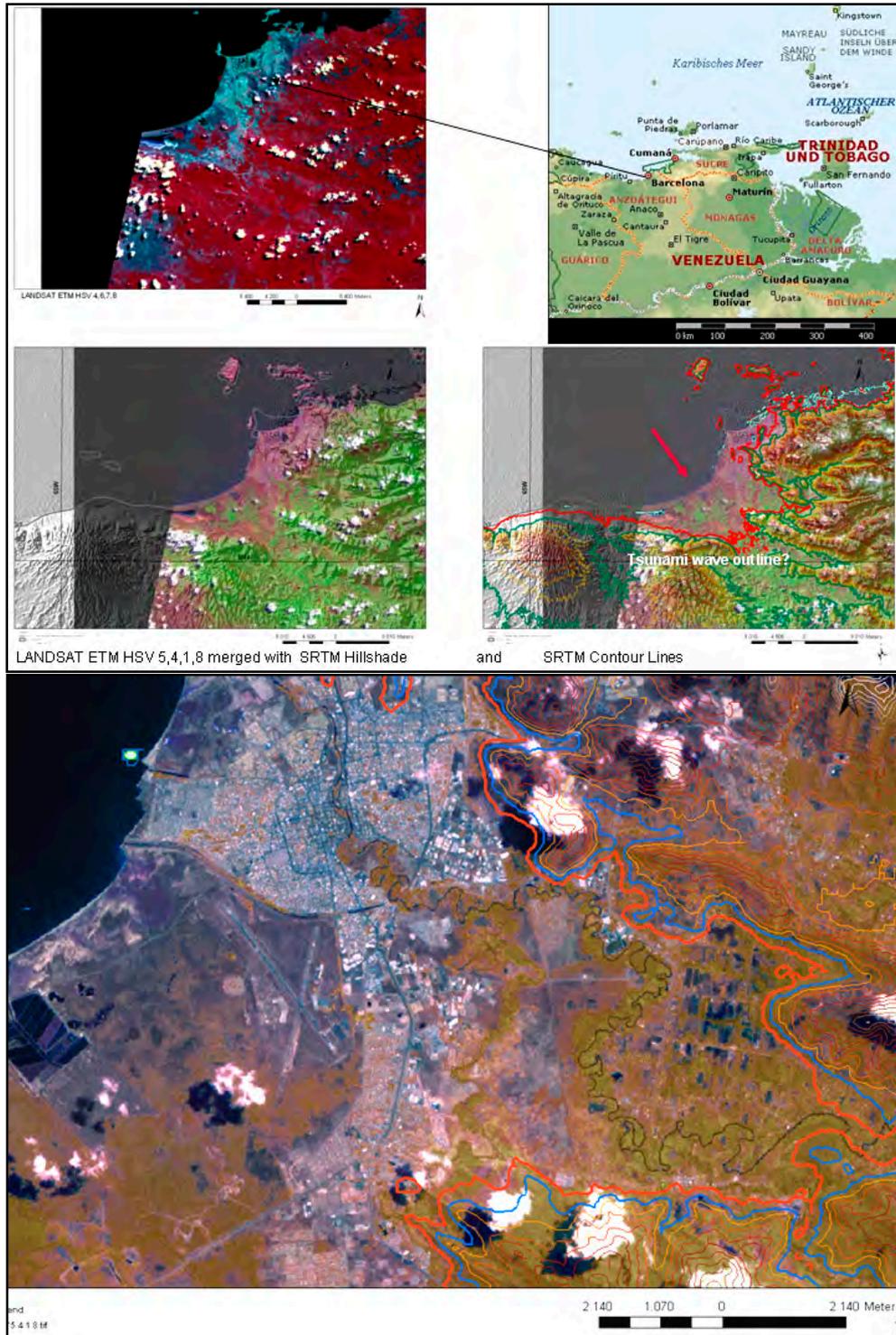


Fig. 17:a and b: Merging LANDSAT ETM and SRTM Data for showing potential tsunami risk sites. The city of Barcelona is situated in an area below 25 m above sea level. The potential tsunami risk must be taken into consideration for emergency planning.

4. Conclusions

The evaluation of digital processed and enhanced LANDSAT ETM data merged with SRTM derived map products as hillshade, slope gradient, minimum and maximum curvature in a GIS environment can contribute to a great deal to the detection of potential tsunami risk sites. The interpretation of remote sensing data from ancient and recent tsunami prone areas will help to a better recognition of those areas and, thus, being one basic layer for a tsunamis alert system.

Acknowledgements

For the present study LANDSAT ETM 7-imageries from Northern Turkey were provided in the scope of a research project supported by the German Science Foundation (DFG, Th 526/1-4), Bonn, the German Aerospace Center (DLR), Oberpfaffenhofen and EURIMAGE, Rome within the scope of the LANDSAT Scientific User Programme.

5. References

- ERDIK, M., (2000): Report on 1999 Kocaeli and Düzce (Turkey) Earthquakes.-
<http://www.koeri.boun.edu.tr/earthqk/earthqk.html>.
- THEILEN-WILLIGE, B., (2004): Fernerkundung und GIS bei der Erfassung der Erdbebengefährdung in der Nordwest-Türkei.- Abschlussbericht für die Deutsche Forschungsgemeinschaft, Förderkennzeichen: Th 526/1-4
- YALCINER A. C., KURAN, U., AKYARLI, A. & IMAMURA F., 1995, "An Investigation on the Generation and Propagation of Tsunamis in the Aegean sea by Mathematical Modeling", Chapter in the Book, "Tsunami: Progress in Prediction, Disaster Prevention and Warning", in the book series of Advances in Natural and Technological Hazards Research by Kluwer Academic Publishers, (1995), Ed. Yashuito Tsuchiya and Nobuo Shuto, pp 55-71.

Internet:

- <http://walrus.wr.usgs.gov/tsunami/sumatra05/methods.html>
<http://walrus.wr.usgs.gov/tsunami/sumatra05/measurements.html>
<http://yalciner.ce.metu.edu.tr/thams/index.html>
http://www.globalsecurity.org/military/world/india/images/tw_car_nicobar_20041229-012.jpg
<http://glcfapp.umiacs.umd.edu:8080/esdi/>
<http://inisiatif.rsgisforum.net>

Active tectonics of the Pamirs: Inferences from remote sensing analysis of stream profiles and geomorphology

CLAUDIA TWARZ, RICHARD GLOAGUEN & LOTHAR RATSCHBACHER

Zusammenfassung: Der Gebirgsgürtel des Pamirs ist ein bedeutendes Beispiel für extreme krustale Verkürzung durch die Kollision des nordwestlichen Endes der Indischen Kontinentalplatte mit Asien. Diese Region, mit großmaßstäblichen aktiven tektonischen Strukturen und nahezu 100 % aufgeschlossenen Gestein durch fehlende Vegetation, ist ein ideales natürliches Labor für die fernerkundliche Untersuchung von Deformation in kontinentalen Kollisionszonen. Das Ziel dieser Studie ist die Identifikation von aktiven Strukturen im Inneren des Pamirs durch die Analyse von Flussprofilen (Fraktal und Fluss Gradienten Analyse) und geomorphologischer Merkmale anhand von Landsat 7 und ASTER Bildern, sowie SRTM und ASTER DGMs. Aktive Deformation tritt in einem N-S streichenden Gürtel mit E-W gerichteter Extension im zentralen Pamir auf, gekennzeichnet durch Seismizität mit E-W orientierten T-Axen und Abschiebungen in der Karakul Region. Die NW-streichende, dextrale strike-slip Karasu Störungszone im südöstlichen Pamir zeigt bedeutende neotektonische Merkmale, wie z.B. rechts-lateral versetzte Flussläufe und Terrassen und endet offensichtlich in der Karakorum Störung. Im nordöstlichen Pamir (Kongur Shan Extensions System) zeigen Berge von bis zu 7500 m Höhe lokale topographische Unterschiede von über 4 km zwischen Berg und Tal. Im Westen und Südwesten wird die Bergkette von moderat einfallenden, aktiven Abschiebungen begrenzt. Die Analyse von Flussprofilen offenbart unnormal steile Flussabschnitte direkt über diesen Störungen. Flussgradienten in der Karakul Region dagegen, zeigen keine signifikanten Änderungen durch Abschiebungstektonik. Die Ausbildung und Orientierung der Hauptdrainagesysteme ist zurückzuführen auf die Hebungsgeschichte der aktiven Extensionsgebiete und der Plateauränder des Pamirs. Es wird angenommen, dass die Verteilung und Kinematik aktiver Deformation im Pamir kontrolliert wird durch: 1) syn-orogene Extension und 2) Transfer von Deformation von der dextralen Karakorum Störung und der west-gerichteten Extrusion Tibets.

1 Introduction

The Pamir mountains, at the western end of the Himalayan-Tibetan orogen (Fig. 1), are a direct consequence of the ongoing India-Asia collision. With large relief and peaks up to 7500 m, thick crust, active tectonics, and a complicated Phanerozoic history, this region is a unique segment of the earth crust. The Main Pamir Thrust in the north of the Pamir salient is a crustal-scale fault, interpreted to have accommodated northward translation of the Pamir about 300 km (BURTMAN & MOLNAR, 1993; BRUNEL et al., 1994; STRECKER et al., 1995). The large magnitude of displacement has resulted in the development of right-slip faults along the eastern margin (e.g., Karakorum Fault, MOLNAR & TAPPONNIER, 1978) and left-slip faults along the western margin (e.g., Darvaz Fault, BURTMAN & MOLNAR, 1993) of the salient. The Main Boundary and Main Frontal Thrusts in the south of the Pamir accommodate northward underthrusting of India beneath Asia and are like the Main Pamir

TU Bergakademie Freiberg, Institut für Geologie, B. von Cotta 2, D-09599 Freiberg
¹e-mail: claudia.twarz@web.de

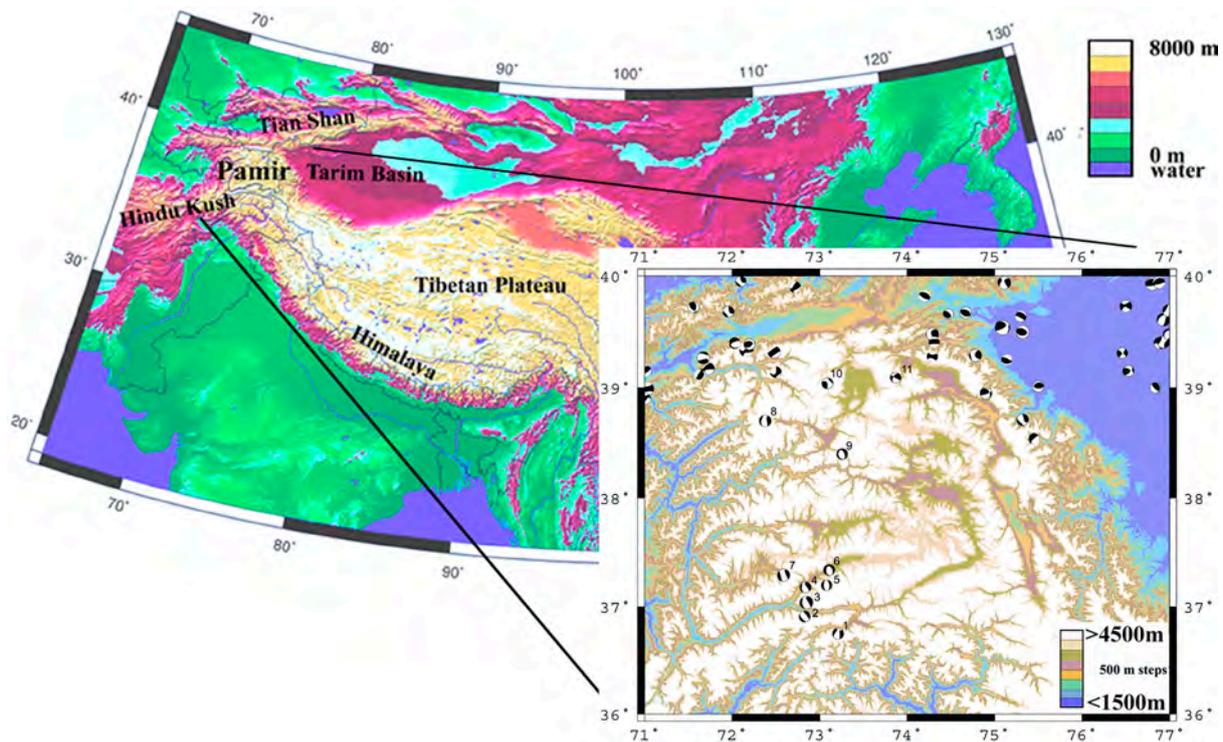


Fig. 1: Topographic map of central Asia, based on GTOPO 30 digital elevation data, showing the Pamir and its surrounding. Focal mechanisms of shallow earthquakes within the Pamir (1-11) from the Harvard CMT catalog show E-W oriented extension.

Thrust crustal scale faults (ROBINSON et al., 2004). The continental collision has resulted in a substantially thickened crust (60-70 km) in the Pamirs and surrounding regions (e.g., MISHRA, 1982; BURTMAN & MOLNAR, 1993).

The purpose of this study is to understand details regarding the distribution and kinematics of active deformation from remote sensing analysis of geomorphic features, stream profiles, drainage patterns, and earthquake location and kinematics. The Pamir represents an ideal natural laboratory for the remote sensing study, because of its large-scale active tectonic structures and the lack of vegetation leading to near 100 % exposure of bedrock lithologies. Compared to other collision zones, like the Alps or the Tibetan Plateau, the Pamir mountains are not known in nearly the same detail. Until now, previous investigations mainly focused on the margins of the orogen and drainages and river profiles have not been analysed yet. The Pamir is an area where the analysis of the river network geometry and drainage basin morphology may be particularly useful as a guide to tectonics and surface uplift, because much of the young surface uplift within the Pamirs, with the exception of the Karakul and Kongur Shan extensional systems, appears to have occurred without the development of significant shortening structures at the surface (e.g., FAN et al., 1994; STRECKER et al., 1995). The Pamir mountains are therefore an ideal region to extract information about the application of stream profile and drainage pattern analysis and the establishment of today's drainage network with respects to surface deformation.

2 Data Base and Methods

Four different *data sets* are used in this study: topographic maps, Landsat 7 and ASTER images, and SRTM DEMs. The 1:100.000 Soviet military topographic maps were available in

paper format and had to be digitised and geocoded. Mosaics were built, each covering one of the Landsat 7 scenes. The six Landsat 7 scenes were geocoded by means of the topographic maps and SRTM DEMs. To analyse the Landsat 7 images, a RGB combination of the spectral channels 7, 4 and 1 was chosen, owing to the geological application of the data (channel 7, mid-infrared) and by computer analysis of the correlation between the spectral bands. To increase the pixel resolution of this RGB image from 30 m to 15 m, the image was fused with channel 8 as intensity layer. From the Landsat 7 images and 90 m SRTM DEMs mosaics of the whole Pamir were built. To identify stream networks and their watersheds from digital elevation data the Geomatica 9.1.2 PCI Hydrologic Analysis modules (JENSON & DOMINGUE, 1988) were applied. Three ASTER scenes were used in this study. The scenes were first georeferenced by means of the topographic maps and the SRTM DEMs, then DEMs were generated after Toutin (1995).

For the *stream profile analysis*, random noise, superimposed on the pixel elevation values of the DEMs, were removed by the process of low pass filtering. In this study the median filtering was used to smooth the DEMs. With this technique the high-frequency noise is filtered, but edges are maintained in the image. The simplest method to analyse a stream is to calculate slopes along the profile, by regression of local elevation against upstream distance. Channel slopes were calculated from the smoothed elevation data for all major streams within the Pamir. Where breaks in the elevation distance plots were observed, calculations were performed on each segment independently.

Another way to quantify perturbations in longitudinal profiles rely on defining changes in the gradient index along the river courses. There are predictable relationships between discharge, catchment area and stream length. HACK (1973) defined a gradient index (k) which is the product of slope of a reach times the distance from the headwater divide, and which thus serves as a general indicator of available stream power,

$$k = (H_i - H_j) / (\ln L_j - \ln L_i) \quad (1)$$

with H equals altitude, L equals horizontal length from the divide and i and j refer to two points along the river (Fig. 2). The gradient index can be used to characterize either an entire stream or any reach of it. Because river profiles are not necessarily logarithmic in form, one assumption that underpins the definition and interpretation of stream gradient indices is commonly violated. The use of the indices in tectonic geomorphology, however, commonly involves comparisons among different subsets of drainages or identification of anomalies along a single drainage. By using contrasts and anomalies, rather than absolute values, studies of k values provide useful landscape data in at least three modes: as a reconnaissance tool, as a means to compare landscape responses in regions with different rock-uplift regimes and as a means to identify anomalous zones of potentially heightened tectonic activity within a catchment (BURBANK & ANDERSON, 2001).

The longitudinal profiles were generated from DEMs and, in order to test the reliability of the digital data, from topographic maps. The results of these approaches were compared (Fig. 3). Digitizing elevations from topographic maps is time consuming and its accuracy is limited by the counter interval (40 m for Soviet military 1:100.000 topographic maps). The second approach, extraction of channel profiles from DEMs, is highly efficient, but accuracy is limited by the resolution and quality of the DEM. In this study, SRTM 90 m pixel DEMs with a vertical accuracy of 16 m were used. The ASTER DEMs have a better pixel resolution and accu-

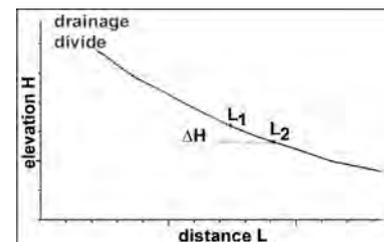


Fig. 2: Stream profile with variables for the calculation of the gradient index k .

racy, but are too small in area to analyse streams along their total length; only a few streams could be analysed. The production of DEMs introduces elevation inaccuracies on the pixel scale and the resulting longitudinal profiles are not as smooth as those produced from the first technique. Therefore, spikes (data without elevation values, single elevation peaks) were removed manually along the channel profile and the data were smoothed with low-pass filters to reduce the high-frequency noise (see above). Comparison of the two methods for several channels indicates that for the goals of this study, the differences between the techniques are not significant; in all profile lines the changes in gradient are clearly visible (Fig. 3). Therefore, the DEM-generated longitudinal profiles of all channels were used, because it is the fastest and more accurate method, due to the higher vertical resolution of DEMs (16 m instead of 40 m for the topographic maps).

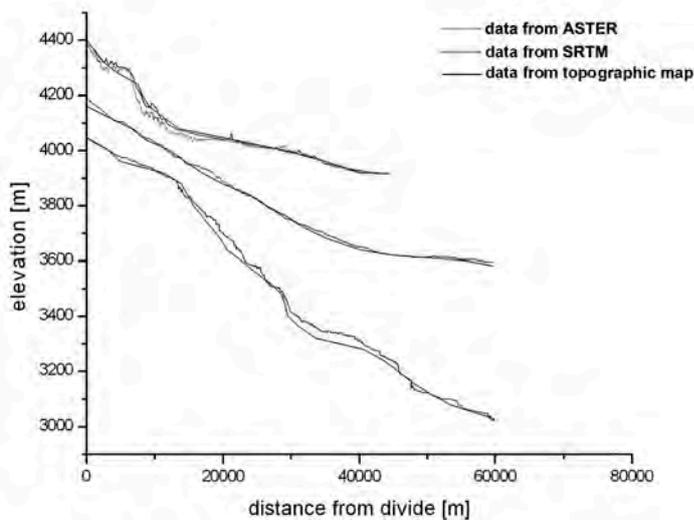


Fig. 3: Comparison of longitudinal profiles extracted from digital elevation data (red and blue) and topographic maps (black). The general agreement between the profiles indicates that the DEM adequately captures the general form of the channel.

In this study, the fractal analysis was applied to determine a quantitative parameter (the fractal dimension D) for the sinuosity of single-thread meandering channels. Where a braided river pattern occurred, only the main channel was digitized. All rivers were split into smaller parts where the drainage pattern changed. These parts were analysed by the ruler dimension method. This method is widely used for 2D investigation of linear structures due to its simplicity and capability of being easily automated (TURCOTTE, 1997). In practice, to obtain D_R -values (R = ruler dimension) the software Benoit was used, which counts the number of steps $N(d)$ taken by walking a divider (ruler) of length d on the river, and plot the logarithm of $N(d)$ versus the logarithm of d (Fig. 4). The linear trend of this plot over about one and a half order of magnitudes and the low standard deviations (Fig. 4) are evidence that the sinuosity of a river is a fractal and statistically scale invariant over

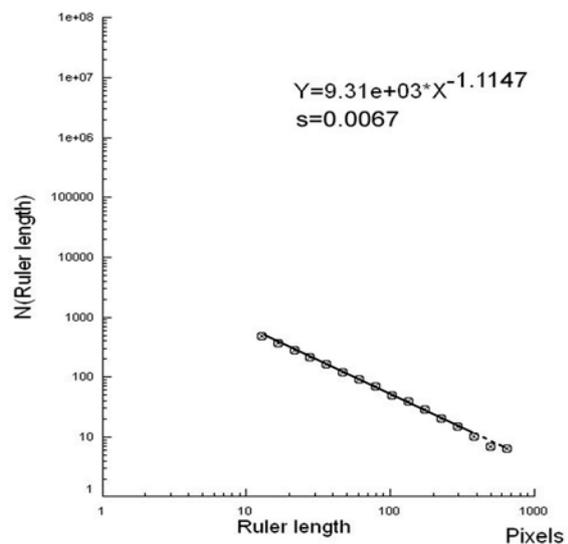


Fig. 4: Fractal analysis of a stream segment, using the ruler dimension technique. Straight line trend and low standard deviation (s) indicate a fractal behaviour of the sinuosity.

this range of scales (TURCOTTE, 1997). The negative slope equals $-D_r$. Many authors reported that the fractal dimension of a straight river reach equals 1 (values of about 1.02 to 1.06) and that meandering channels have a value of about 1.15 (e.g.; NIKORA, 1991, TURCOTTE, 1997).

3 Results

Figure 5 schematically illustrates the spatial distribution of active deformation, inferred from the analysis of geomorphology, the distribution of stream gradient and sinuosity, the drainage pattern and seismic activity. The analysis of neotectonic deformation within the Pamir indicates that active deformation is partitioned into three principal zones with distinct kinematics and displacement rates.

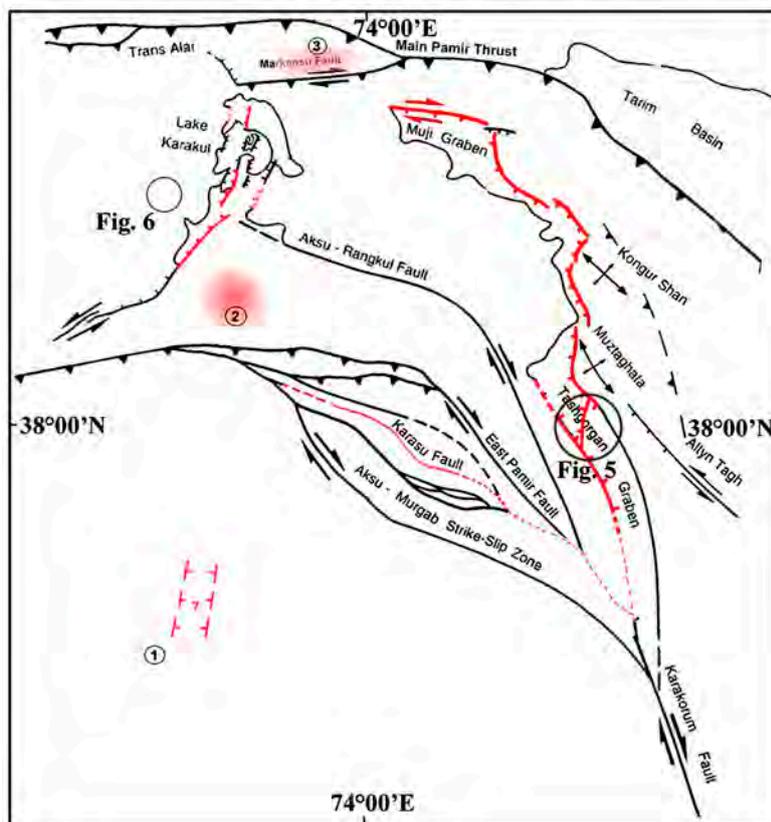


Fig. 5: Spatial distribution of neotectonic deformation within the Pamirs. Data are from literature (black faults) and collected in this study (red and light-red faults). Faults represented in black do not show indications of re-cent activity. Red faults show strong evidence and light-red faults little evidence of activity. Light-red areas 1-3 show no surface deformation, but earthquake locations (areas 1-3) and drainage patterns (areas 2-3) indicate major activity at depth. Modified after STRECKER et al. (1995).

Active normal faulting in the *Kongur Shan extensional system* led to the formation of huge mountains such as the Kongur Shan and Muztaghata. Young fault scarps, triangular facets, a sharp topographic contrast and a parallel drainage pattern serve as evidence for the large, almost pure dip-slip movement along the NNW-trending Kongur Shan and Tashkorgan Faults (Fig. 6a). Stream profiles have clear knickpoints where they cross the active fault traces (Fig. 6b). The Tahman Fault links the Kongur Shan and Tashkorgan Faults; it takes up displacement from the Kongur Shan Fault, which uplift rate decreases south of the Muztaghata (Fig. 6a). This fault is characterized by young fault scarps and knickpoints in stream profiles above the fault trace (Fig. 6a,b). However, the amount of throw is low: compared to the elevation difference that has been formed due to normal faulting along the Kongur and Tashkorgan Faults with local relief between 3 and 4 km, the topographic difference of 300 - 600 m at the Tahman Fault is small. Displacement along the Muji Fault changes from dextral-oblique slip in the west to dominantly normal slip in the central and eastern parts, inferred from different fault kinematics, drainage patterns and topographic relief on both sides of the

river. The low concavities, low fractal dimensions, and high stream gradients of rivers draining into the Tarim Basin are interpreted to reflect adjustment to surface uplift. However, while active deformation on the western flank of the Kongur Shan mountains is directly influenced by active faults, the pattern of differential rock uplift on the eastern flank appears to be of more distributed nature; no active faults could be found. With the beginning of uplift in the Kongur Shan extensional system between 2 Ma (ARNAUD et al., 1993) and 7-8 Ma (ROBINSON et al., 2004) a new drainage network developed. Most rivers that flew across the Kongur Shan mountains in the Tarim Basin were deflected out of their courses, leaving behind wind gaps (abandoned river valleys at high elevations). A number of shallow earthquakes with magnitudes between 4 and 5.3 underline the large activity of the Kongur Shan extensional system.

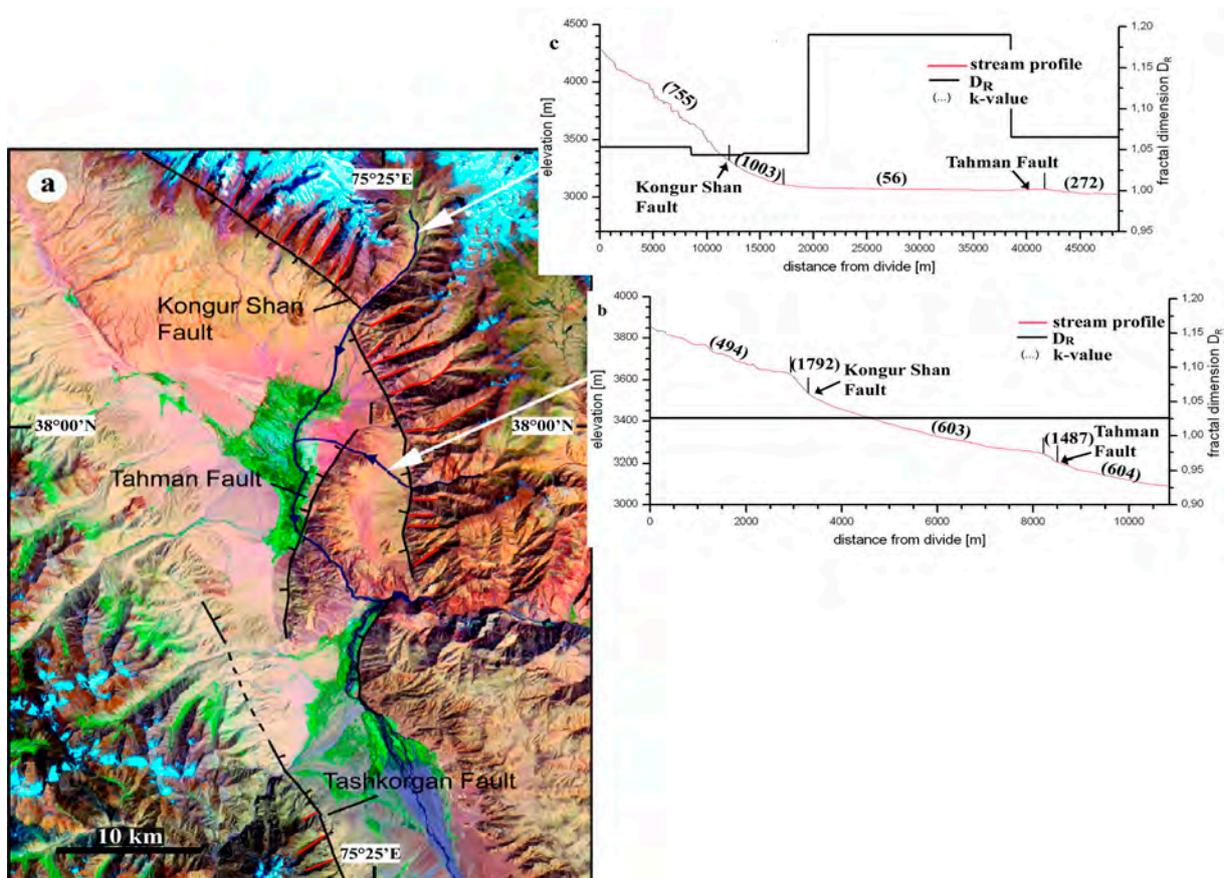


Fig. 6: Transition zone between the W-SW dipping Kongur Shan normal fault and the NW dipping Tashkorgan normal fault (a). Parallel drainages (red lines), triangular facets and fault scarps (a), as well as the extreme concavity of the profile (c) and high fractal dimension (c) and knickpoints (c) across fault traces indicate fault activity.

Active deformation in the *Karakul extensional basin* differs from that in the Kongur Shan extensional system. Stream profiles and drainage patterns on both sides of the depression show no significant changes caused by normal faulting. Most streams have concave profiles without, or with only small increased gradients above the fault traces and the drainage network is dendritic, indicating a much smaller rate of uplift than along the Kongur Shan extensional system. The absence of triangular facets, a smaller topographic relief, and smaller earthquake magnitudes (between 3.5 and 4.5) support this interpretation. Landsat 7 and ASTER images show, however, NNE-striking active normal faults along the eastern side of the Karakul extensional system and along the western side of the Karakul horst structure south of the lake Karakul; sinistral dip-slip faults occur north of the lake with young fault scarps and

displaced streams on the western side of the Karakul horst structure. East of the lake Karakul, an area with increased uplift is suggested by a parallel drainage pattern. On the western side, there is only sparse evidence of faulting and the relief is shallower. However, a considerable amount of uplift must have been occurred on both sides to form the Karakul

depression and to reverse paleo-river courses that originally drained across the rift shoulders and left behind wind gaps (Fig. 7).

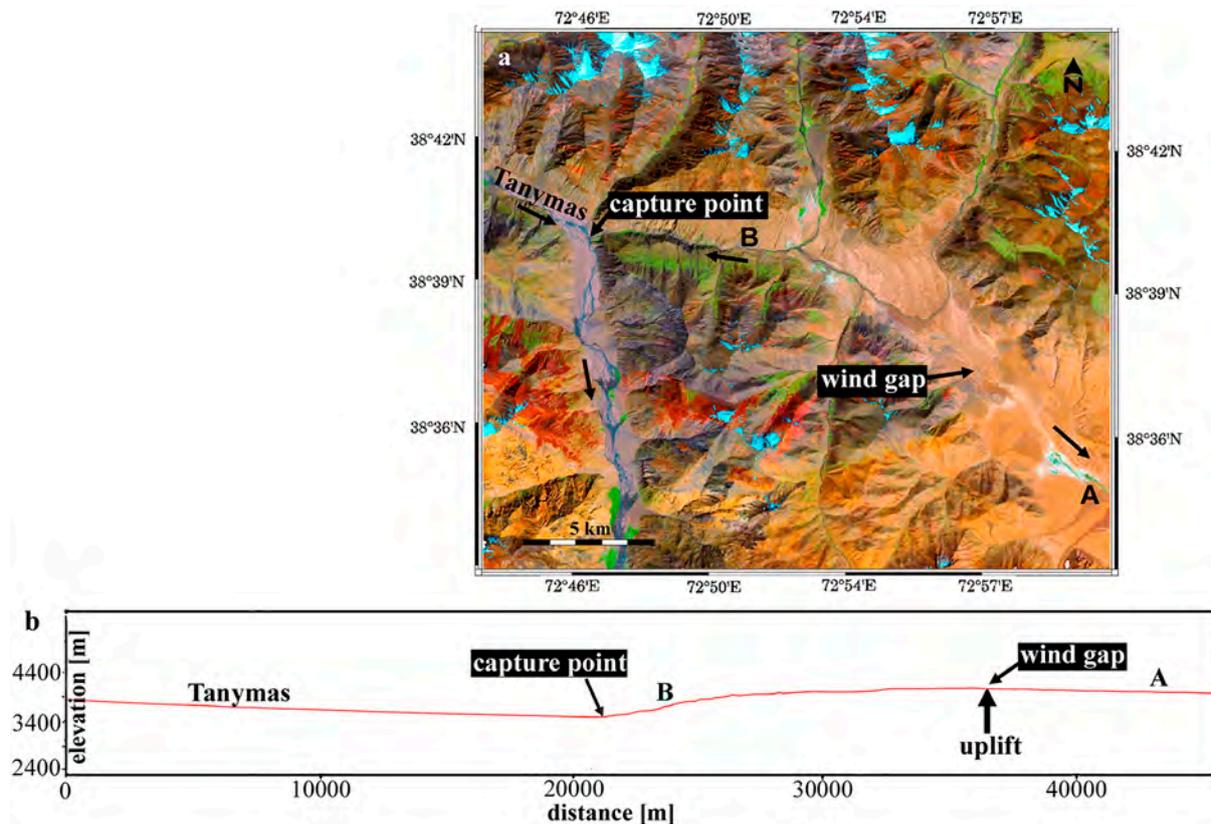


Fig. 7: Landsat 7 image (a) and longitudinal profile (b) show a wind gap between two streams (A, B) on the western side of the Karakul extensional basin.

Within the central eastern Pamirs, seismic activity and neotectonic surface structures are rare. There, minor deformation is associated with dextral strike-slip faults in the **Karasu Fault zone**, inferred from displaced fluvial terraces and streams. Deformation occur along a broad fault zone with distributed slip on several small-scale faults. A small dip-slip component is assumed, because some of the rivers that cross the Karasu Fault have increased fractal dimensions. This interpretation is supported by the measurement of vertical offsets of fluvial terraces along the Karasu river by STRECKER et al. (1995). With the exception of some larger rivers that cross the fault zone obliquely and probably define paleo-rivers, most rivers follow the fault zone in a NW-SE direction. In the east the orientation changes to NNW-SSE and the linear valleys end in the southern Tashkorgan valley, indicating that the Karasu Fault roots into the Tashkorgan Fault, which is interpreted to represent the northern termination of the Karakorum Fault. The adjustment of river courses to the structural grain lead to the suggestion that this fault zone is active since a long time. No absolute age data concerning the onset of faulting exist. The rate of displacement along individual faults is assumed to be low, inferred from little evidence of active faulting on Landsat 7 and ASTER images. STRECKER et

al. (1995) obtained rates between 0.3 and 0.8 mm/yr from fluvial terraces and fossil solifluction lobes, that support this assumption.

Besides these three principal zones of neotectonic activity which could be identified by all applied approaches, there are some regions where Quaternary deformation is only assumed from seismic activity and the paleo- and neo-drainage pattern (Fig. 5). One area with increased seismic activity occurs between 36°70'N - 37°30'N and 72°40'E - 73°50'E. Focal mechanisms associated to these earthquakes show nearly pure normal faulting, with E-W oriented T axes, which is consistent with the stress orientation in the Karakul area further north. Because there are no mapped surface structures in that region inferred from the remote sensing analysis, the deformation might be of a distributed nature. Additionally, there is no disturbance of the drainage pattern, what could indicate that the initiation of the extension is very young. Along the northern margin of the Pamir, high seismicity with dominantly N-NW oriented P-axes, parallel drainages, and a wind gap in the northwestern Pamirs, which serves as evidence for the reorganisation of drainage lines across the margin, indicate ongoing contraction along the Main Pamir Thrust. Quaternary faulting observed by numerous workers in the Trans-Alai (e.g.; BURTMAN & MOLNAR, 1993; STRECKER et al., 1995) support this interpretation.

The results of the applied analyses reveal a complex pattern of active deformation within the Pamirs. Kinematic models to explain the neotectonic deformation in the Pamirs have to take into account the north to northwest directed thrusting along the Main Pamir Thrust, dextral strike-slip faulting within the eastern Pamir, dextral oblique normal faulting along the westernmost part of the Muji Fault and E-W extension in the northeast and central Pamir.

The northwestern, northern, and northeastern margins of the Pamir are characterized by uplift due to radial thrusting along the Main Pamir Thrust. In the case of the Kongur Shan extensional system, the crustal thickening is likely responsible for the development of normal faults. The position and striking of these faults (WNW-ESE in the north and NW-SE in the east), is perpendicular to thrusting along the frontal thrusts. Thus, the coeval movement of radial thrusting and rear normal faulting led to an oblique-upward extrusion of a crustal slice. Near the eastern margin of the orogen, deformation is dominated by dextral strike-slip faulting caused by transfer of deformation from the dextral Karakorum Fault and maybe from lateral extrusion of Tibet. Within the central Pamir a prominent belt of extensional deformation, with the Karakul extensional system at its northern end, occurs. The deformation style observed in this area is likely the result of synorogenic extension of orogenically thickened crust to accommodate further crustal thickening along the Main Pamir Thrust.

Large-scale orogenic regions like the Pamir are impossible to investigate only by field work. Analysis of remote sensing images is essential. In this study, the analysis of stream profiles (gradient index, fractal dimension) and drainage patterns, in addition with the geomorphological analysis, proved to be powerful tools to identify active tectonic regions.

4 References

- ARNAUD, N.O.; BRUNEL, M.; CANTAGREL, J.M. & TAPPONNIER, P., 1993: High cooling and denudation rates at Kongur Shan, Eastern Pamir (Xinjiang, China) revealed by $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Alkali Feldspar thermochronology. - *Tectonics*, vol. 12, no. 6, pp. 1335-1346.
- BRUNEL, M.; ARNAUD, N.; TAPPONNIER, P.; PAN, Y. & WANG, Y., 1994: Kongur Shan normal fault: Type example of mountain building assisted by extension (Karakoram fault, Eastern Pamir). - *Geology*, vol. 22, pp. 707-710.

- BURBANK, C.W. & ANDERSON, R.S., 2001: Tectonic Geomorphology. - Blachwell Science, Malden, pp. 274.
- 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 282, pp. 76.
- FAN, G.; NI, J.F. & WALLACE, T.C., 1994: Active tectonics of the Pamirs and Karakoram. - Journal of Geophysical Research, vol. 99, pp. 7131-7160.
- HACK, J.T., 1973: Stream-profile analysis and stream-gradient indices. - United States Geological Survey Journal of Research; vol. 1, pp. 421-429.
- JENSON, S.K. & DOMINGUE, J.O., 1988: Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis. - Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 54, no. 11, pp. 1593-1600.
- MISHRA, D.C., 1982: Crustal structure and dynamics under Himalayas and Pamir ranges. - Earth and Planetary Sciences Letters, vol. 57, pp. 415-420.
- MOLNAR, P. & TAPPONNIER, P., 1978: Active tectonics of Tibet. - Journal of Geophysical Research, vol. 83, pp. 5361-5375.
- NIKORA, V.I., 1991: Fractal structures of river plan forms. - Water Resources Research, vol. 27, no. 6, pp. 1327-1333.
- ROBINSON, A.C.; YIN, A.; MANNING, C.E.; HARRISON, T.M.; ZHANG, S.-H. & WANG, X.-F., 2004: Tectonic evolution of the northeastern Pamir: Constrains from the northern portion of the Cenozoic Kongur Shan extensional system, western China. - GSA Bulletin, vol. 116, No. 7/8, pp. 953-973.
- STRECKER, M.R.; FRISCH, W.; HAMBURGER, M.W.; RATSCHBACHER, L.; SEMILETKIN, S.; ZAMORUYEV, A. & STURCHIO, N., 1995: Quaternary deformation in the Eastern Pamirs, Tadjikistan and Kyrgyzstan. - Tectonics, vol. 14, No. 5, pp. 1061-1079.
- TOUTIN, TH., 1995: Generating DEM from Stereo Images with a Photogrammetric Approach: Examples with VIR and SAR Data. - EARSeL Journal Advances in Remote Sensing, vol. 4, no. 2, pp. 111-117.
- TURCOTTE, D.L., 1997: Fractals and chaos in geology and geophysics. - 2nd edition, Cambridge university press, pp. 398.
- [http:// edcdaac.usgs.gov:80/gtopo30/gtopo30.asp](http://edcdaac.usgs.gov:80/gtopo30/gtopo30.asp)
- <http://www.seismology.edu/CMTsearch.html>

Deformation distribution and type in the Main Ethiopian Rift (MER); a remote sensing study

TOBIAS KURZ¹, RICHARD GLOAGUEN¹, CYNTHIA EBINGER²,
MARTIN CASEY³, BEKELE ABEBE⁴

Zusammenfassung: Das Main Ethiopia Rift ist magmatisch segmentiert und seismisch aktiv. Unsere Untersuchungen zeigen, dass die Segmente nicht allein magmatisch sondern magmatisch-tektonisch beeinflusst sind. Unter Verwendung von spektral hoch auflösenden Landsat Daten (PCA, Klassifikationen) und räumlich sehr hoch auflösenden digitalisierten Luftbildern wird die Deformation entlang dem Rift charakterisiert und quantifiziert. Um Störungen charakterisieren und quantifizieren zu können, wurden entlang den Segmenten mehrere Digital Elevation Models (DEM) mit metrischer Auflösung extrahiert. Im Arbeitsgebiet unterscheiden wir vier autonome tekto-magmatische Segmente (Gedemsa, Bosetti, Kone, Fantale) mit regelmäßigen Deformationsmustern. Die Deformation der Segmente wie sie im MER zu beobachten ist, zeigt große Ähnlichkeit mit längs-achsialer Segmentation an Mittel-Ozeanischen Rücken.

1. Introduction

The Main Ethiopian Rift (MER) belongs to the northernmost branch of the East Africa Rift System (EARS). In the north the MER is linked to the Red Sea and Gulf of Aden rifts and thus to the global oceanic rift system at the Afar triple junction (R-R-R). Gravimetric data (EBINGER et al., 1989) as well as tomographic investigations (e.g. KERANEN et al., 2004) prove that the crust beneath the MER and the Afar Depression is modified and thinned. The northern MER is one of the few areas worldwide, where the crust is in a transitional stage from continental to oceanic.

In the intrarift of the MER, a N10°-20°E oriented, discontinuous and right stepping en echelon fault system (misleadingly described as the Wonji Fault Belt (WFB) by some authors) has developed since the Quaternary and is oblique to the NE rift trend (BOCCALETTI et al., 1992). Furthermore, the MER is magmatically segmented and seismically active. EBINGER & CASEY (2001) describe magmatic segments, arranged en echelon, about 50 km long and up to 20 km wide, oriented about N10°-20°E, and therefore also oblique to the main direction of Mid-Miocene border faults (N35°E) (Fig. 1). They are represented by the youngest volcanic rocks and include recent basalts (Fig. 1). Recent basalts (post 0.6 Ma) are essentially fissural and have geochemical signatures of MORB (SETH et al., 2005). The significance of the tectonic geometries and the magmatic localization are still largely debated (e.g. ACOCELLA et al., 2003; BOCCALETTI et al., 1992; EBINGER & CASEY, 2001; KERANEN et al., 2004). However,

¹ Freiberg University of Mining and Technology, Institute for Geology, Remote Sensing Group, B. von-Cotta-Strasse 2, 09599 Freiberg, Germany, fax: +49(0)3731 393599
e-mail: kurz.tobiaskurz@web.de, gloaguen@geo.tu-freiberg.de

² Royal Holloway, University of London, Department of Geology, Egham, Surrey TW20 0EX, London, UK, e-mail: c.ebinger@gl.rhul.ac.uk

³ Leeds University, School of Earth Sciences, Structural Geology, LS2 9JT, Leeds, UK
e-mail: M.Casey@earth.leeds.ac.uk

⁴ Addis Ababa University, Faculty of Science, Department of Geology and Geophysics, P. O. Box 176, Addis Ababa, Ethiopia

the magmatic segmentation in the MER is clearly associated to a regular brittle deformation geometry which specifications are the aim of this work.

Extension direction and associated stress field during evolution of the MER are discussed controversially (e.g. EBINGER et al., 1993, BOCCALETTI et al., 1999, ACOCELLA & KORME, 2002). The statistical analysis of faults both on images and from field data indicate that the extension direction is about N96°E ($\pm 5^\circ$) during the Quaternary. Our data are in agreement with geodetic surveys (BILHAM et al., 1999) and global plate motion models (e.g. CHU & GORDON, 1999). Geodetic data show a recent N108°E ($\pm 10^\circ$) at 4,5 (± 1) mm/a directed extension direction and a maximal subsidence rate of 0,7 mm/a in the MER (BILHAM et al., 1999), which has mainly localised to <20 Km wide zones of aligned volcanoes and associated flows (BILHAM et al., 1999; EBINGER & CASEY 2001). Consequently the MER is in an oblique rifting configuration the recent time.

The investigated area is located in the NE-oriented MER between 8°00' and 9°15' N and between 38°45' and 40°00' E. In this rift section, a system of aligned Quaternary eruptive centers (volcano Gedemsa, volcano Bosetti, volcano Kone, volcano Fantale) and associated structures form a right-stepping, en echelon array within the rift valley (Fig. 1), which is bounded by Mid-Miocene border faults (EBINGER & CASEY, 2001). We use the association of high spectral resolution Landsat data, and derived processed data (e.g. principal component analysis (PCA), classifications), very high spatial resolution digitized aerial photographs to characterize and quantify the deformation. We generated photogrammetric Digital Elevation Models (DEMs) in the Asela, Gedemsa, Bosetti, Kone and Fantale regions (Fig. 1). The DEMs with metric resolution are used to quantify the deformation and to analyze the interactions between brittle deformations and magmatism (eruptive and intrusive).

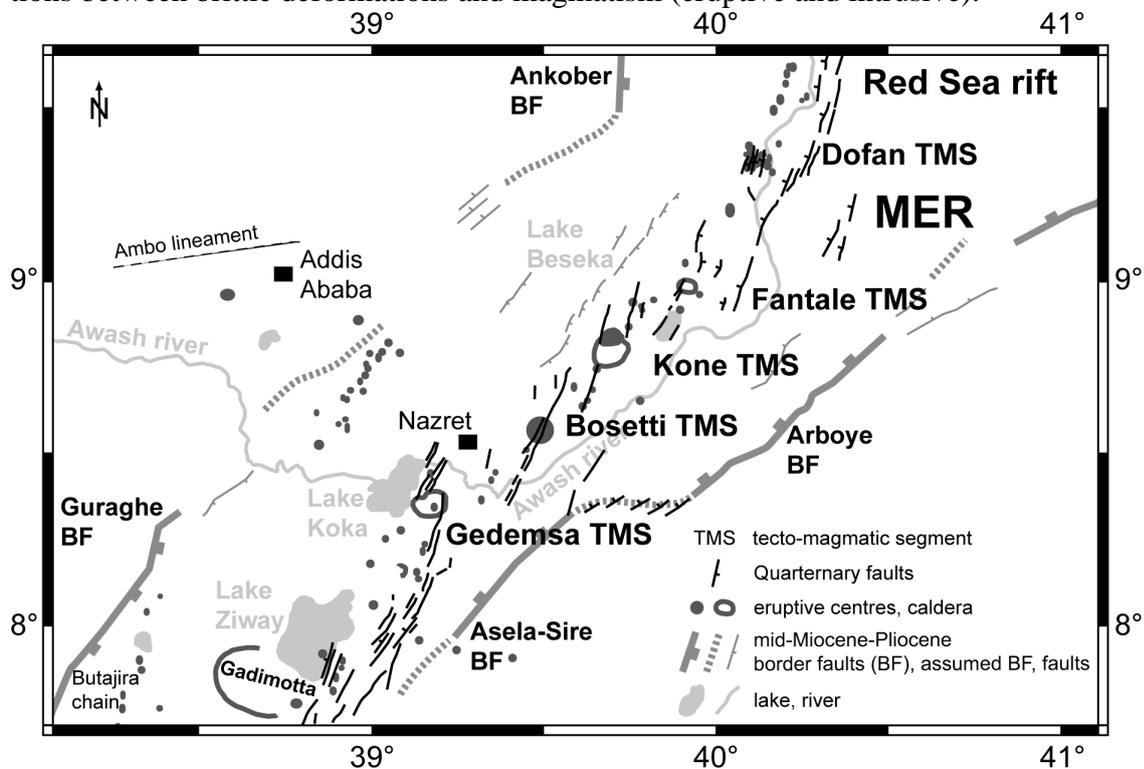


Fig. 1: Geotectonic map of the MER. Intrarift faults and tectono-magmatic segments (TMS) are oriented N10°-20°E. Border faults and the WFB oriented N35°E. The TMS are arranged en echelon. The segments are named by single strato volcanoes which form the centres of the TMS.

2. Methods

Image processing

Image processing allowed us to constrain the chronology of the last episodes of volcanism and their interactions with recent faulting. Several unsupervised and supervised classifications, as well as PCAs were generated using Landsat TM-5 channels. In addition to the classifications several image ratios have been calculated (for example $5/7-5/1-5/4*3/4$) to emphasize certain geological features (INZANA et al., 2003). The processed images have been combined to produce geological maps (e.g. Fig. 3) for each segment. The geological and structural content extraction from the images was facilitated by the climatic and geomorphological conditions in the MER. The geological structures are morphologically preserved owing to their young age and their resistance to erosion and visible on the images due to the lack of dense vegetation and minor soil cover.

With principal component analysis (PCA) we can reduce the multivariate record from Landsat-TM on few components with a minimal correlation between the components, to facilitate the image interpretation. A minimal correlation between the components offers favorable requirements for image interpretations. As it can reduce the seven-dimensional data set from Landsat-TM to a three-dimensional data space, it can display the major information of the total data set in a single RGB or HIS image. For example, the total data set from the Bosetti area is very well represented by three components with 97,72% of the total variance. Principal component analysis offers valuable clues for the number of different surface cover in the investigation area and it a useful adjuvant in preparation for classifications. An interpretation of RGB color composition completed and checked by fieldwork and aerial photographs shows that potentially nine rock units can be distinguished.

Classifications were carried out in several steps for a precise identification of the geological units. Initially, unsupervised classifications are useful to indicate how many classes can be separated in the Landsat record. Subsequently, input channels must be chosen and training areas must be determined for supervised classifications. With the unsupervised classification using the K-mean algorithm after BAZDEK (1973) ten classes can be distinguished for the example of the Bosetti area. In our case, classifications show best results with input channel combination 3-4-5-7.

In order to increase the quality of supervised classifications several aspects were considered for the definition of training areas. The training areas for the example area Bosetti are extracted with the aid of the geological map of BROTZU et al. (1980). In addition to the geological maps descriptions of rock samples were available at few places from fieldwork. Morphological characteristics partly allow conclusions on the rock units and the relative chronology. Furthermore, the results of the PCAs and unsupervised classifications were helpful to define the training areas.

The supervised classifications shown in figure 3 were carried out with Maximum-Likelihood algorithm after DUDA et al. (2001) and SCHOWENGERDT (2002). Separability measures (Bhattacharyya distance) between the classes give a quantitative evaluation of the classification (separability scale range between 0 and 2). Very high separabilities (between 1,97 and 1,99) indicate an accurate classification for the balsaltic units. However, a differentiation is less clear between the acidic units (separabilities 0,59 to 1,99). Results of these classifications

were additionally controlled using the few existing geological maps (BROTZU et al., 1980; BOCCALETTI et al., 1999) and field work.

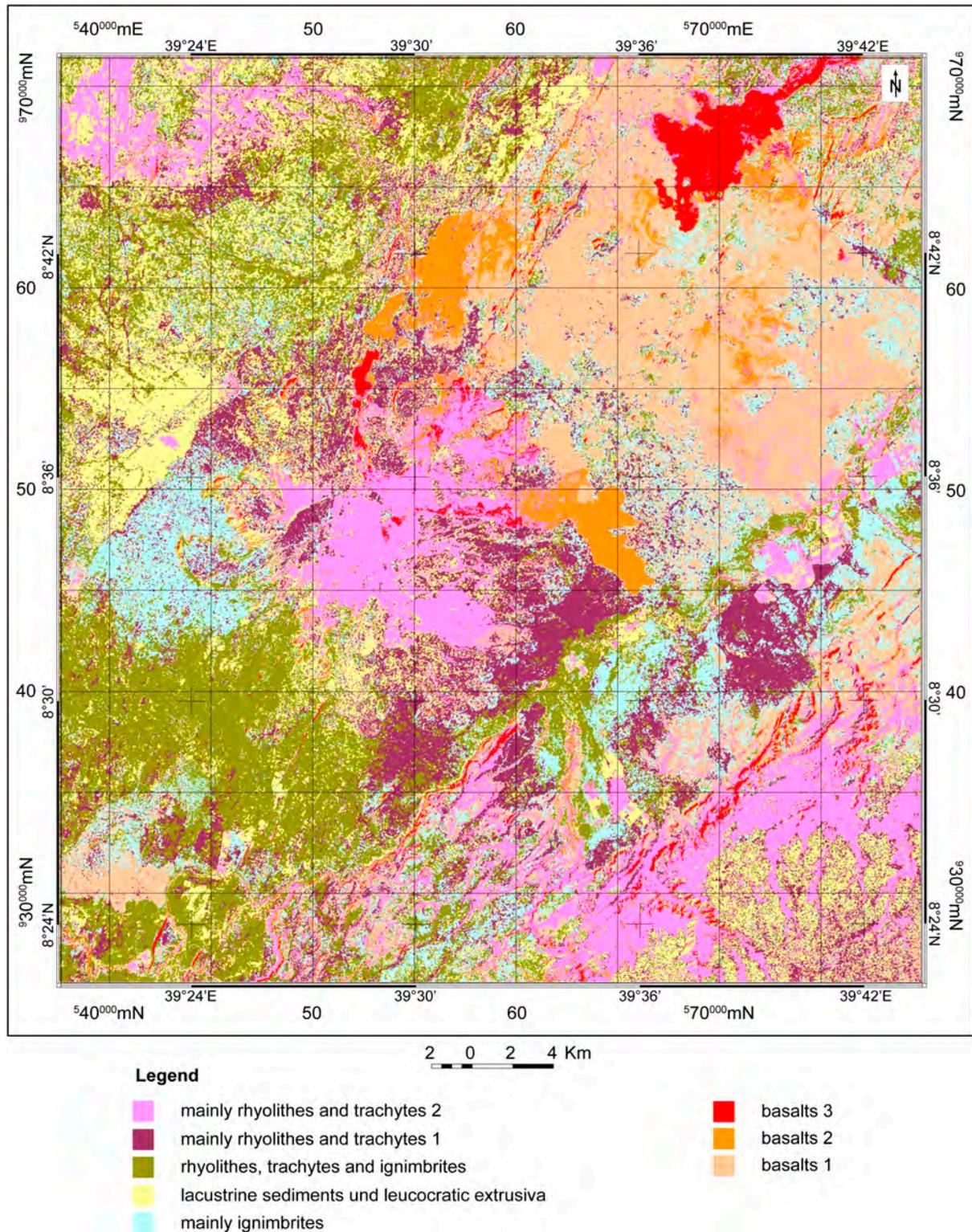


Fig. 2: Supervised classification of the Bosetti area; Maximum Likelihood algorithm without null class; input channels: 3-4-5-7; average class separability = 1,68 (highest possible separability = 2); maximum separability = 1,99 (basalt 3), minimum separability = 0,59 (rhyolites, trachytes, ignimbrites - green colored and mainly ignimbrites - blue coloured)

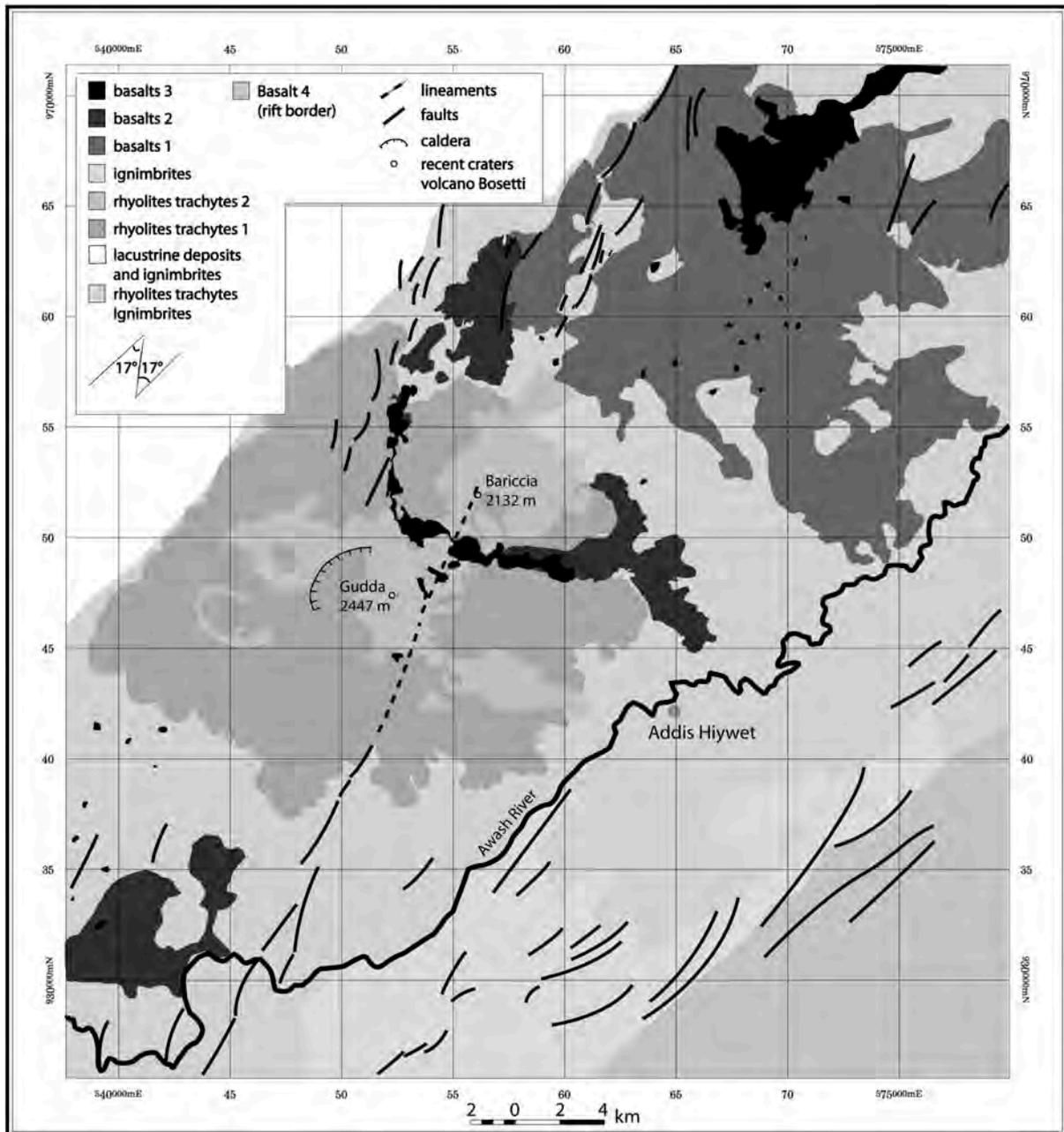


Fig. 3: Geological map of volcano Bosetti area based on image processing and interpretation.

Digital elevation models

Digital Elevation Models (DEM) representing the surface of the MER allow three dimensional quantification of structures as well as morphological observations. We used orthogonal stereoscopic pairs of aerial photographs with a scale of 1:25.000 to extract DEMs with metric resolutions. DEMs and remote sensing data are projected in UTM coordinates onto the geodetic datum for Ethiopia: Adindan.

How accurate DEMs can reproduce surface structures has been evaluated by comparing fault profiles extracted from DEM and measured with kinematic GPS. The qualitative and quantitative reproductions of the faults via both methods occur in with a high similarity. Sedimentation, erosion and image resolution pose frequently problems when identifying fault boundaries and complicate exact measurements of a fault. Additionally, using kinematic GPS on

rough terrains it is somewhat difficult to follow the exact fault scarps (vegetation, erosion, river incision etc.). The slight differences in length, heave and throw can therefore be related on problems associated with fault measurements using both methods. Anyway the displacement length ratios yield equal results from the DEM and GPS methods. It is especially to point out that the shapes of profiles extracted from DEM and GPS data are identical. Whereby we show that fine structures can be accurately identified and quantified from DEMs.

3. Model

Image processing from Landsat data indicate a similar and recurrent deformation pattern in the rift. The tecto-magmatic segments (TMS) Gedemsa, Bosetti, Kone and Fantale show a symmetrical construction with a volcanic centre and tips characterized by brittle deformation. One example of a geological map based on image processing and illustrating the TMS Bosetti is shown in figure 3. It is pointed out that the youngest basalts can be clearly distinguished with high separabilities (statistical values) in the results of the classifications. The largest amounts of the youngest basalts occur in the centre and decrease towards the tips of the segment. In opposite, the number of faults increases, from the magmatic centre outwards. Furthermore, aligned cones with recent fissural eruptions with the same direction than the segment axis can be observed. In the northern part of the map, the TMS Bosetti and Kone overlap. In that area, lava flows of young basalts and aligned cones located northeast belong to TMS Kone. The axis of the segment (N18°E oriented) and the border faults (N35°E oriented) form an angle of 17°. These symmetric faulting-magmatism pattern can be observed in each segment. As a consequence of the close relation between magmatism and faulting, recurrent symmetries and segment overlapping, Gedemsa, Bosetti, Fantale and Kone can be understood as autonomous tecto-magmatic segments. We propose the following model where each TMS shows a similarly symmetrical spatial distribution of surface deformation type and style (Fig.4). Domains with minor magmatic as well as brittle deformations separate the TMS.

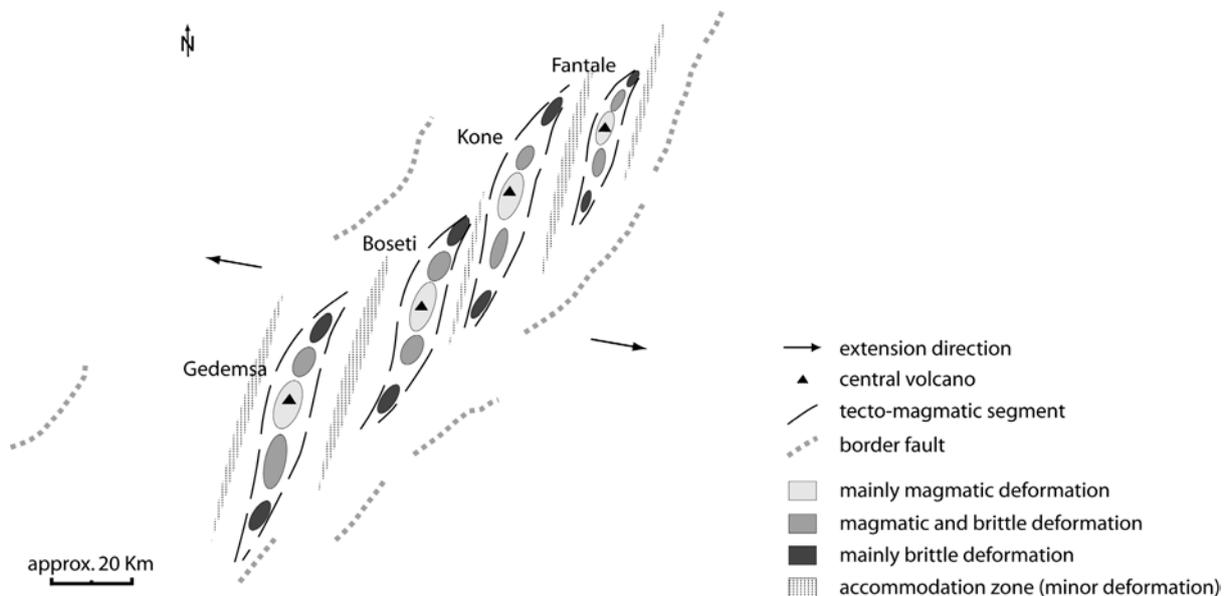


Fig. 4: Model of the tecto-magmatic segments (TMS) in the northern MER

Center domains

The centers of TMS are predominantly characterized by a preponderant magmatic deformation. They are the locus of silicic strato volcanoes associated with one or several calderas and the highest amount of recent basalts. Consequently, the formation of calderas indicates a constant and locally fixed magma production for a long period, the TMS being anchored on the central volcanoes. The segment centers formed about Plio-Quaternary silicic strato volcanoes are characterized by a predominant magmatism with comparatively small faults and lower fault density. In these domains, seismic activity with relatively small magnitudes are observed (KEIR et al., 2003). Acidic lava flows indicate strato volcano development whereas overlying large basaltic flows suggest a more shield typical volcano with fissural eruptions.

Intermediate domains

In the intermediate domains we notice massive interaction between magma injections and faults. We propose, from image interpretation analyses controlled by field analysis, that shallow dikes fed by the central magmatic centers, trigger the generation of open fissures, aligned basaltic cones and faults at the surface. These intermediate domains are characterized by magmatic as well as tectonic deformation with similar intensity.

A set of two faults punctuated by aligned cones can clearly be observed on the DEM of the southwestern part of volcano Kone (Fig. 5). The development of a singular pattern of two parallel lines of faults with associated volcanic constructs has been modelled as induced by shallow diking (e.g. RUBIN, 1992). Intrusion will occur at lower tectonic stress than for faulting, provided that magma pressure is high, therefore faulting is generated by diking due to stress buildup along the dike perimeters (RUBIN, 1992).

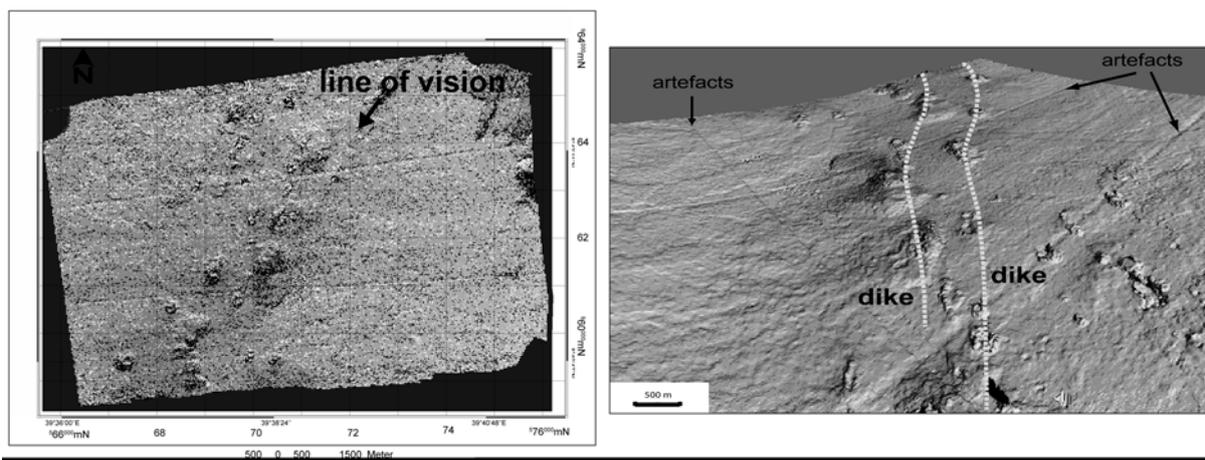


Fig. 5: Aligned cones, southwest volcano Kone, DEM (resolution 0,9 m)

Faults with atypical morphology appear outside of the centres of the TMS. For instance figure 6 shows a 600 m long fault segment with 65 m maximal throw and 26 m maximal heave from Asela southeast of Gedemsa. The most atypical fault profiles are situated in the middle of the fault segment where the maximal displacement can be found. The foot-wall remains flat and the concave hanging-wall curves upwardly toward the fault plane. GLOAGUEN et al. (2003) explain these atypical fault morphology by upward propagation of extensional stress generated by diking. Fault segments with an echelon arrangement are another indicators for shall-

low diking. The fault segment arrangement appears similarly to dike induced faults described by DELANEY & POLLARD (1981).

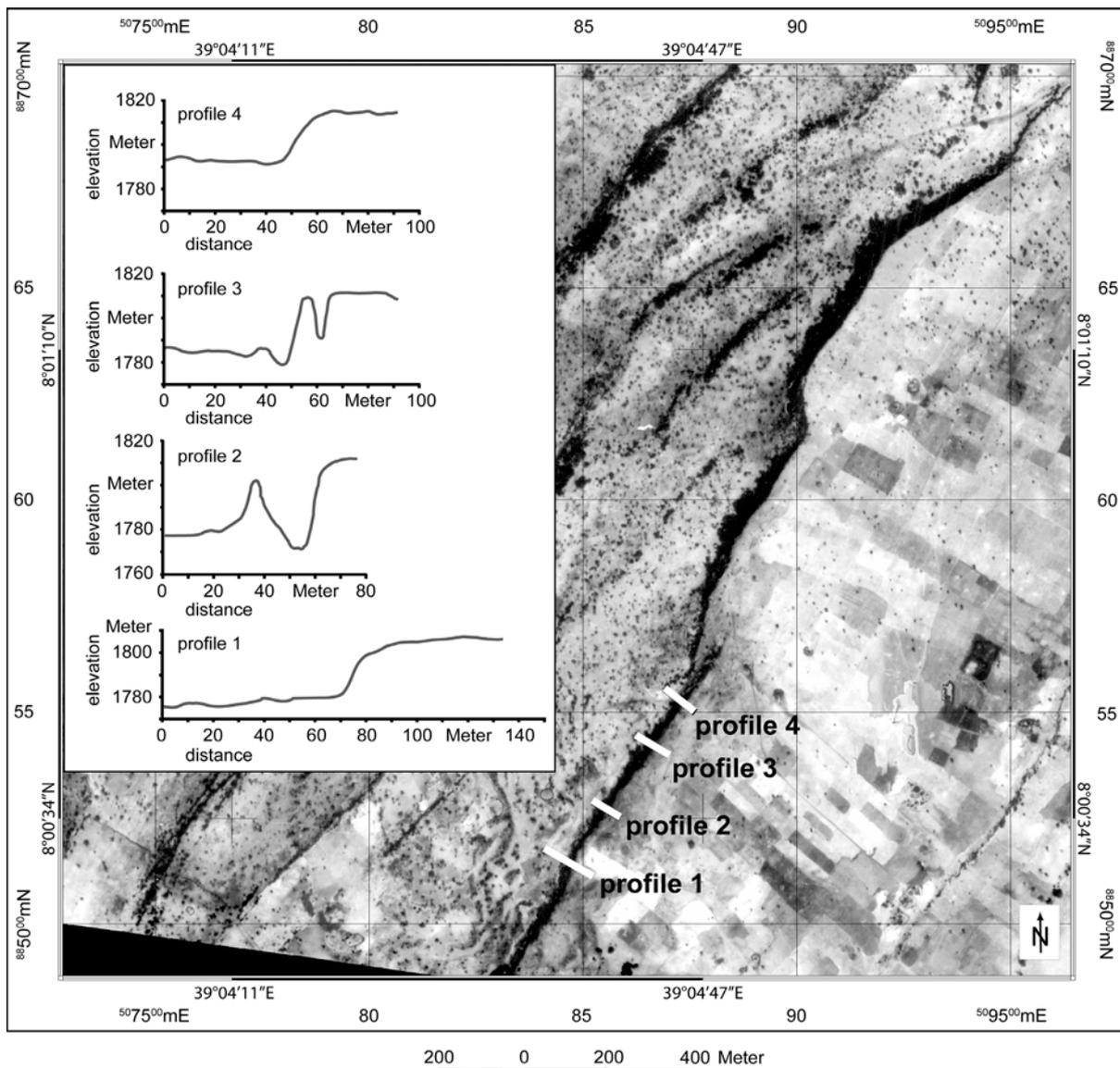


Fig. 6: Atypical fault morphology located in Asela, southeast volcano Gedemsa, (aerial photograph, profiles created from DEM less than 2 m resolution)

Low displacement-length ratios in Asela ($D_t / L_{max} = 0,025$) indicate irregular fault profiles inside the TMS. Relatively long fault segments can be associated with low displacements. The displacement-length ratios in the MER show considerably lower values comparatively with areas associated with brittle deformation without magmatism. GLOAGUEN et al. (2003) refer a displacement-length ratio of 0,08 and regular fault profiles in the Kenya Rift south of the MER. We propose that, following the model of DELANEY & POLLARD (1981) magma injection cause stress rotation during faulting and produce en echelon fault segments. As they grow the segments will generate a fault highly linked with typically low D/L ratios. We propose that the low displacement-length ratios and irregular fault profiles in the TMS are caused by magma injection.

Tip domains

Towards the tips of segments, the influence of diking decreases and faulting gets dominant. Recent magma injections are absent in the tip domains. The tip domains are the locus of longitudinal propagation of the TMS. The N10°-20°E oriented TMS propagate into the border faults whereby their tips show sigmoidal bendings, changing direction to reach an orientation sub-parallel to the rift borders (N30°-40°E).

Longitudinal propagation of the TMS generates mainly two types of fault interactions based on observations on Landsat scenes, and aerial photographs. In the first case, more recent N10°-20°E faults cut the older N40°-65°E faults with angles of intersection around 30° and up to 50° (Fig. 7). In the second case, the propagation of younger (N10°-20°E) faults into older (N40°-50°E) create curved faults (Fig. 8). The figure 8 represents the rift border zone west to volcano Kone, the propagation takes place by the catching of the southward propagating N10°-20°E faults by older N40°E faults, forming curved faults with direction changes less than 30°. We point out that interactions of two fault generations have been principally observed only in the rift border areas. Active faults are surrounded by stress shadows in which adjacent faults can not intrude (SCHOLZ, 2002). It implies that the stress field near border faults must be negligible. In other words, border faults must be inactivated to allow the propagation and linkage of younger intrarift faults. A deactivated border fault corroborates decreasing effect of the detachment on the rift development and rift symmetry in the MER as proposed by EBINGER & CASEY (2001).

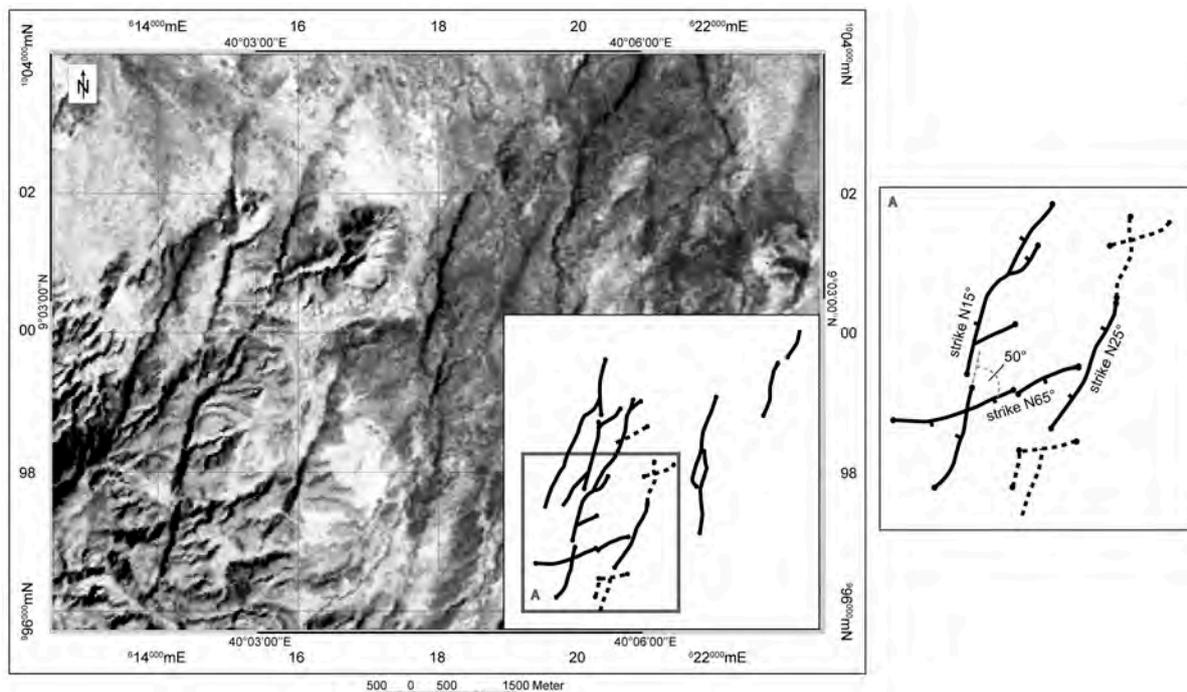


Fig. 7: Fault cross-cutting, rift border zone, northeast volcano Fantale, (Landsat TM-5; channels 6-4-2 (Equalized) shown in grayscales)

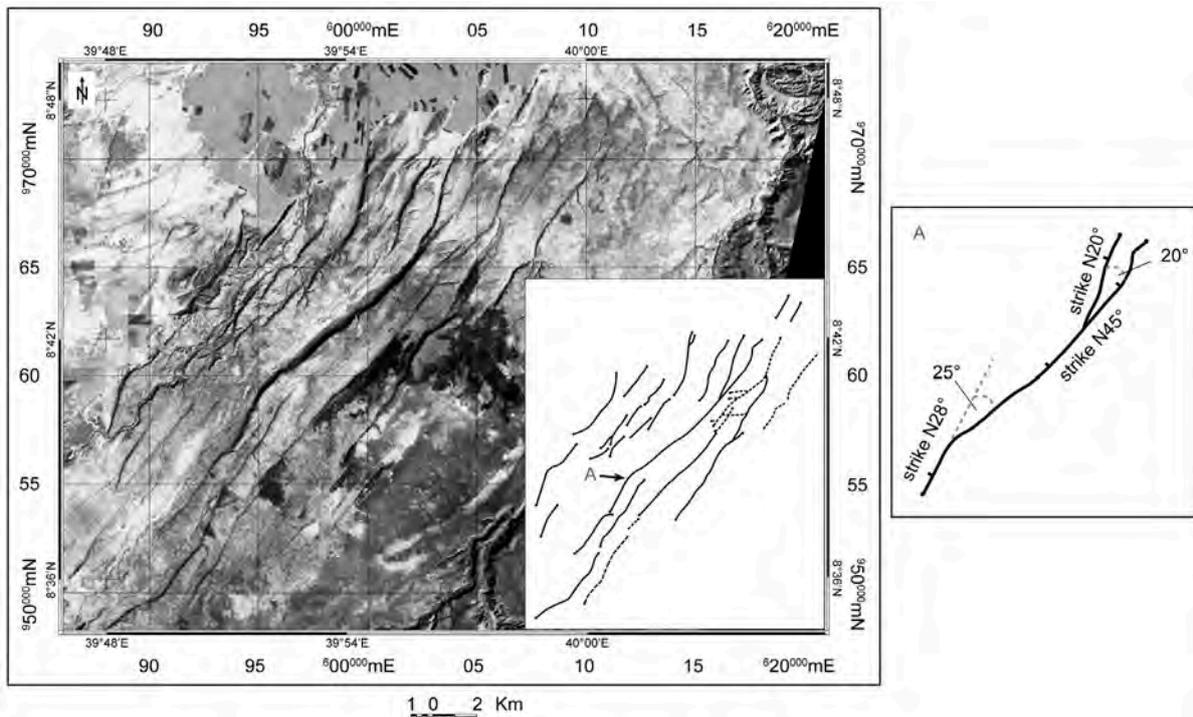


Fig. 8: Rift border zone, west to volcano Kone (Landsat TM-5; channels 6-4-2 (Equalized) shown in grayscales)

4. Discussion

Our observations and conclusions regarding the type of deformation within the TMS are in good agreement with the assumption from KERANEN et al. (2004) who postulate that mafic intrusions accommodate extension in the center of the rift valley. KERANEN et al. (2004) detect from 3-D Tomography a crustal segmentation and indicate mafic intrusions ~20 Km wide and ~50 Km long generally located beneath the TMS which are en echelon and NNE oriented. It seems that the tecto-magmatic segmentation at the surface results from modified and segmented crust within the narrow rift valley.

Our tecto-magmatic model supports and completes the EBINGER & CASEY (2001) model of continental breakup in magmatic provinces proposing that magmatic segments are the locus of extension and central magma chambers feed laterally propagating dikes. Fault interactions in the MER confirm that border faults are abandoned during recent stage of rifting. This interaction of two fault generations is a marker for a strain concentration in the central part of the rift especially in the TMS and a diminution of the stress in the rift flanks. In common rifting models, border faults are expected to be active. Instead of this the border faults of the MER are seismically and structurally inactive and we observe the occurrence of a new fault generation during the Quaternary. This development of intrarift faults in the MER is explained by magma injection in the model proposed by EBINGER & CASEY (2001). Diking induce additional local stress and produce a new fault generation in the intrarift. Magmatic as well as tectonic deformations are strongly associated to the segments whereby it is proved that the TMS are the principal locus of active extension in the Quaternary. This results are confirmed by the geodetic data from BILHALM et al. (1999) which indicate that magmatic segments accommodate >80 % of strain across the rift. Our model (Fig. 4) indicate shallow diking occurs longitudinally, along the magmatic centre axes in 40-70 km long and 10-15

wide zones oriented orthogonally to the recent extension direction. It is in agreement with the model from EBINGER & CASEY (2001) where magma chambers feed laterally propagating dikes. Consequently the development of a second fault population within the TMS is related to shallow diking. The tecto-magmatic segmentation in the MER is comparable with very slow spreading mid-oceanic ridges where the along-axis segmentation is defined by 60-80 Km long, 20 Km wide zones of dike injection and faulting with a similar axial valley and flank morphology (BATIZA, 1996). Consequently, the deformation distribution and type in the MER can be understood as the result of an extensional rifting in transition between continental and oceanic.

6. Conclusions

Along-axis segmentation in the MER combine magmatic as well as tectonic deformation processes characteristics. Consequently Gedemsa, Bosetti, Kone and Fantale magmatic regions can be described as autonomous tecto-magmatic segments (TMS). Aligned cones, atypical fault symmetries, en echelon fault segments, atypical displacement-length ratio indicate diking. Within the TMS faults are induced by dikes that are connected to the magmatic centers. Evidences of diking decrease to the segment tips. The diking is oriented sub-parallel to the segment axis (N10°-20°E) and therefore oriented orthogonally to the recent extension direction. In the tip domains of the TMS the generation and growth of recent N10°-20°E intrarift faults can be observed and indicate a strain concentration within the segments. The TMS propagate (N10°-20°E) into the rift margins whereby the tips are sigmoidal bent (sub-parallel to rift orientation). Border faults being inactive is a general pre-condition for propagation of intrarift faults into the rift margins. Narrow zones (40-70 km length, 10-15 km wide) of diking and the propagation of the TMS are in agreement with EBINGER & CASEY (2001) model of continental breakup in magmatic provinces. We confirm that central magma chambers feed laterally propagating dikes and that the TMS are the locus of extension. All observations suggest a tight affinity with along-axis segmentation at mid ocean ridges. We suggest that the distribution and type in the MER can be probably considered as a marker for continental rift in transition to MOR.

References

- ACOCELLA, V. & KROME T., (2002): Holocene extension direction along the main Ethiopian Rift, East Africa. *TERRA Nova*, vol. 14, no. 3, pp. 191-197
- ACOCELLA, V., KORME, T. & SALVINI, F., (2003): Formation of normal faults along the axial zone of the ETHIOPIAN Rift. *Journal of Structural Geology*, vol. 25, no. 4, pp. 503-513
- BATIZA, R., (1996): Magmatic segmentation of mid-ocean ridges; a review. *Geological Society Special PUBLICATIONS*, vol. 118, pp. 103-130
- BAZDEK, J.C., (1981): Pattern recognition with fuzzy objective function algorithms. In: Bazdek, J.C. ed., *Advanced applications in pattern recognition II*. 256 p., Plenum Press, New York
- BILHAM, R., BENDICK, R., LARSON, K., MOHR, P., BRAUN, J., TESFAYE, S. & ASFAW, L., (1999): Secular and tidal strain across the main Ethiopian Rift. *Geophysical Research Letters*, vol. 26, no. 18, pp. 2789-2792
- BOCCALETTI, M., GETANEH, A. & TORTORICI, L., (1992): The main Ethiopian Rift; an example of oblique rifting. *Annales Tectonicae*, vol. 6, no. 1, pp. 20-25

- BOCCALETTI, M., BONINI, M., MAZZUOLI, R. & TRUA, T., (1999): Pliocene-Quaternary volcanism and faulting in THE northern Main Ethiopian Rift (with two geological maps at scale 1:50,000): *Acta Vulcanologica*, vol. 11(1), p. 83-97
- BROTZU, P., MORBIDELLI, L., PICCIRILLO, E.M. & TRAVERSA, G., (1980): Volcanological and magmatological evidence of the Boseti volcanic complex (Main Ethiopian Rift), in *Geodynamic Evolution of the Afro-Arabian Rift System* (Rome, 18.-20.April 1979): Rome, Italy, Accademia Nazionale Dei Lincei, 47, p. 317-366
- CHU, D. & GORDON, R.G., (1999): Evidence for motion between Nubia and Somalia along the Southwest Indian Ridge. *Nature* (London), vol. 398, no. 6722, pp. 64-67
- DELANEY, P.T. & POLLARD, D.D., (1981): Deformation of host rocks and flow of magma during growth of minette dikes and breccia-bearing intrusions near ship rock. New Mexico: U.S. Geological Survey Professional Paper, Report, vol. 1202, pp. 61
- DUDA, R.O., HART, P.E. & STORK, D.G., (2001): *Pattern classification*. 2th ed., 654 p., Wiley and Sons, New York
- EBINGER, C.J., BECHTEL, T.D., FORSYTH, D.W. & BOWIN, C.O., (1989): Effective elastic plate thickness beneath the East African and Afar plateaus and dynamic compensation of the uplifts. *Journal of Geophysical Research, B, Solid Earth and Planets*, vol. 94, no. 3, pp. 2883-2901
- EBINGER, C.J., YEMANE, T., WOLDE GABRIEL, G., ARONSON, J.L. & WALTER, R.C., (1993): Late Eocene-Recent volcanism and faulting in the southern main Ethiopian Rift. *Journal of the Geological Society of London*, vol. 150, Part 1, pp. 99-108
- EBINGER, C.J. & CASEY, M., (2001): Continental breakup in magmatic provinces: An Ethiopian example: *Geology Society of America Bulletin*, v. 12, p. 527-530
- GLOAGUEN, R., KURZ, T., EBINGER, C., CASEY, M. & ABEBE, B., (2003): Atypical normal faults MORPHOLOGY in the Main Ethiopian Rift: AGU Fall Meeting, San Francisco 06-10 dec. 2003. *Eos Trans. AGU*, 84(46), Fall Meet. Suppl., Abstract S51C-0072
- INZANA, J., KUSKY, T., HIGGS, G. & TUCKER, R., (2003): Supervised classifications of Landsat TM band ratio images and Landsat TM band ratio image with radar for geological interpretations of central Madagascar. *Journal of Africa Earth Sciences*, vol. 37, pp. 59-72
- KEIR, D., EBINGER, C.J., STUART, G.W., DALY, E., D. & AYELE, A., (2003): Seismicity of the Northern Main ETHIOPIAN and Southern Red Sea Rift: AGU Fall Meeting, San Francisco 06-10 dec. 2003. *Eos Trans. AGU*, 84(46), Fall Meet. Suppl., Abstract S51C-0067
- KERANEN, K., KLEMPERER, S.L., GLOAGUEN, R. & EAGLE Working Group, (2004): Three-dimensional seismic IMAGING of a protoridge axis in the Main Ethiopian rift. *Geology*, vol. 32, no. 11, pp. 949-952
- RUBIN, A.M., (1992): Dike-induced faulting and graben subsidence in volcanic rift zones. *Journal of Geophysical Research, B, Solid Earth and Planets*, vol. 97, no. 2, pp. 1839-1858
- SCHOLZ, C.H., (2002): *The mechanics of earthquakes and faulting*. 2th ed., 471 S., Cambridge (Cambridge Univ. Press)
- SCHOWENGERDT, R. A., (2002): *Remote Sensing, Techniques for Image Processing and Classification*. 2th ed., 522 p, Academic Press, San Diego
- SETH, B., GLOAGUEN, R., THIRLWALL, M., PFAENDER, J., YIRGU, G. & WNOROWSKA, U., (2005): Quaternary fissural basalts in the Main Ethiopian Rift, EGU Conference, Vienna, april 2005

Volcanotectonic evolution of the Miocene Montaña Horgazales complex, SW-Gran Canaria: GIS & remote sensing analysis

Frank Müller¹, Richard Gloaguen¹, Elliot Hildner¹,
Hans-Ulrich Schmincke², Mari Sumita²

Zusammenfassung: Im Südwesten von Gran Canaria, Kanarische Inseln, wurde ein rund 35km² großes stark zertaltes und daher zum Teil nicht direkt zugängliches Gebiet vulkanologisch und tektonisch kartiert und fernerkundlich analysiert. Von besonderem Interesse war eine großflächige Diskordanz, die als Abrissfläche eines vulkanischen Sektorkollapses interpretiert wird.

Die Kartierungsergebnisse in Form von GPS-Punkten, Lagerungsinformationen, detaillierter lithologischer Beschreibung und Probenanalyse bilden zusammen mit digitaler topographischer Karte (Maßstab 1:5 000) und Luftbildern des Areals die Datengrundlage. Aus diesen Daten wurden eine digitale geologisch/tektonische Karte und ein Geländemodell generiert.

Aufgrund der fehlenden lithologischen Information im Höhenmodell konnte dieses jedoch weder zur vollständigen tektonischen Analyse, noch zur Auswertung der unzugänglichen Kartierareale genutzt werden. Diese Datenlücke wurde durch die Einbindung von 16 Luftbildern kompensiert. Sie wurden in einem ersten Schritt hochauflösend eingescannt, danach orthorektifiziert und zu einem Mosaik zusammengestellt.

Die Kombination von Anwendungen maximierte die Präzision des Luftbildmosaiks, und ermöglichte die Stärken in graphischer Darstellung und Metadatenverwaltung anderer GIS einzusetzen. Daher kann das Untersuchungsgebiet mit nahezu vollem Informationsgehalt in einem hochauflösenden DGM dargestellt werden. Auf dieser graphischen Basis wurde die direkte digitale vulkanotektonischen Analyse, mit exakter Sprunghöhen- und Schichtmächtigkeitsberechnung durchgeführt, und die Geländekartierung präzisiert.

Das Modell wurde für Untersuchungen zur Destabilisierung von Vulkanflanken eingesetzt. Diese sind wichtig, da Sektorkollapse in der Entwicklung großer Vulkangebäude auftreten und den Hauptauslöser vulkanogener Tsunamis darstellen.

Introduction

Volcanic islands grow by intrusive and volcanic activity and are modified by flank collapse landslides (MASSON, et al., 2002, SCHMINCKE, 2004). The main aim of the present study was the quantitative reconstruction of a probable major flank collapse of the Miocene shield volcano of Gran Canaria (Canary Islands), creation of a morphological basin some 700 metres deep and the subsequent filling by basalt lavas overlain by at least 550 meters of ignimbrite cooling units.

For this reason an unconformity between the Miocene shield basalts and overlying series of ignimbrites was traced. The surface of the unconformity defines a cirque-like morphology - the Horgazales basin - on the western coast of Gran Canaria, and is thought to be the former main area of rock failure (SCHMINCKE & SUMITA (2004). We also want to quantify the volume of rock displaced.

¹ Frank Müller, Prof. Dr. Richard Gloaguen, Elliot Hildner, TU Bergakademie Freiberg, Institut für Geologie, Fernerkundung, Bernhard-von-Cotta-Str. 2, D-09599 Freiberg, e-mail: frank74mueller@web.de, gloaguen@geo.tu-freiberg.de, toteisloch@yahoo.de

² Prof. Dr. Hans-Ulrich Schmincke, Dr. Mari Sumita, IFM-GEOMAR, **Forschungsbereich 4: Dynamik des Ozeanbodens**, Wischhofstr. 1-3, D-24148 Kiel, e-mail: hschmincke@ifm-geomar.de, msumita@ifm-geomar.de

A better understanding of flank collapses on volcanic islands is important to assess their hazard potential, especially since such huge landslides trigger tsunamis.

Geological setting

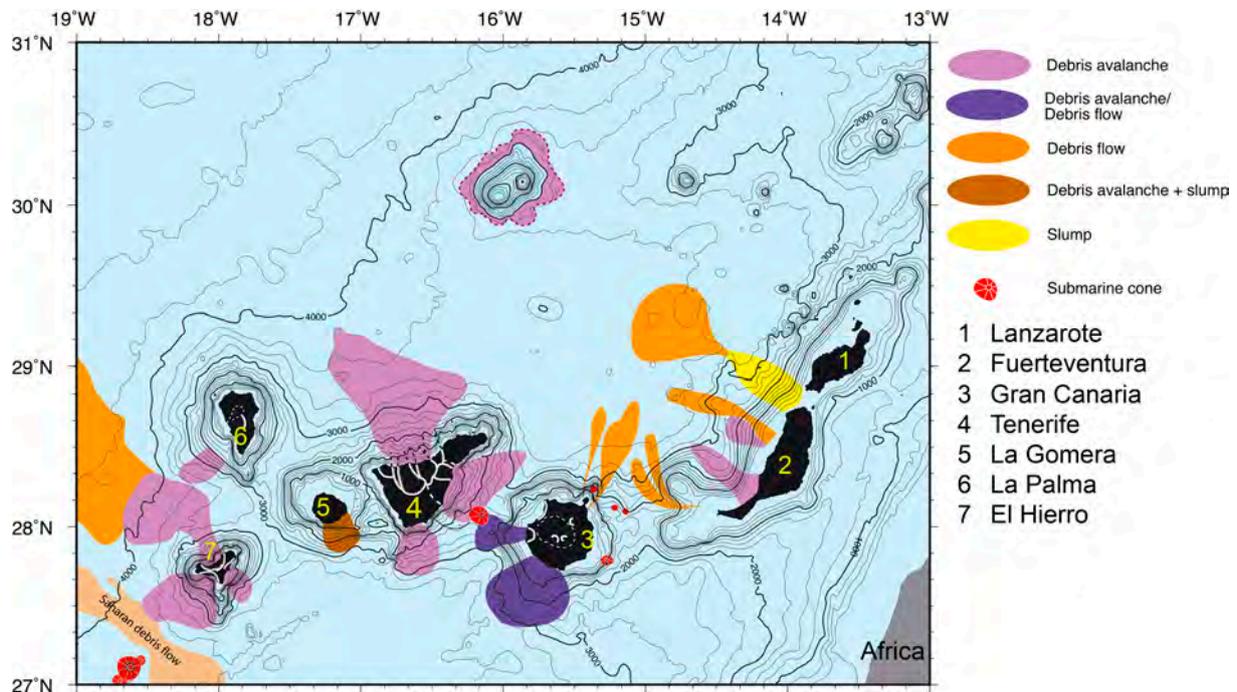


Fig. 1: Bathymetry of the Canary Islands with the distribution of slumps, debris avalanches and debris flows, after MASSON (1996), WATTS & MASSON (1995), URGELES, et al. (1997), NAVARRO (unpublished), KRASTEL, et al. (2001)

The geological evolution of the Canary Island archipelago has recently been summarized by SCHMINCKE (2004). The Canary Archipelago located off the West African continental (Fig. 1) margin is one of the major oceanic island groups in the world, Gran Canaria and Tenerife being the two central islands. The age and duration of the submarine phases of both islands are unknown. The subaerial volcanic/magmatic history of Gran Canaria started about 15 Ma and was divided into three main phases (HOERNLE & SCHMINCKE, 1993; MCDUGALL & SCHMINCKE, 1976; SCHMINCKE & SUMITA, 1998). The subaerial Miocene phase started with rapid formation of tholeiitic to alkalic shield basalts. Emplacement of the lowermost ignimbrite at 13.95 Ma on top of the basaltic shield marks the beginning of a 0.6 million year long phase of trachytic to rhyolitic volcanism (Mogán Group). The large Tejada caldera (ca. 20 km diameter) was formed synchronously with this major ignimbrite. The Mogán Group is overlain by trachyphonolitic ignimbrites and lava flows (Fataga Group, 13.4 - 8.5 Ma). This phase was accompanied and followed by intrusive syenites and a large cone sheet swarm making up the central caldera complex (SCHIRNICK, et al. 1999).

The origin of the islands themselves is still under dispute and several models have been proposed. A general but slightly diffuse westward age progression of the shield phases of the islands was interpreted as evidence for a hot spot origin of the Canary Islands whereby the source appears to have moved because the African plate is practically stationary (SCHMINCKE, 1967; SCHMINCKE, 1997).

Study area

The studied area is located in southwestern Gran Canaria, between 27°55'00" and 28°00'00" northern latitude and between 15°50'05" and 15° 46'45" western longitude. The maximum extension in N-S direction is about 10 km, in east-west direction about 5 km and it covers an area of about 36 km². Five major deeply incised northeast-southwest oriented valleys enter the ocean to the west. The main peaks are Montaña Horgazales (1066 m asl) at the eastern border of Barranco de Güigüi Grande, Montaña de las Vacas (924 m asl) southwest of M. Horgazales, Montaña del Cedro (1001 m asl) in the north-northwest of M. Horgazales as the extension of the north-northeast striking main ridge that borders the Barranco de Tocodomán in the east (Fig. 3).

Between 14,5 and 14,2 Ma an enormous flank collapse occurred in the area generating an unconformity (SCHMINCKE, H.-U., 1968). The resulting Horgazales basin can be traced from the mouth of B. de Güigüi Chico through B. de Güigüi Grande and the southern slopes of Montaña de las Vacas and Montaña Horgazales. To the north the rim of the basin follows the lower slope of the Montaña Cedro – Montaña Horgazales ridge into B. de la Aldea and into the Atlantic Ocean.

The refilling of the Horgazales basin started with thick series of fanglomerates from the east, and evolved basaltic series. At the beginning of Mogán time (14,1 Ma – 13,3 Ma) pyroclastic flows erupted from the huge Tejeda caldera in the middle of the island filling up the Horgazales basin with voluminous ignimbrites.

The main normal fault that crosses the map area from north to south developed after Mogán time (< 13.35 Ma). Some smaller accompanying normal faults are also younger than Mogán time. For detailed summary see SCHMINCKE & SUMITA 2004).

Aim

Because of the rough topography a precise and morphologically correct DGM was needed in order to quantify the varying offsets along the faults and their shape. For maximum precision we compared different processing algorithms.

Furthermore the tilting of the stratigraphic units needed to be seen in the context of the total area to create a cross section cutting the entire basin. Another aim was to create a 1:5 000 geological map based on new topographic data from the 1980ies in order to estimate the volume of material that apparently slid into the sea. We also wanted to integrate the aerial photographs to gain lithological information of the inaccessible areas.

Data collection and processing

We used 1:5 000 maps of the Excma. Mancomunidad Interinsular de Las Palmas from 1972 with a contour line interval of 5 m. Measurements were made with a geological compass and a Leica laser Vector binocular by Vectronix that allows to measure distances up to about 1200 m with a precision of several mm and dipping angles of up to 35° making it possible to calculate the thickness of individual beds.

On the basis of field results (paper map, GPS waypoints, photographs and notes), 9 digital 1:5 000 scaled topographic maps in form of shape files (GC 18A,C,D; 23A,B,C,D; 28A,B generated by GRAFCAN, 2004) and a set of 16 aerial photographs (22,15 x 22,15 cm photos with a scale of 1:22 423 to 1:23 742 taken at an altitude of 3.4 to 3.6 km with a focal length of 151,63 mm, covering the whole study area) the whole digital terrain analysis was processed.

First we extracted the important information from the digital maps; (contour lines, roads, trails), and cut the shapes files in form of the studied area, followed by manually digitizing the

boundaries of the grouped mapping units and the tectonic features based on GPS data points and the field maps to generate a first 2D geological map.

In the second step two different algorithms were used to generate digital terrain models. The first is Ordinary Point Kriging with a search radius of 12 points, based on a spherical semivariogram model. For this the vertices of the digital 5 m contour line were extracted to get an evenly distributed point network. The 1 763 560 points containing x-, y- and z-values were used calculating a raster with an output cell size of 2 m.

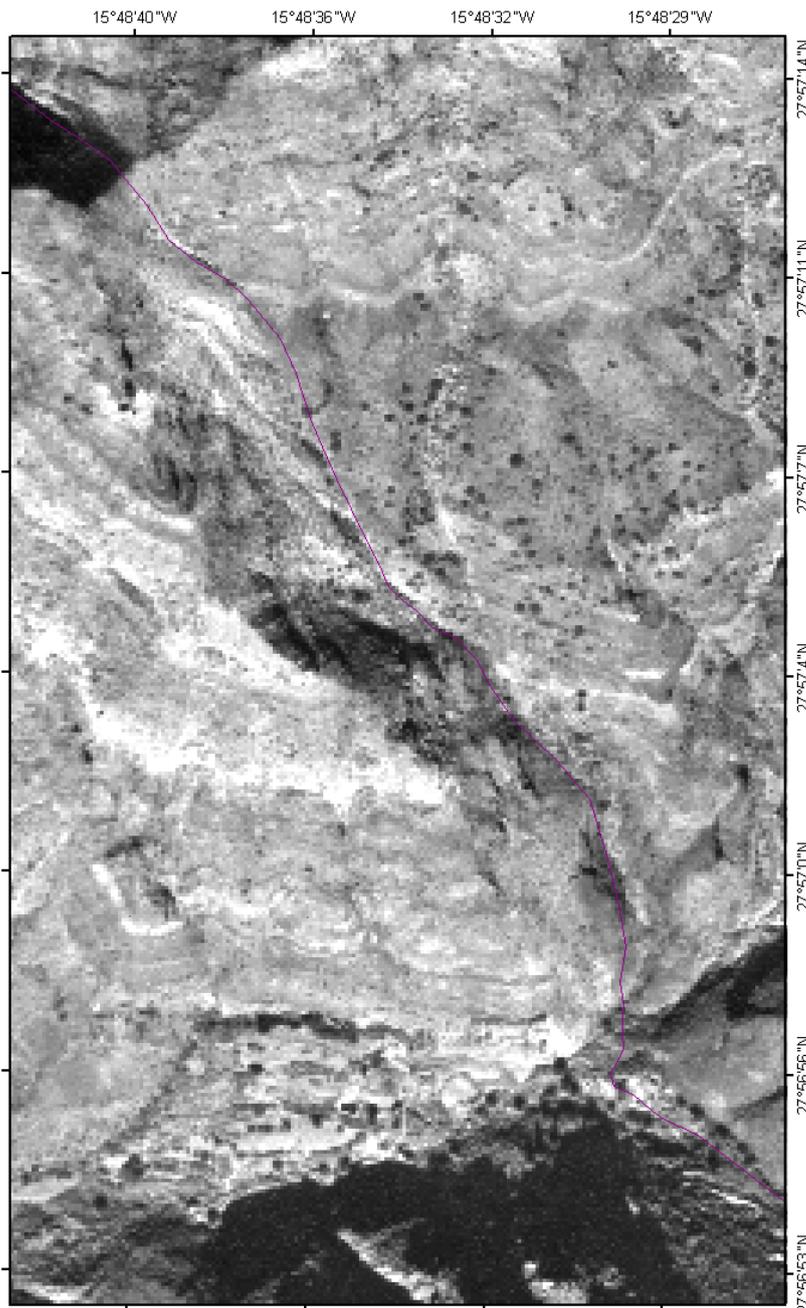


Fig.2: Fragment of mosaicked geocoded aerial photographs projected in UTM, showing a sequence of the main normal fault plane.

The second algorithm did the calculation based on the contour lines themselves. The method of finite differences performs the interpolation in three steps. First the vector elevation values are encoded into the corresponding pixels in the raster DEM. In the second step, the elevations for the remaining pixels are interpolated using the Distance Transform algorithm, which estimates the values from pixels equidistant from the pixels encoded in the first step. In the

third step the Finite Difference algorithm iteratively smoothes the raster DEM. During the applied 30 iterations, the pixels that were encoded in the first step are not changed, while the interpolated pixel values are updated based on the neighborhood values (PCI, GEOMATICS, 2003). For the tolerance value that restricts the number of times, smoothing is applied according to how it changes the elevation values of the pixels a default value of 1 was set. The resulting 32 Bit raster dataset with a cell size of 2x2 m, 3 266 columns and 5 316 rows underlies the whole project.

Afterwards the aerial photographs of this region were scanned with a resolution of 4 000 DPI and converted to TIFF files, orthorectified and cut out to avoid processing problems caused by the ocean water surface and to keep the file size as small as possible. Afterwards a network of ground control points on the basis of the digital 1:5000 maps and tie points within the overlapping area of two neighboring photographs was set up.

The mosaicking process starts with a 2nd degree polynomial correction of the images to remove hot-spots and fade followed by a radiometric normalization for the set of images using a bundle-balancing technique. It removes and reduces "patchiness" between neighboring scenes.

Then the cutlines of the overlapping images were selected by a combination of the least amount of difference in gray and gradient values between the images (Fig. 2).

The analysis of the mosaic gave more information about the altitude, thickness and direction of the outcropping units. This was used to specify inaccessible lithological boundaries. The line features for the stratigraphic boundaries were modified due to the additional information. Then each pair was transferred into polygon features, which created several small overlap and gap positions along neighboring polygons. This problem occurs because the extracted polygons do have a minimum vertex separation so they do not take vertices from the original lines for the interpolation being narrower. The problem was solved by using a topology tool snapping vertices of neighboring polygons situated next to each other. This application changes the shape of features, so the snapping radius was kept as small as possible and some vertices had to be displaced manually. Afterwards the data were converted to 3D features by interpolating their z-values from the raster dataset (Fig.3). At this stage the digital map contained all the information for further interpretation.

The DGM and the lithological information were used to set up several profiles cutting the whole basin area (Fig.4). Although we had no geophysical onshore data the precision GIS made it possible to interpolate the structures to the depth.

We extracted strike and dip by calculating the angles for a set of 3 or more points based on the DEM, according to the method described by HANEBERG (1990). We also extracted the drainage network from the DEM (JENSON AND DOMINGUE, 1988). The rivers and streams are represented by vectors which will be used for detailed neotectonic interpretation.

Interpretation and discussion of results

The applied data processing steps allowed to generate a precise surface raster overlain by vector features both containing z-values. The ordinary kriging applied took about 14 hours for calculating the large amount of points, but the resulting DEM did not veneer the topology well enough. We therefore used the DEM calculated by the method of finite distances. Although this method of calculation is much faster and the result is showing a better fit, one has to be aware of the input data being coherent in terms of the vector lines with elevation values not having any gaps. It was therefore necessary to apply the time-consuming cleaning of the shapes when using various datasets.

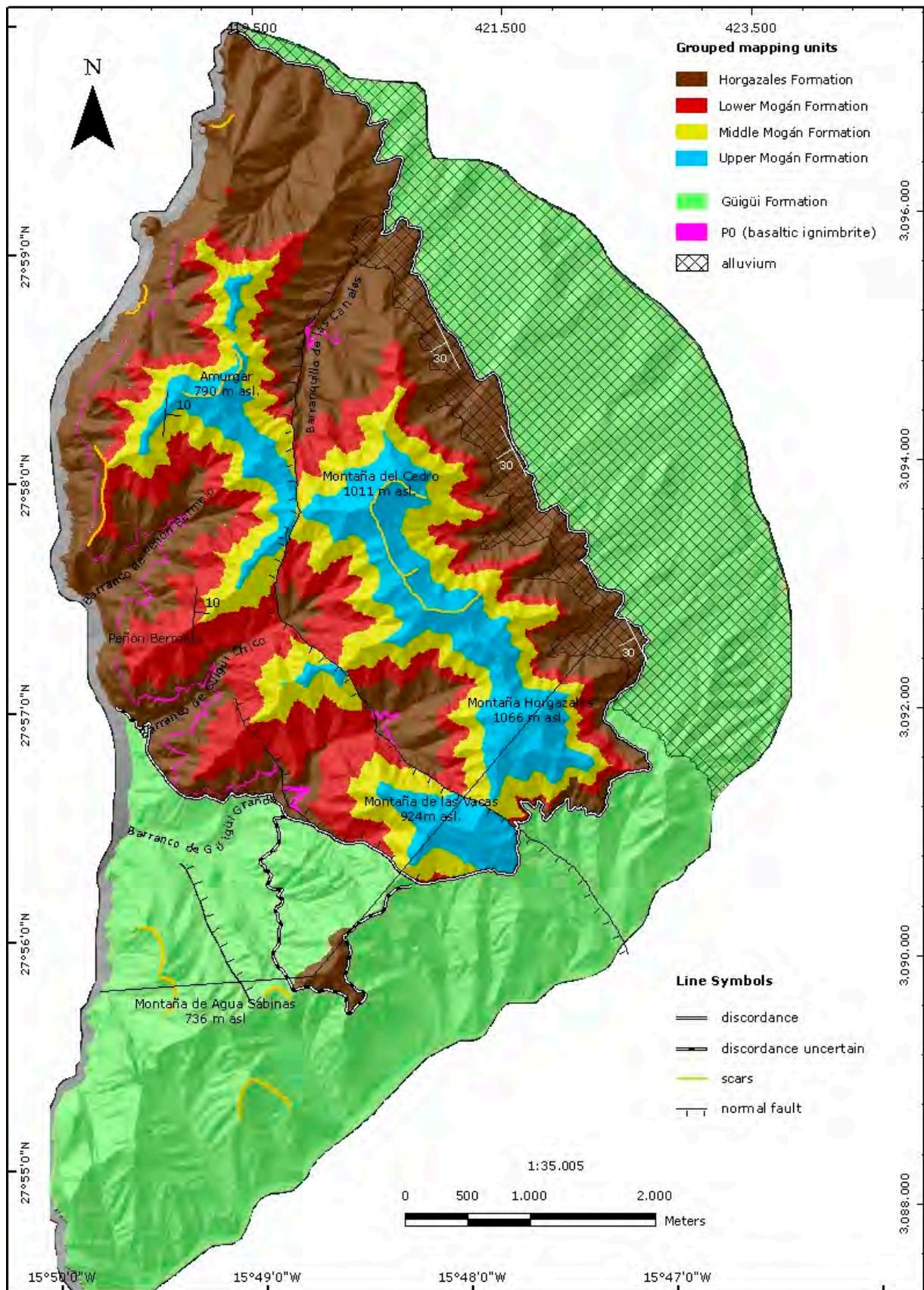


Fig. 3: Geological map containing the 3D information. The map being underlain by a shaded relief derived from the 2x2 m DEM. Illumination: azimuth 315°, altitude 30°

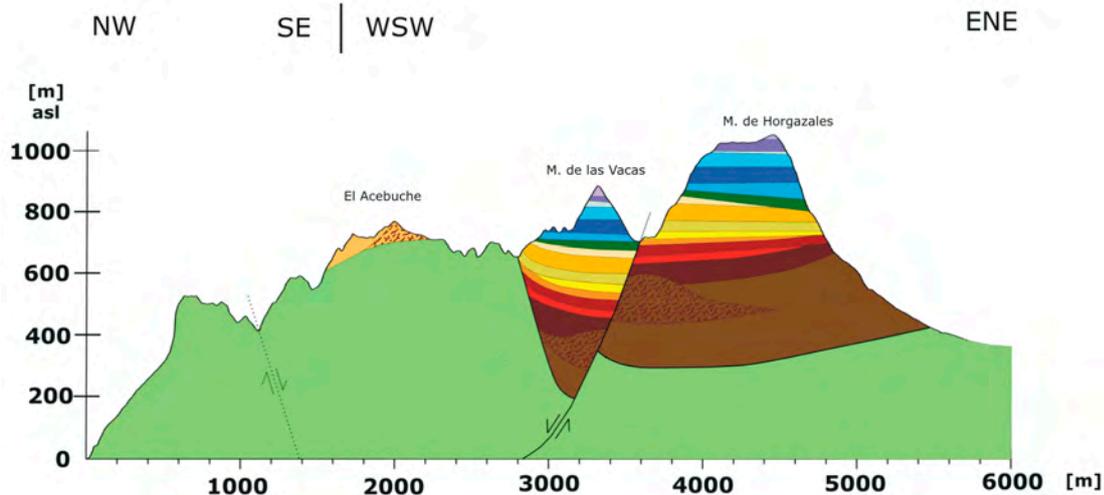


Fig. 4: Example for cross sections extracted from the GIS. See Fig. 3 for position

We finally were able to generate a GIS in which all morphological data of contour lines could be visualized by taking the shaded relief mode of the raster dataset underlying the vector data (polygons having a transparency of 20-30%) and combining it with the precision of the DEM. The information is thus transferred into a mode that is easy to interpret.

The mosaicking of the aerial photographs caused some problems. On the one hand the high illumination and therefore high reflectance within the area together with the sequence being taken at different times of the day made it hard to set up a highly precise network of ground control points. The spatial errors are thus at least 2,5 m. Moreover, the steep sea cliffs made it impossible to achieve acceptable results. These areas had to be analyzed by using a mirror stereoscope.

The detailed map and profiles through the area are new. Based on the precision of 2x2 m cell size within the raster the main normal fault shows an offset of \varnothing 170 m rising from north to south confirming earlier inferences that the faults are listric. In addition, the precise information on lithological boundaries such as individual ignimbrite cooling units allowed interpolating the structure of lithological units at depth. We are unable, however, to determine the exact age of the main faulting event but it has to be younger than 13,4 Ma, the age of the youngest faulted ignimbrite unit F. The cross-section allowed to reconstruct the dimension of the postulated flank collapse. We estimated a minimum volume of material removed by collapse as $\sim 23 \text{ km}^3$ based on the recent outcrop extent of the discordance and an average displacement height of 0.7km for the moving block.

The profile (Fig.4) shows the stratigraphic section from the sea in the west through El Acebuche massif, Montaña de las Vacas and Montaña Horgazales in the east. The oldest rock unit is the Güigüi Formation (green) consisting of olivine- and pyroxene-phyric shield basalts that dip gently into the sea, probably a primary feature. This unit is unconformably overlain by porphyritic to aphyric basalts to benmoreites of the Horgazales Formation (brown) refilling the lower part of the Horgazales basin that appears to have formed by flank collapse about ~ 14.3 million years ago. The collapsed flank apparently moved to the west northwest. Volcanic activity resumed within the collapse scar as shown by local scoria cones, part of the Horgazales Formation. Only the lower part of the basin was filled by basaltic lava flows and scoria cones to a cumulative depth of some 100 m. Most of the morphological depression was filled by ignimbrites of Mogán Formation (13.95 – 13.36 Ma, BOOGARD & SCHMINCKE (1998); Lower Mogán Fm. = red, Middle Mogán = yellow Upper Mogán = blue). A widespread unit of basaltic lava flows and local scoria cones separates the Middle and Upper Mogán formations (T4 = green). The main fault described above and another presumably normal fault lo-

cated west of El Acebuche massif, are creating a graben structure between the mountains on the coast and Montaña Horgazales in the east.

The remote sensing analysis was an important tool setting up a precise GIS allowing to quantify the dimension of a major volcanic landslide and provide a precise 3-D imagination of major tectonic surfaces.

References

- BOOGARD, P.V.D. & SCHMINCKE, H.-U., 1998: Chronostratigraphy of Gran Canaria. Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results, Weaver, P.P.E., Schmincke, H.-U., Firth, J.V. & Duffield, W., 157: 127-140
- Krastel, S., Schmincke, H.-U., Jacobs, C.L., Rihm, R., Le Bas, T.P., Alibés, B., 2001: Submarine landslides around the Canary Islands. *Journal of Geophysical Research*, 106: 3977-3997
- HOERNLE, K. & SCHMINCKE, H.-U., 1993: The Role of Partial Melting in the 15-Ma Geochemical Evolution of Gran Canaria: A Blob Model for the Canary Hotspot. *Journal of Petrology*, 34: 599-626
- MASSON, D.G., 1996: Catastrophic collapse of the volcanic island of Hierro 15 ka ago and the history of landslides in the Canary Islands. *Geology*, 24: 231-234
- MASSON, D.G., WATTS, A.B., GEE, M.J.R., URGELES, R., MITCHELL, N.C., LE-BAS, T.P. & CANALES, M., 2002: Slope failures on the flanks of the western Canary Islands. *Earth-Science Reviews*, 57: 1-35
- MCDUGALL, I. & SCHMINCKE, H.-U., 1976: Geochronology of Gran Canaria, Canary Islands: Age of shield-building volcanism and other magmatic phases. *Bulletin of Volcanology*, 40-1: 1-21
- SCHIRNICK, C., BOOGARD, P.V.D. & SCHMINCKE, H.-U., 1999: Cone sheet formation and intrusive growth of an volcanic island - The Miocene Tejeda complex on Gran Canaria (Canary Islands). *Geology*, 27: 207-210
- SCHMINCKE, H.-U., 1967: Cone sheet swarm, resurgence of Tejeda Caldera, and the early geologic history of Gran Canaria. *Bulletin of Volcanology*, 31: 153-162
- SCHMINCKE, H.-U., 1968: Faulting versus erosion and the reconstruction of the Mid-Miocene shield volcano of Gran Canaria. *Geologische Mitteilungen*, 8: 23-50
- SCHMINCKE, H.-U., 1997: Zeitliche, strukturelle und vulkanische Entwicklung der Kanarischen Inseln, der Salvagens Inseln und des Madeira-Archipels. *Die Reptilien der Kanarischen Inseln, der Salvagens Inseln und des Madeira-Archipels*, Bischoff, W., 27-99
- SCHMINCKE, H.-U. & SUMITA, M., 1998: Volcanic Evolution of Gran Canaria reconstructed from apron sediments: synthesis of VICAP Project Drilling. Weaver, P.P.E., Schmincke, H.-U., Firth, J.V., and Duffield, W. (Eds.): *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*, 157: 443-469
- URGELES, R., CANALS, M., BARAZA, J., ALONSO, B. & MASSON, D., 1997: The most recent megalandslides of the Canary Islands; El Golfo debris avalanche and Canary debris flow, West El Hierro Island. *Journal of Geophysical Research*, B, Solid Earth and Planets, 102: 20,305-20,323
- WATTS, A.B. & MASSON, D.G., 1995: Slope failures and debris avalanches on the flanks of volcanic oceanic islands; the Canary Islands, off NW Africa. *Landslide News*, 9: 21-24
- YE, S., CANALES, J.P., RIHM, R., DAÑOBEITIA, J.J. & GALLART, J., 1999: A crustal transect through the northern and northeastern part of the volcanic edifice of Gran Canaria, Canary Islands. *Journal of Geodynamics*, 28: 3-26

Laguna Beach - Einsatzmöglichkeiten digitaler Höhenmodelle aus Fernerkundungsdaten für die geologische Interpretation zeitabhängiger tektonomorphologischer Oberflächenformen

JOHANNA ROTH¹ & TORSTEN PRINZ²

Zusammenfassung: Mit Hilfe unterschiedlich (hoch-)auflösender digitaler, fernerkundungsbasierter Geländemodelle wurde der Versuch unternommen das tektonomorphologische Inventar ausgewählter Zonen junger Gebirgsbildung zu erfassen und auf ihre Genese zu untersuchen. Insbesondere in Regionen mit aktiver (Platten-) Kollisionstektonik lassen sich in geeigneten Geländemodellen morphologische Erosionsparameter ableiten, welche die Wachstumsraten sowie Hebungstendenzen der Tektogene beschreiben. Am Beispiel Laguna Beach (Kalifornien) konnten morphologische Gradienten ermittelt werden, die in Anlehnung an Felduntersuchungen anderer Autoren die Zusammenhänge von Rinnenerosion, Materialabhängigkeit, Hangprofil, Schuttfließen, Störungsversatz zu Hebungstendenzen der Gebirgskörpern näher beleuchten und aktuelle Gefährdungspotenziale belegen. Die Einbindung von klassischen Fernerkundungsdaten (ASTER, ETM, Luftbilder etc.) ist insbesondere für Kartierung der flächenhaften Verteilung von Erosionseinzugsgebieten (Catchments) und etwaigen Materialinhomogenitäten angeschlossener Schuttrinnensysteme notwendig. Diese Kartierung kann auf der Basis von objektorientierter Klassifikation multispektraler Daten zukünftig effizient vorbereitet werden.

1 Einführung

Die seit dem Jahre 2000 nahezu flächendeckend vorliegenden SRTM-Höhendaten (NASA Shuttle Radar Topography Mission) ermöglichen die Einbindung von morphologischer Zusatzinformation in geologisch ausgerichtete Fernerkundungsvorhaben. Der geowissenschaftliche Bedarf an digitaler, großflächiger Höheninformation wurde zuvor bereits von Sensoren wie CORONA, SPOT, ASTER u.ä. bereitgestellt, musste aber immer finanz- und arbeitsaufwendig für ein spezifisches Untersuchungsgebiet generiert bzw. explizit abgeleitet werden. Mit den nun kostenlos zur Verfügung gestellten und weitgehend flächendeckend vorverarbeiteten SRTM-Daten zeichnet sich eine Fülle neuer Einsatzgebiete in den physischen Geowissenschaften, insbesondere der kleinmaßstäblichen tektonomorphologischen Interpretation von Oberflächenformen ab. In der Regel besitzen die aus der SRTM ableitbaren Höhenmodelle eine Gitterweite von ca. 30m, eine für Analysen der Oberflächenformen in kleinen bis mittleren Maßstäben hinreichend genaue Grundlage. Sollen jedoch großmaßstäbliche Detailstudien zur Ermittlung von Erosionsparametern erstellt werden, muss auf höher auflösende Modelle zurückgegriffen werden. Diese stammen z.B. aus Stereo-Luftbildern (Aerotriangulation) oder Gelände Vermessungen. Wichtige Parameter, wie Rinnen-Neigung (channel slope), Einzugsgebiet (drainage area, catchment), lithologische Variation, Störungsdichte und -ausrichtung oder Terrassenbildung sind in herkömmlichen

¹ Johanna Roth, Geologisch-Paläontologisches Institut, Westfälische Wilhelms-Universität Münster, Corrensstr. 23, 48149 Münster, e-mail: roth@uni-muenster.de

² Dr. Torsten Prinz, Informations-Verarbeitungs-Versorgungseinheit (IVV) Geowissenschaften, Westfälische Wilhelms-Universität Münster, Robert-Koch-Str. 26-28, 48149 Münster, e-mail: prinz@uni-muenster.de

satellitengestützten Geländemodellen kaum morphologisch zu verifizieren. Unterstützt werden engmaschige Modelle einfließen, welche für ausgewählte Testgebiete Interpolationspunkte bieten und eine Validierung der Ergebnisse für großflächige Räume erlauben. Arbeiten von HETZEL et al. (2002), STOCK & DIETRICH (2003) oder KOBOR & ROERING (2004) zeigen, dass insbesondere die Ermittlung von Neigungsgradienten in Geröllrinnen, die Erfassung der Lithologie, der Drainage-Einzugsgebietes sowie eine detaillierte Ableitung von Erosionsparametern sehr genaue Daten erfordern. Aus ihnen können später mögliche Hebungstendenzen von Gebirgsregionen oder den Massentransport über Erosionsparameter in abgeschätzt werden.

2 Untersuchungsraum Laguna Beach

Aufgrund der geologischen Rahmenbedingungen, des vorhandenen Datenmaterials und des aktuellen Bezugs (!) wurde die Gebirgsregion um Laguna Beach (Los Angeles) hinsichtlich tektonomorphologischer Oberflächenstrukturen untersucht (Abb. 1). Die Region umfasst die Naturschutzgebiete *Crystal Cove*, *Laguna Coast Wilderness* und *Aliso/wood Canyons*. Er gehört zu den jüngsten tektonisch aktiven Gebirgsregionen, welche infolge der Kollision von pazifischer und kalifornischer Mikroplatten küstennah aufgefaltet wurden.



Abb. 1: Lage des Untersuchungsraumes Laguna Beach an der kalifornischen Westküste (SSE des Großraums Los Angeles)

Insbesondere der *Crystal Cove State Park* zeichnet sich durch eine hohe Morphodynamik aus, welche auch direkt in hochauflösenden Satellitenbildern deutlich wird (Abb. 2). Dominierend sind südwestlich ausgerichtete subsequente Erosionrinnen, welche dem Park ihren Namen geben und canyonartig küstenparallel ausgerichtete Quertäler eine Drainagemöglichkeit in Richtung Pazifischer Ozean bieten.



Abb. 2: Südwestlich ausgerichtetes, subsequentes Drainagesystem im küstennahen *Crystal Cove State Park* (Quickbird Echtfarben-Satellitenbild)

Die Morphologie des Untersuchungsraumes ist eng verknüpft mit dem geologischen Bau des Untergrundes. Die gesamte Region wird aus tertiären (miozänen) silikoklastischen Sedimenten (Sandsteinen und Breccien der *San Onofre* und *Topanga Formation*) aufgebaut, welche bis heute einer starken Kompressionstektonik unterliegen (MILLER & TAN, 1979). Diese hat zu einer engräumigen Bruchfaltenzone geführt, deren höchste morphologische Erhebung im Antiklinalbereichen bei ca. 200 m üNN liegt. Das miozäne Festgestein wird vielerorts (insbesondere in Talmulden und Hanglagen) durch lockeren Verwitterungsschutt, aber auch von pleistozänen, marinem Terrassenmaterial überdeckt. Zusätzlich wird die Region fast täglich von kleinen Erdbeben erschüttert, welche im Zusammenhang mit der überregional wirksamen San Andreas-Verwerfung stehen. Diese Kombination aus geologisch-tektonischen Faktoren hat zur Folge, das wiederholt katastrophale Hangrutschungen und Massenbewegungen erfolg(t)en (so zum Beispiel am 2. Oktober 1978 im *Bluebird Canyon* oder am 1. Juni diese Jahres nahe der *Flamingo Rd.*, vgl. Abb. 3), welche die Oberflächenformen noch heute drastisch verändern.



Abb. 3: Jüngster Hangrutsch nahe der *Flamingo Rd.* im NW des Untersuchungsraumes vom 1. Juni 2005 (NBC, 2005).

Mögliche Ursachen für derartige Massenbewegungen sind vermutlich das Zusammenspiel aus tektonische Aktivität, hohen Niederschlagsmengen und hangparallelem Schichteinfallen der *San Onofre* und *Topanga Formation* innerhalb der Sattelflanken, welche die Morphologie im Untersuchungsraum prägen. Die Gleitflächen des jüngsten, diesjährigen Hangrutsches wird momentan in eine Festgesteinstiefe von ca. 30-40 Metern vermutet (USGS, 2005).

3 Methodischer Ansatz

3.1 Datengrundlage

Zur Ableitung der notwendigen morphologischer Parameter wurden verschiedenen DGM aus unterschiedlichen Datensätzen abgeleitet. Zum Einsatz kamen SRTM-Daten, welche mit einer 30m Gitterweite eine großflächige Interpolation von Höhendaten ermöglichen. Weiterhin wurde das amtliche DEM des USGS mit einer Gitterweite von 15m genutzt (Abb. 4) um eine mittlere Darstellungsgüte zu erreichen. Da sich im Verlauf der Untersuchungen zeigte, dass die zuvor genannten DGM nicht die gewünschte Detailgenauigkeit erbrachten, wurde mittels Blocktriangulation aus einem Stereoluftbildtripel ein neues DGM errechnet, welches ein 5m Gitterweite aufweist.

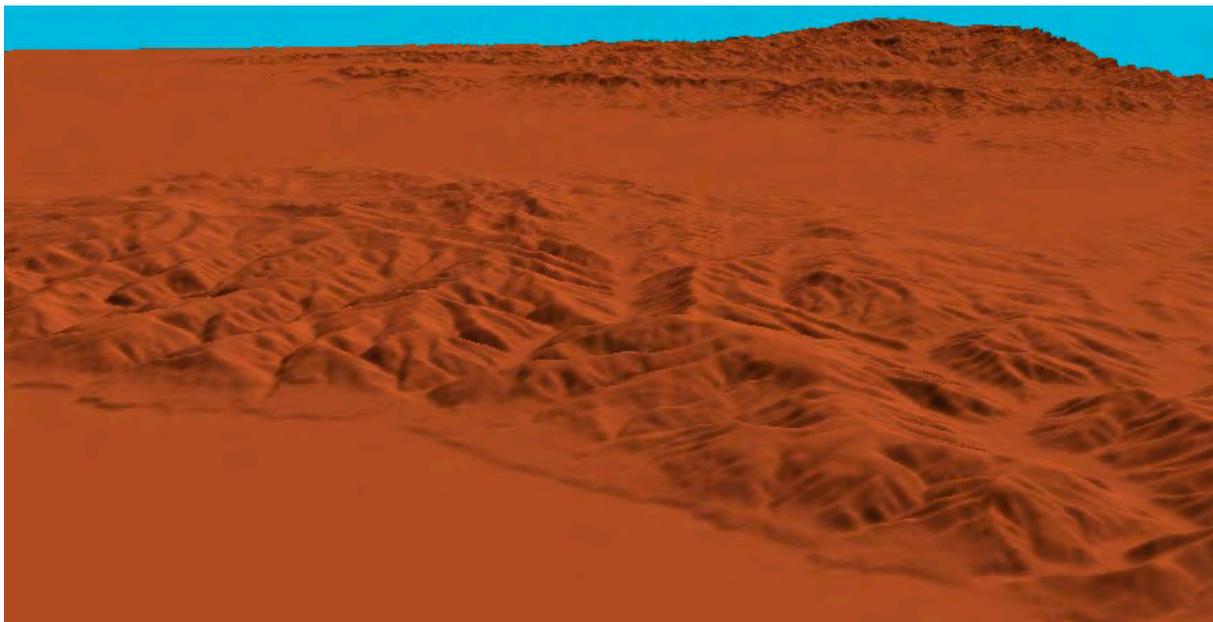


Abb. 4: DGM des USGS mit einer Gitterweite von ca. 15m für den Untersuchungsraum *Laguna Beach* (USGS, 2001).

Für die thematische Analyse der Landnutzung sowie der Oberflächengeologie wurden multispektrale ASTER-Daten und Color-Luftbilder genutzt (Abb. 5). In den Aufnahmen wird deutlich, wie schwach und diskontinuierlich die Vegetationsdecke im Untersuchungsraum entwickelt ist. Insbesondere im Luftbild lassen sich die Netze feiner Drainagesysteme, bestehend aus tiefen zentralen Erosionsrinnen sowie subsequenten Schuttfächern innerhalb der anstehenden klastischen Festgesteine oder der Lockerbedeckung gut erfassen.



Abb. 5: ASTER-IR-Satellitenbild (A, 15m Auflösung) und Luftbild (B, 2m Auflösung) für den Untersuchungsraum *Laguna Beach*.

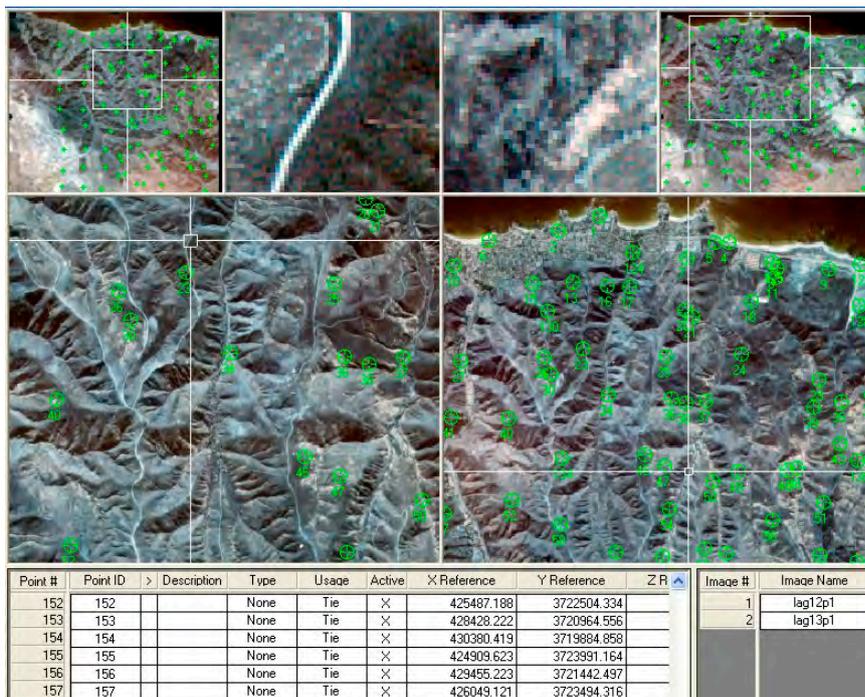


Abb. 6: Generierung von Verknüpfungspunkten im Luftbildtripel *Laguna Beach* für die notwendige Aerotriangulation unter LPS (hier: zwei Folgebilder).

3.2 Datenaufbereitung

Alle Daten wurden in digitaler Form direkt von der NASA und dem USGS bezogen. Die SRTM- und amtlichen DEM-Höhendaten lagen bereits als Rasterdatensatz vor und können direkt mit dem Programm *ERDAS Imagine 8.7* bzw. der *Leica Photogrammetry Suite LPS* (LEICA GEOSYSTEMS, 2005) bearbeitet werden. Ähnliches gilt für die ASTER- und Luftbilddaten. Letztere (Luftbildtripel) dienten als Basis einer Aerotriangulation, an dessen Ende u.a. ein DGM mit einer 5m Maschenweite über den Zwischenschritt eines Triangulated Irregular Networks (TIN) stand. Alle Daten wurden auf das örtliche Bezugssystem UTM/NAD 27/Clark 1866 georeferenziert. Für das Luftbildtripel wurden neben 250 Passpunkten zusätzlich 40 Lagepunkte des USGS verwendet und gewährleisteten so eine genaue Modelrechnung. Insgesamt wurden 160 Verknüpfungspunkte für das Luftbildtripel evaluiert (Abb. 6.) und mit amtlichen Lagepunkten verglichen.

Das aus der Triangulation zunächst abgeleitet TIN wurde anschließend in rasterbasiertes 5m-DGM umgewandelt. Durch die Berechnung des Höhenmodells war wiederum die Orthorektifizierung des Luftbildtripels möglich, welche für eine Analyse der Oberflächenmorphologie (Lageparameter!) notwendig ist (Abb. 7). Hierdurch wurde auch eine unmittelbare Verschneidung von Luftbild und multispektralen Satellitendaten ermöglicht.

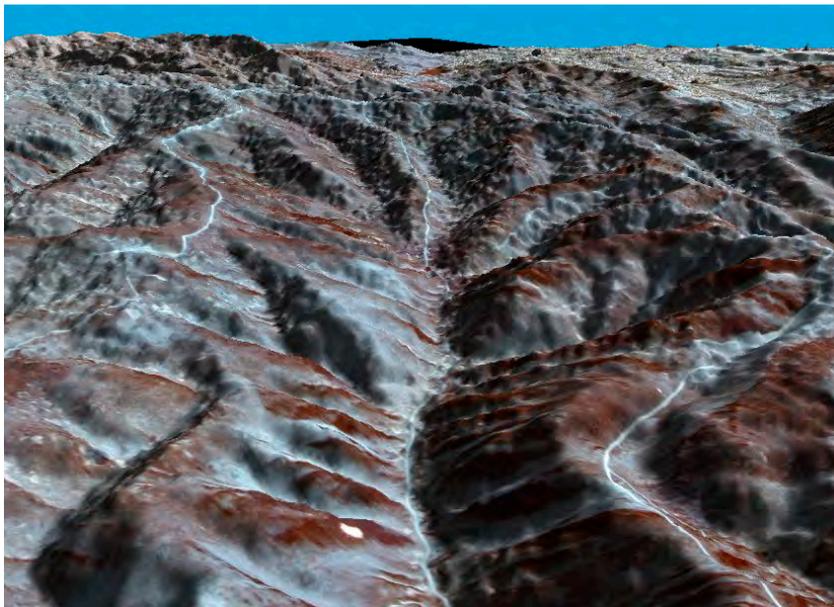


Abb. 7: Perspektivischer Blick auf der Morphologie im NW Hinterland des *Crystal Cove State Park*, erzeugt aus Ortho-DGM und Luftbildern. Gut zu erkennen ist hier die Ausprägung eines subsequenten Rinnensystems und Einzugsgebiet (Catchment).

3.3 Modellvorstellung und praktische Umsetzung

Ausgehend von der Grundhypothese, dass neben Parametern wie Klima und Niederschlagsmenge ein besonders enger Zusammenhang zwischen tektonischer Deformation (z.B. Hebungsprozessen) und morphologischen Oberflächenform in Abhängigkeit der unterlagernden Lithologie besteht, hat es in der Vergangenheit bereits viele Arbeitsansätze gegeben, welche eine aktive Deformation direkt mit der resultierenden Morphologie zur verknüpfen suchten (z.B. AHNERT, 1970; MONTGOMERY & BRANDON, 2002). Die Ableitung geomorphologischer Transportgesetze im Hinblick auf Erosion, Hangneigung und Hebungstendenzen ist sehr schwierig und komplex (DIETRICH et al. 2003). Aber es hat sich dennoch in

verschiedenen Untersuchungen gezeigt, dass die Geometrie von Erosionsrinnen in Festgesteinen als ein direktes Resultat der aktiven Hebungstendenz und Hangbildung gelten können. Die Reliefenergie kann somit auch wesentlich durch die Vernetzungsgeometrie fluvialer Erosionsrinnen und ihrer Einzugsgebiete charakterisiert werden. Es konnte bereits mehrfach gezeigt werden, dass die Untersuchung dieser Systeme und ihre Einschnittprofile eine Abschätzung der rezenten Deformation erlauben (KIRKBY & WIPPLE, 2001). Unter den vielen Modellansätzen im Hinblick auf die Balance zwischen Gesteinshebung und Rinnenentwicklung hat sich besonders die Annäherung über die sog. Flussenergie (oder auch Scherstress genannt) als aussichtsreich gezeigt (Kirby et al., 2003). Das Flussenergiemodell geht davon aus, dass die Rate der Rinnenbildung (E) eine exponentielle Funktion der Flussenergie bzw. dem basalen Scherstress (F) ist. F kann direkt über hydraulische Zusammenhänge aus der Größe des Einzugsgebietes (A) und der örtlichen Rinnenneigung (S) abgeleitet werden (Howard & Kirby, 1983).

Somit gilt $E = KA^m S^n$ (1), wobei K der Erosionskoeffizient und m sowie n empirische Konstanten aus der Betrachtung verschiedenster Landschaftsformen sind (nach SNYDER et al., 2000). Die Untersuchungen zu (1) und Ihrer möglichen Variationen unter verschiedenen geologischen, klimatischen und morphologischen Rahmenbedingungen wurden von KOBOR & ROERING (2004) eindrucksvoll aufgezeigt. Allen Arbeiten gemeinsam ist jedoch die notwendige Ermittlung von A und S als Basisvariablen. In der Vergangenheit wurden diese oftmals durch Geländebegehung, Karteninterpretation oder auch in vergleichsweise groben DGM's ermittelt. In Zusammenhang mit dem Untersuchungsraum *Laguna Beach* bietet sich die Ableitung beider Parameter aus den 30m-SRTM-Daten, dem 15m USGS-DEM sowie im Vergleich aus dem hochauflösenden 5m-Ortho-DGM an. Zusätzlich können über die Fernerkundungsdaten Rückschlüsse auf die Bodenbedeckung respektive Geologie getroffen werden. Aussagen über das Verhältnis von S/A sind auch im Hinblick auf die oben aufgeführten Massenbewegungen (Hangrutsche) interessant, da ein empirisch ermittelter Grenzwert von 0,18 in Gebirgen im aktiven tektonomorphologischen Gleichgewicht den Übergang zwischen *Schuttfließen* und *Rinnenbildung* anzeigt.

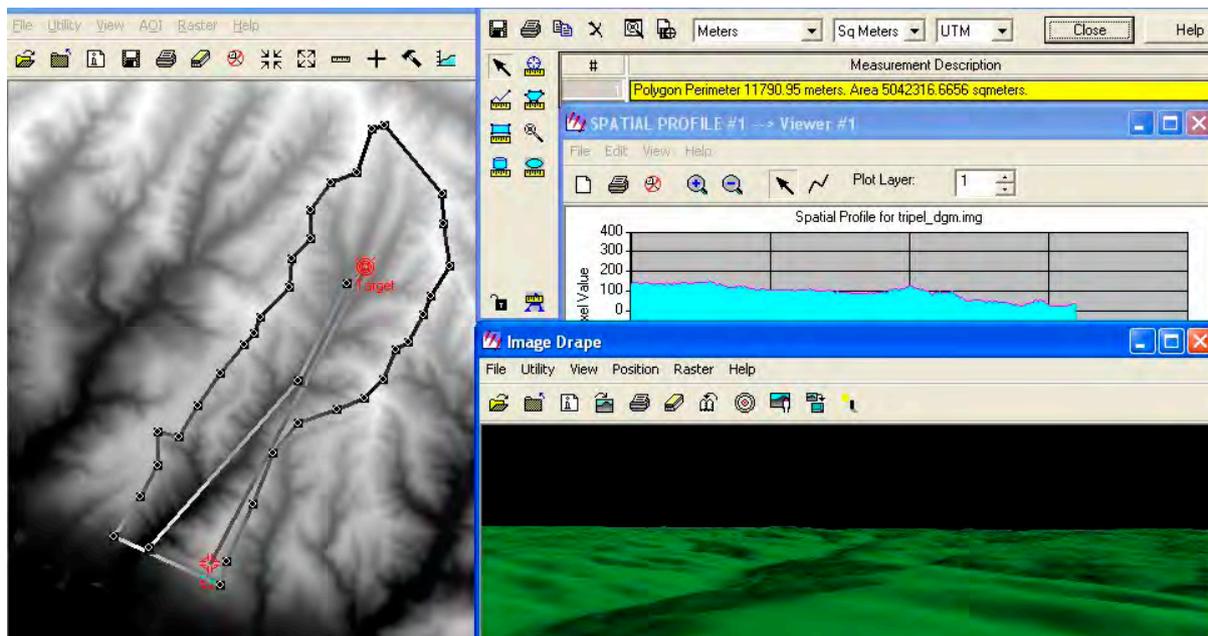


Abb. 8: Bestimmung der Einzelparameter A und S in ERDAS Imagine 8.7. Die Hangneigung lässt sich im DGM als geocodiertes Grauwertspektrum ermitteln und ableiten (hier: Ortho-DGM mit Blick in das Catchment).

3. 4 Parameterermittlung in SRTM- und Ortho-DGM

Insgesamt wurden auf Basis der Höhenmodelle 20 Testareale im Hinblick auf die Größe des Drainageeinzugsgebietes (A) und den Rinnenneigungsfaktor (S) im Gebiet *Crystal Cove State* und *Laguna Coast Wilderness Park* untersucht. Darin enthalten sind auch die Hangrutschgebiete *Bluebird Canyon* (1978) und *Flamingo RD.* (2005). Zum Einsatz kamen die in ERDAS Imagine 8.7 bzw. ArcGis 9.0 implementierten Maßwerkzeuge, wobei in ArcGIS gleich durch geeignete Attributabfragen das Verhältnis von S/A ermittelt wurde (Abb. 8).

Der Vergleich beider DGM-Typen zeigt erwartungsgemäß, dass eine Trennung zwischen Schuttflüssen und fluvialtiler Rinnenbildung in Gebieten uniformer Geologie (*San Onofre* und *Topanga Formation*) der Testgebiete in den gröberen SRTM-DGM (30m Auflösung) kaum möglich ist. Letzteres lässt sich jedoch gut in den Ortho-Höhendaten (5m Höhenauflösung) auf Basis des Luftbildtripels ermitteln. Beide bekannten Hangrutschregionen zeichnen sich hier durch S/A -Werte oberhalb 0,18 aus. Somit wäre eine weitere Prognostik hinsichtlich potenziell gefährdeter Areale mittels kritischer A/S -Werte hinsichtlich bereits bestehender bzw. geplanter Bebauung wahrscheinlich.

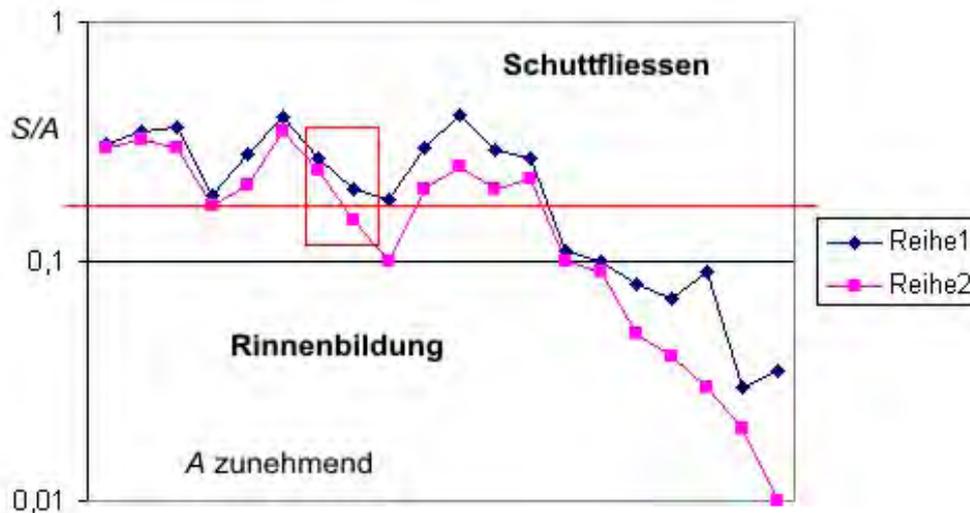


Abb. 9: S/A -Plot für 20 Testgebiete unterschiedlicher Größe im Untersuchungsraum. Rotes Rechteck bezeichnet die Testgebiete *Bluebird* und *Flamingo* (v.l.n.r.). Die rote Linie zeigt den Übergangsbereich zwischen *Schuttfließen* und *fluvialtiler Rinnenbildung* an ($S/A = 0,18$, im Gleichgewicht bei gleich bleibender Lithologie, nach KOBOR & ROERING, 2004). Die SRTM-Daten (rosa, Reihe 2) zeigen in der Regel geringere S/A -Verhältnisse aufgrund der gröberen Höhenrasterung. Das genauere Ortho-DGM (blau, Reihe 1) lässt eine feiner Abstufung zu. In beiden Fällen liegen die Hangrutschgebiete oberhalb bzw. im groben SRTM-Datensatz einmal unterhalb der kritischen Erosionslinie.

Darüber hinaus bietet diese Methode eine gute Grundlage zur Ableitung weiterer morphologischer Faktoren in einem GIS und ihre Rekombination im Sinne von STOCK & Dietrich (2003), DIETRICH et al. (2003) oder HETZEL et al. (2002). Eine realistische Abschätzung von Erosions-, Hebungs- und Deformationsraten geht jedoch über die reine morphologische Betrachtung hinaus. Vielmehr müssen auch tektonische, klimatische und geochemische Methoden ergänzend hinzugezogen werden, um die zeitabhängigen Komponenten der tektono-morphologischen Gebirgsmodellierung zu beschreiben. Im Hinblick auf die multispektrale Erfassung der Oberflächenlithologie in Kombination mit ihrer morphologischen Textur bietet der objektorientierte Klassifikationsansatz eine weitere Möglichkeit zur raschen, teilautomatisierten Abschätzung von Erosionsparametern. Diesem multi-

varianten, hierarchischen Klassifikationsansatz soll in zukünftigen Arbeiten eine wesentliche Rolle zukommen (Abb. 10).

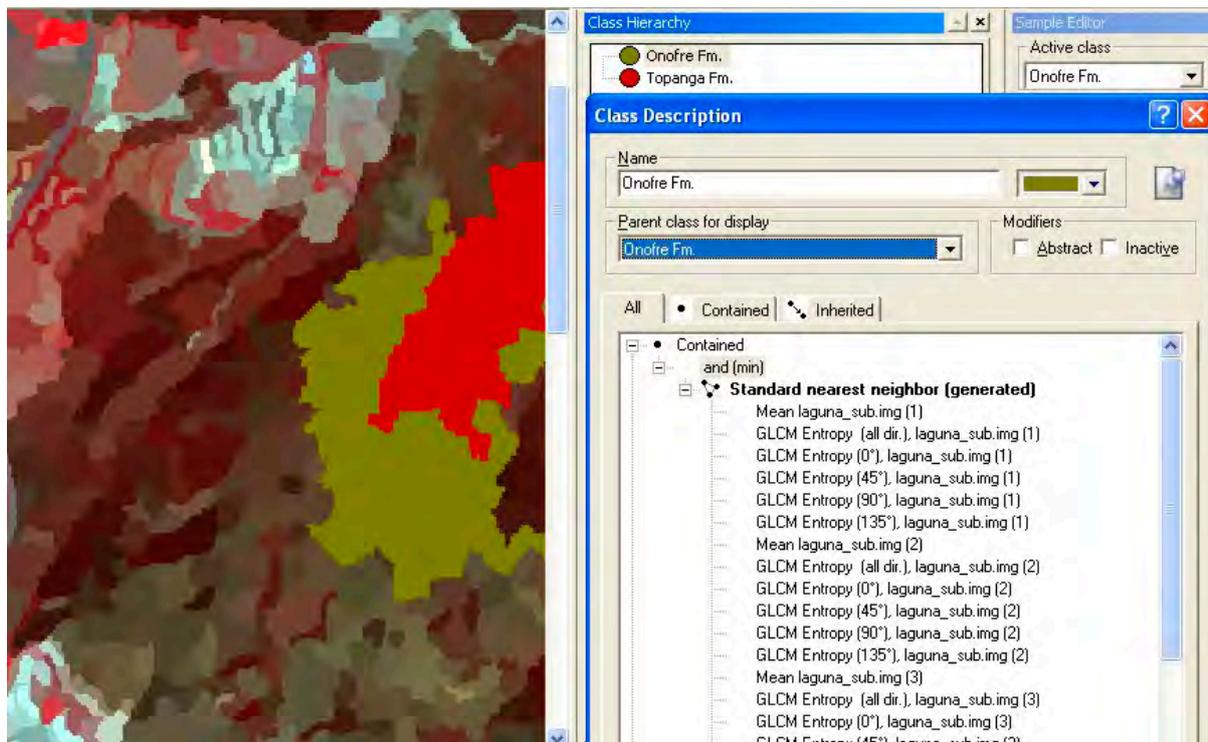


Abb. 10: Objektorientierter Klassifikationsansatz unter eCognition zur Ermittlung der Oberflächentextur und Lithologie im Untersuchungsraum.

4 Schlussfolgerungen

Die vorangegangenen Untersuchungen haben gezeigt, dass aus digitalen Geländemodellen unterschiedlicher Herkunft wichtige geomorphologische Grundparameter abgeleitet werden können. Die weltweit zur Verfügung stehenden SRTM-Daten erlauben jedoch nur einen beschränkten Rückschluss auf die tektonomorphologischen Gegebenheiten eines Gebietes. Ihre Nutzung ist also stark maßstabsabhängig. Aufgrund des groben Höhenrasters (i.d.R. 30m) kommt es bei SRTM-Daten häufig zu morphologischen Unschärfen, die erst mit dem Einsatz hoch auflösender DGM (z.B. Ortho-DGM aus Luftbildern) ausgeglichen werden können. Auch das amtliche USGS-DGM mit 15m Auflösung zeigt ähnliche Einschränkungen. Im vorgestellten Beispiel des Untersuchungsraumes *Laguna Beach* konnte aber gezeigt werden, dass kritische Areale mit Tendenzen zur Hangrutschbildung in höher auflösenden DGM's, wie einem Ortho-DGM auf Luftbildbasis (5m Auflösung) in guter Näherung durch die Ableitung des Verhältnisses von durchschnittlicher Rinnenneigung zur Einzugsfläche (S/A) nach KOBOR & ROERING (2004) geomorphologisch signifikant erscheinen. Grundvoraussetzung ist ein gleich bleibender lithologischer sowie tektonischer Bau des Untergrundes. Der Einfluss von Klima und Hebungsrates etc. auf die Oberflächenformen eines Gebirges wird alleine über die Betrachtung der Morphologie kaum zu beschreiben sein. Zukünftig wird also vielmehr die Verknüpfung von Geländeergebnissen, Modellparametern und Labormethoden (z.B. geochemische Altersbestimmungen mittels radiogener Nuklide) innerhalb eines GIS erforderlich sein.

5 Literatur

- AHNERT, F., 1970: Functional relationships between denudation relief and uplift in large, mid-latitude drainage basins. – *American Journal of Science* 268 (3), S. 243-263.
- DIETRICH, W.E., BELLUGI, D., SKLAR, L.S., STOCK, J.D., HEIMSATH, A.M. & ROERING, J.J., 2003: Geomorphic transport laws for predicting landscape forms and dynamics. – *American Geophysical Union Tectonophysics*, S. 103-132.
- GUPTA, R., P., 2003: *Remote Sensing Geology*. – 2. Aufl., 655 S., Springer-Verlag, Berlin.
- HETZEL, R., NIEDERMANN, S., TAO, M., KUBIK, P.W., IVY-OCHS, S., GAO, B. & STRECKER, M.R., 2002: Low slip rates and long-term preservation of geomorphic features in Central Asia. – *Nature* 417, S. 428-432, Nature Pub. Group.
- HOWARD, A.D. & KERBY, G., 1983: Channel changes in badlands. – *Geological Society of America Bulletin* 94, S. 739-752.
- KIRBY, E., WHIPPLE, K.X., TANG, W. & CHEN, Z., 2003: Distribution of active rock uplift along the eastern margin of the Tibetan Plateau: Inferences from bedrock channel longitudinal profiles. – *Journal of Geophysical Research* (108), B4.
- KOBOR, J.S. & ROERING, J.J., 2004: Systematic variation of bedrock channel gradients in Central Coast Range: implications for rock uplift and shallow landsliding. – *Geomorphology* 62, S. 239-256, Elsevier.
- LEICA GEOSYSTEMS, 2005: *ERDAS Imagine 8.7 Handbook*.
- MONTGOMERY, D.R. & BRANDON, M.T., 2002: Topographic controls on erosion rates in tectonically active mountain ranges. – *Earth and Planetary Science Letters* 201 (3-4), S. 481-489.
- MILLER, V.R. & TAN, S.S., 1979: Bluebird Canyon Landslide of October 2. 1978, Laguna Beach California. – *California Geology*, S. 5-9, CGS.
- NASA 2004: *Landsat Science Data Users Handbook*. - Landsat Project Science Office, NASA, (http://ftpwww.gsfc.nasa.gov/IAS/handbook/handbook_toc.html).
- NBC 2005: *Recent Online News*. – <http://www.nbc.com>
- SNYDER, N.P., WHIPPLE, K.X., TUCKER, G.E. & MERRITS, D.J., 2000: Landscape response to tectonic forcing: Digital elevation model analysis of stream profiles in the Mendocino triple junction region, northern California. – *Geological Society of America Bulletin* 112 (8), S. 1250-1263.
- STOCK, J. & DIETRICH, W.E.; 2003: Valley incision by debris flows: Evidence of a topographic signature. – *Water Resources Research* 39 (4), S. 1-25, Am. Geophys. Union.
- USGS 2005: *Recent Online News*. – <http://www.usgs.gov>

Fernerkundungs- und GIS-Applikationen zur Datenpräsentation und -analyse im SFB 267 ‚Deformationsprozesse in den Anden‘

KERSTIN MUNIER, HEINZ BURGER & JÖRN LEVENHAGEN¹

Zusammenfassung: Im Sonderforschungsbereich 267 ‚Deformationsprozesse in den Anden‘ beschäftigten sich seit 1993 ca. 120 Wissenschaftler von 3 Universitäten und dem GFZ Potsdam mit den gebirgsbildenden Prozessen entlang der Subduktionszone vor der chilenischen Küste durch geologische, seismische, gravimetrische, geochemische und darüber hinausgehende Methoden. Fernerkundungsdaten wurden von Beginn an als unentbehrliches Hilfsmittel für die Geländearbeit und für geologische Analysen genutzt. Topographische Grundlagen, existierende geologische Karten und weitere Informationen wurden in Geoinformationssystemen zusammengestellt und als Arbeitsgrundlage zur Verfügung gestellt. Durch den langen Arbeitszeitraum haben sich die Möglichkeiten und Anforderungen verändert. Viele Informationen werden nun WEB-basiert zur Verfügung gestellt. Luft- und Satellitenbildanalysen wurden zur Untersuchung der Kinematik von Überschiebungsprozessen genutzt, Informationen aus Fernerkundungsdaten wurden für die Schaffung geologischer 3D Modelle eingesetzt. Ergebnisse werden für eine Abschlussdokumentation aufbereitet, die einen GIS-Viewer, ergänzt durch Geländefotos, virtuelle Überflüge und kleine Animationen enthält und auf einer interaktiven DVD präsentiert wird.

1 Einführung und WEB-Aktivitäten

Der Sonderforschungsbereich 267 ‚Deformationsprozesse in den Anden‘ nahm 1993 seine Tätigkeit auf. Drei Universitäten des Berliner Raumes (Freie Universität Berlin - Sprecheruniversität, Technische Universität Berlin, Universität Potsdam) und das Geoforschungszentrum Potsdam beteiligten sich an diesem Projekt. Das großräumige Untersuchungsgebiet der zentralen Anden zwischen 20°S und 25°S sollte mit geophysikalischen und geologischen Methoden untersucht werden, um einen Beitrag zur Analyse der Steuerfaktoren der Deformation in dieser Region zu leisten. Ab 1998 kamen Untersuchungsgebiete in den südlichen Anden zwischen 36°S und 40°S hinzu, wo die Parameter der Subduktion sich von denen in den zentralen Anden unterscheiden.

Von Beginn an wurden Fernerkundungsdaten genutzt und Daten in GIS zusammengeführt. Zunächst spielte dabei die Durchführung der umfangreichen Geländearbeiten die zentrale Rolle, da die Satellitendaten eine wertvolle Ergänzung der topographischen Karten darstellten, die aufgrund der geringen Besiedlung häufig nur wenig Orientierungspunkte boten. Diese Geländearbeiten wurden durch das Integrieren der Messstationen oder lokaler Kartierungen in GIS dokumentiert.

¹Dr. Kerstin Munier, Dr. Heinz Burger, Dipl.-Geologe Jörn Levenhagen, Institut für Geologische Wissenschaften, Fachrichtung Geoinformatik, Freie Universität Berlin, Malteserstr. 74-100, 12249 Berlin, e-mail: kmunier@zedat.fu-berlin.de, hburger@zedat.fu-berlin.de, leven@zedat.fu-berlin.de

Darüber hinaus wurde bereits in einem frühen Stadium des SFB das Internet genutzt, um die deutschen Wissenschaftler und zahlreiche Kooperationspartner in Südamerika miteinander zu vernetzen und mit aktuellen Informationen zu versorgen. Das Web hat damit sowohl Intranet-funktionen (Administration, Diskussionsgruppen, Vortragsankündigungen) als auch Internet-funktionen, um aktuelle Forschungsergebnisse, Daten, Publikationen, Karten und Kontaktad-ressen der scientific community zur Verfügung zu stellen.

Die Webpräsentation des SFB267 begann mit der Analyse der administrativen Struktur des SFB und der Auflistung aller Forschungsprojekte. Der nächste Schritt war die Entwicklung einer geeigneten Web-Darstellung dieser Struktur einschließlich der üblichen Informationen (Mitglieder der Forschergruppen, Adressen etc.). Das Ergebnis war eine Baumstruktur, wie sie in vereinfachter Form in Abbildung 1 dargestellt ist. Dieser Teil der Seite bietet On-line Formulare für Geländearbeiten, Diskussionsforen und Hinweise auf neue Publikation an. Die logistische Vorbereitung von Geländekampagnen wird durch einen Kartenkatalog und durch speziell bearbeitete Satellitenaufnahmen der Arbeitsgebiete unterstützt.

Die Website des SFB basiert auf dem Microsoft Information Server, der einen Indexserver zur Textsuche anbietet sowie aktive Serverseiten (ASP) und Zugang zu verschiedenen Da-tenbanken über ODBC. Die Suche nach bestimmten Daten, Personen, Publikationen etc. wird durch den Suchindex unterstützt. Der Aufbau dieser Seiten erfordert zwar einen hohen Arbeitsaufwand, aber die laufende Betreuung wird einfacher (Abbildung 2). Statische „cli-ckable maps“ mit den Mittelpunkten der verfügbaren Landsat-Szenen führen zu Quick-looks, die die Identifizierung der Satellitenszenen erleichtern, die speziell aufbereitet werden sollen. Die Einbindung der interaktiven Karten erfolgt über einen Mapserver (Autodesk MapGui-de[®]), der in gewissem Umfang räumliche Abfragen ermöglicht. MapGuide wurde gewählt, um die umfangreichen GIS-Datenbestände auf einfache Art und Weise einer großen Gruppe von Nutzern in Form dynamischer Karten zur Verfügung (bzw. zur Ansicht) zu stellen. Um diese Karten abzurufen muss für den jeweiligen Browser ein (unentgeltliches) PlugIn oder ActiveX- Element installiert werden. Der MapGuide Viewer ermöglicht die Navigation (ver-größern, verkleinern, verschieben) sowie raum- und themenbezogene Abfragen. Analytische GIS-Funktionen (Messungen, Buffering, Routing) sind teilweise implementiert bzw. in der Entwicklung.

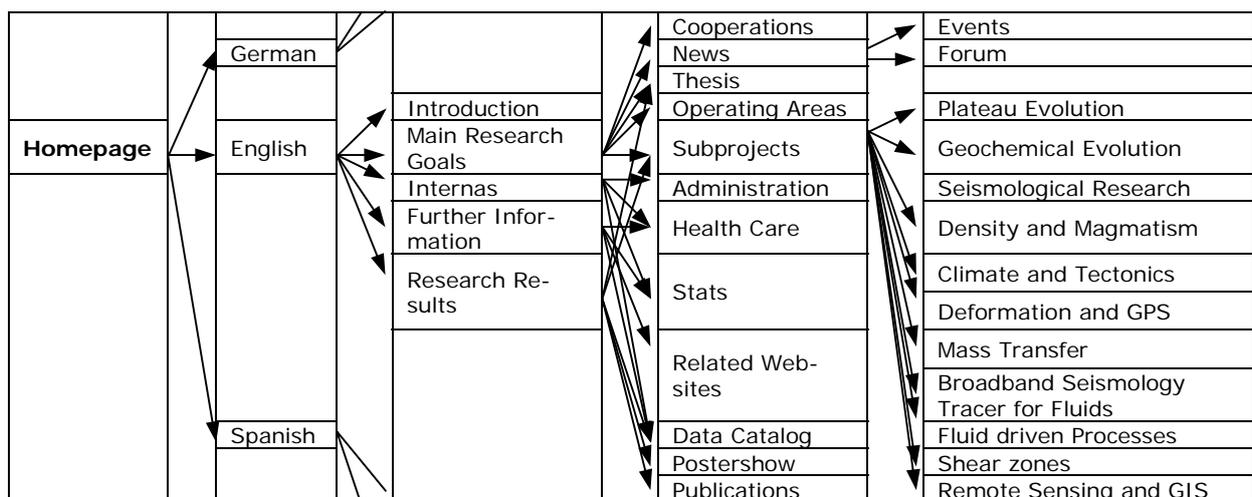


Abb. 1: Vereinfachte Struktur der Website des SFB 267

Mit der Website verlinkt ist der Datenkatalog, der umfangreiche topographische, geochemische, geologische und geophysikalische Daten umfasst. Metainformation enthält Angaben

über die Datenquelle, Autor, Datentyp, Format, Ort und Zeit der Datenerfassung, vorläufigen Interpretationen sowie Kontaktadressen (OTT et al. 2002). Die Daten sind soweit möglich im ASCII-Format und als Arc/Info-Dateien abrufbar. Ferner werden Links auf Kooperationspartner und andere Forschungseinrichtungen gegeben, die sich mit den zentralen Anden beschäftigen.

Im Jahr 2004 hatten wir ca. 25.000 Besucher der Website, die nicht von der FU-Berlin-Domäne zugegriffen; etwa die Hälfte davon außerhalb von der Top-Level Domäne „DE“.

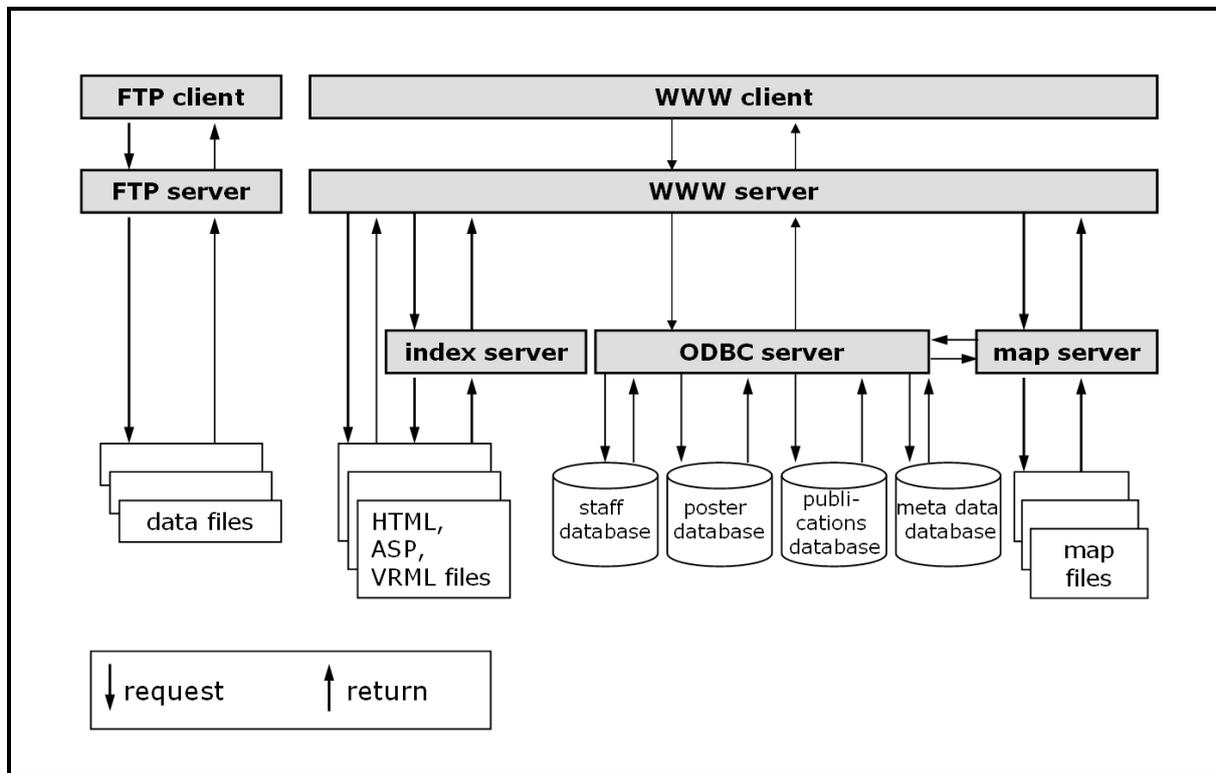


Abb. 2: Client-Server Struktur des Webservers des SFB 267

2 Einsatz von Fernerkundungsdaten

Fernerkundungsdaten und digitale Bildverarbeitung sind bei Forschungsprojekten mit regionalem Bezug nicht mehr wegzudenken. Für die beiden Arbeitsgebiete in den Zentral-Anden (zwischen 18°S und 26°30'S) und den Süd-Anden (zwischen 37°30'S und 43°30'S) wurden schon ab den frühen 90er Jahren Satellitenmosaiken mit einer Auflösung von 50m x 50m hergestellt, die im Norden mehr als 30 Landsat-Szenen umfassen und im Süden, bei 25m x 25m Auflösung (2. Hälfte der 90er Jahre bei größeren Festplatten) etwa 20 Landsat-Szenen. Für diese Mosaiken wurden die Spektralkanäle 7, 4, 1 (SWIR, NIR, VIS BLUE) in RGB kodiert und die Szenen farblich angepasst, sodass ein nahezu schnittfreies Bild entsteht. Diese Mosaiken werden als Basis-Layer in vielen GIS-Anwendungen verwendet und dabei gegebenenfalls in reduzierter Auflösung benutzt. Abbildung 3 zeigt einen Ausschnitt des Satellitenmosaiks der zentralen Anden mit einer Überlagerung der Vulkane (klassifiziert nach dem Chemismus) und den Lagerstätten (klassifiziert nach dem abgebauten Hauptelement). Für einen solchen Basis-Layer könnte man heute auch die Landsat-Mosaiken (MrSID-Datenformat), die vom NASA Earth Science Enterprise Scientific Data Purchase Program angeboten werden, nutzen, doch für den SFB waren über die Mosaiken hinaus häufig spezielle Bearbeitungen erforderlich.

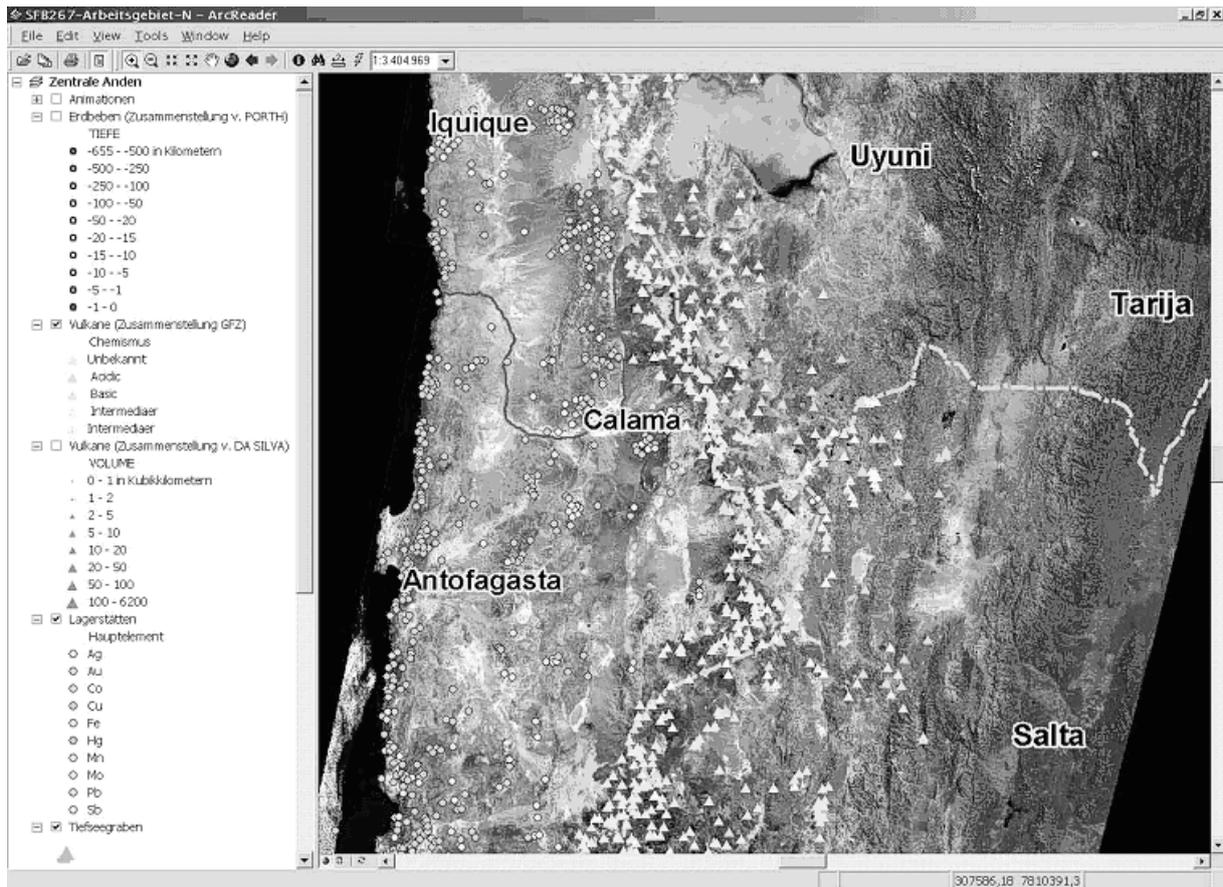


Abb. 3: Landsat-Mosaik als Basislayer für GIS-Visualisierungen: Überlagerung mit Vulkandaten (Dreiecke) und Lagerstätten (Kreise)

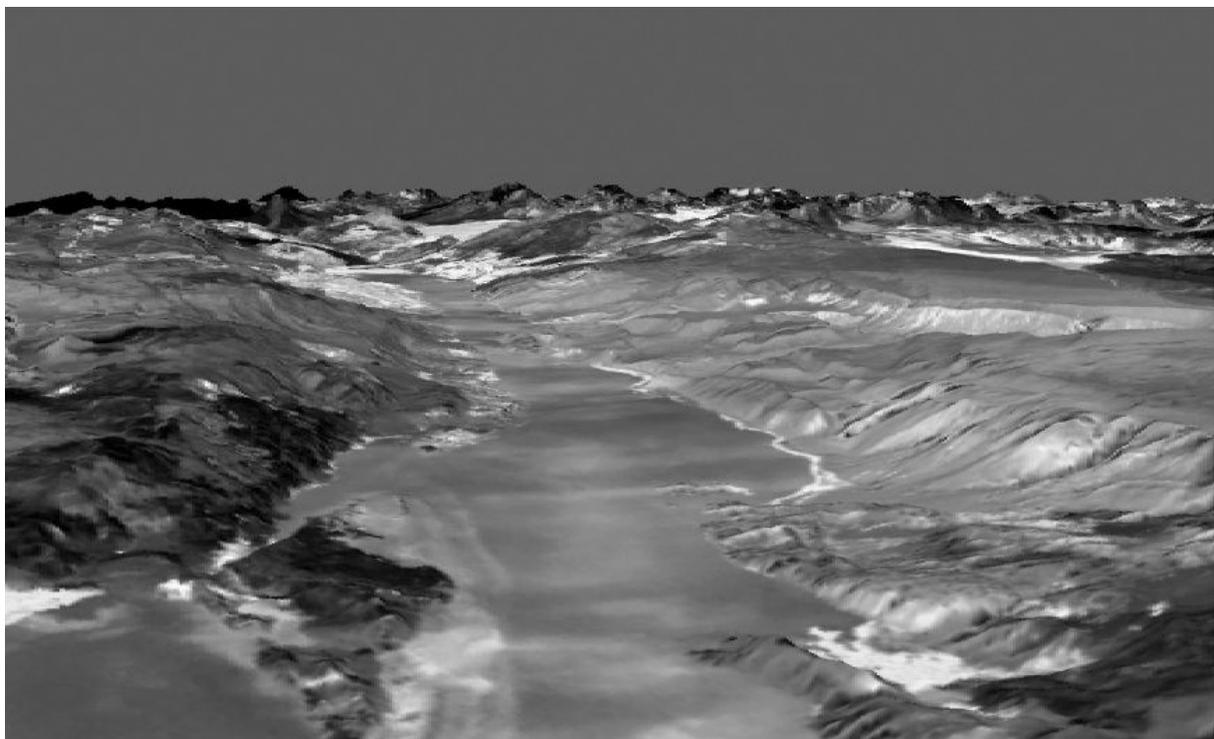


Abb. 4: Perspektivische Darstellung des Salar de Antofalla auf der Grundlage von SRTM-Geländeeinformationen und Landsat-Daten

Eine wachsende Bedeutung als Informationslayer gewannen digitale Höhendaten. Während in der ersten Arbeitsphase des SFB267 diese Daten mühsam aus SPOT Aufnahmen abgeleitet werden mussten, konnte in der letzten Arbeitsphase des SFB267 in verstärktem Maße auf die GTOPO 30 bzw. auf SRTM-Daten mit einer Auflösung von 90m x 90m zugegriffen werden (s. nächstes Kapitel). Die gemeinsame Auswertung von Satellitenbild, digitalem Höhenmodell und punktuellen Geländemessungen ermöglicht es, die Lücke zwischen der Geologie an der Erdoberfläche und dem oberflächennahen Untergrund zu schließen. Dies ist nur in Gebieten mit hohem Relief möglich, wo die Orientierung von geometrischen Objekten (Störungsfläche, Faltenachsen etc.) im Raum mit Hilfe von Referenzpunkten auf dem Satellitenbild und den entsprechenden Punkten im digitalen Höhenmodell abgeleitet werden kann (GÖNI 2003). Um die Informationen über die Lagerungsverhältnisse zu verdichten, wurden für diese Fragestellungen zusätzlich analoge Luftbilder ausgewertet und zu Orthophotos verarbeitet und analysiert.

3 Digitale geologische Karten und GIS

Das geologische Wissen über die zentralen Anden wurde von REUTTER et al. (1994) in der digitalen „Geologischen Karte der zentralen Anden 1: 1.000.000“ zusammengefasst. Diese Kompilation basierte auf regionalen geologischen Karten und der Auswertung von speziell aufbereiteten Satellitenaufnahmen, die eine verbesserte Klassifizierung der Gesteinseinheiten ermöglichen. Um diese Basisinformation mit den geophysikalischen und geochemischen Daten in einem GIS überlagern zu können, wurde eine digitale Fassung dieser Karte hergestellt. Die Überlagerung dieser Karte mit den georeferenzierten Satellitenaufnahmen offenbarte auch die geometrischen Unstimmigkeiten, die sich bei der Kompilation der verschiedenen geologischen und topographischen Regionalkarten ergeben hatten. Diese digitale Karte konnte durch interaktive lokale geometrische Korrekturen verbessert und kann auch weiterhin durch Detailinterpretationen überarbeitet werden.

Die Voraussetzung für die Diskussion geowissenschaftlicher Ergebnisse ist die Visualisierung von topographischen und geographischen Informationen in Zusammenhang mit den geologischen und geophysikalischen Daten. Auf einer gemeinsamen digitalen Kartengrundlage kann die heutige Morphologie des Arbeitsgebietes mit den morpho-tektonischen Strukturen und den geophysikalischen Daten überlagert und interpretiert werden. Auch zeitlich ablaufende Prozesse – wie z. B. die Migration des magmatischen Bogens von West nach Ost – werden durch die Synopsis mit anderen geowissenschaftlichen Daten anschaulicher und erweitern die Interpretationsmöglichkeit. Geophysikalische Daten werden zwar meist an der Erdoberfläche gemessen – ihre Quelle muss aber im 3D-Raum (Hypozentren von Erdbeben, Reflektoren von seismischen Wellen) lokalisiert werden. Die 3D-Visualisierung spielt deshalb bei der Darstellung und Diskussion der geometrischen Modelle der Krustenstruktur der Erde oder der tiefenabhängigen Zuordnung von physikalischen Gesteinsparametern (Schwere, Dichte) eine entscheidende Rolle. Es war deshalb ein Ziel der GIS-Arbeitsgruppe im SFB267, die unterschiedlichen 3D-Daten über ein interoperables GIS (IOGIS) zu integrieren und für eine verbesserte Interpretation zugänglich zu machen. Ein erster Schritt zur Entwicklung eines IOGIS war die Definition von geometrischen Objekten, die zwischen den 3D-Modellierprogrammen GOCAD und IGMAS ausgetauscht werden können (BREUNIG, 2000, GÖTZE & SCHMIDT, 2002). Inzwischen können auch komplexe 3D-Modelle, die mit einem geometrischen Modellierprogramm entwickelt wurden, in das geophysikalische Modellierprogramm IGMAS überführt und ausgewertet werden.

Aber auch die zeitabhängige 2D Darstellung verschiedener Daten wie die Vulkane oder die geologischen Formationen liefert bereits Erkenntnisse über Aktivitätszentren in den verschiedenen Phasen der Andenentwicklung.

4 Erstellung einer Abschlusspräsentation

Die Vorzüge eines gemeinsamen Datenmanagements bei Großforschungsprojekten zeigen sich bei der Erstellung von Berichten und Gemeinschaftspublikationen. Der Aufbau eines GIS erfordert es, sich auf ein Koordinatensystem zu einigen, sodass die Ergebnisse der verschiedenen Arbeitsgruppen ohne große Probleme in diesem einheitlichen Bezugssystem dargestellt werden können. Die gemeinsame Nutzung der digitalen Karten und Satellitenmosaiks bewirkt auch ein weitgehend ähnliches Layout in den Berichten, was den Vergleich von Ergebnissen und alternativen Interpretationen dem Leser (und Gutachter!) erleichtert.

Die Zusammenstellung der Publikationen, der Dissertationen, Karten und anderer Materialien kann von der Webseite ohne großen Aufwand digital oder als Druck in Berichte integriert werden. Für den SFB267 ist eine Abschlusspublikation in Buchform in Vorbereitung, die außer den Artikeln der einzelnen Teilprojekte Zusatzinformation auf DVD enthält:

- GIS-Projekt
- Daten (Lage der Messprofile und -stationen, Gesteinsdatierungen geochemische Daten etc.)
- Animationen (Visualisierung der Ergebnisse numerischer Prozesssimulationen; kleine Filme von Simulationen im Analogmodell; simulierte Überflüge)
- 3D-Modelle (als VRML-Dateien)
- Geländephotos.

Es ist nicht möglich und sinnvoll, alle in den Messkampagnen gewonnenen Daten in dieser Form zu veröffentlichen.

Vielmehr bietet diese DVD die einzigartige Möglichkeit wichtige Daten und Ergebnisse aus unterschiedlichsten geowissenschaftlichen Fachrichtungen eines zwölfjährigen Forschungsprojekts auf einem einzigen austauschfähigen Medium zu vereinen.

Die einbezogenen Daten sollen zum einen, anderen Wissenschaftlern die in den zentralen Anden tätig sind oder sein werden, Einblick in bereits vorhandene Arbeiten und Datensätze geben, als auch durch die angegebenen Adressen die Kontaktaufnahme zu den ehemaligen Mitgliedern des SFB 267 vereinfachen – um möglicherweise umfangreichere Daten von den Besitzern zu erhalten.

Ferner kann der Inhalt der DVD, insbesondere die umfangreiche GIS-Datenbank, als eine wertvolle Bereicherung der Lehre an Universitäten oder anderen Lehrinrichtungen verwendet werden. Daher ist die Gesamtstruktur der DVD so angelegt, dass sie nicht als reine Datensammlung fungiert, sondern u.a. durch virtuelle Überflüge und Geländephographien Einblicke in die naturräumlichen Gegebenheiten und in die Tätigkeit der beteiligten Geowissenschaftler erlaubt.

Es stellt sich ferner das Problem, in welcher Form die Daten den unterschiedlichen Nutzern zur Verfügung gestellt werden, wofür eine Kombination abgestufter Funktionalität und Anforderungen an die Ausstattung des Nutzers umgesetzt werden soll:

- Abspeicherung vollständiger GIS-Projekte (als Arc/GIS-Projekt)
- Demonstrationsprojekt (mit entsprechendem Viewer)
- Interaktive Karten mit dynamischer Datenbankabfrage

Die erste Alternative stellt dem Nutzer die Daten in Form von GIS-Layern unmittelbar zu eigenen weiterführenden Arbeiten zur Verfügung; die zweite Alternative kann sowohl dem Fachmann als auch interessierten Laien Forschungsergebnisse präsentieren. Mit dem dritten Teilprojekt soll versucht werden, die Vorteile und technischen Möglichkeiten von Webservern auf CD/DVD zu emulieren. Da die Programme auf dieselben Daten zugreifen, hält sich der Mehrbedarf an Speicher in Grenzen.

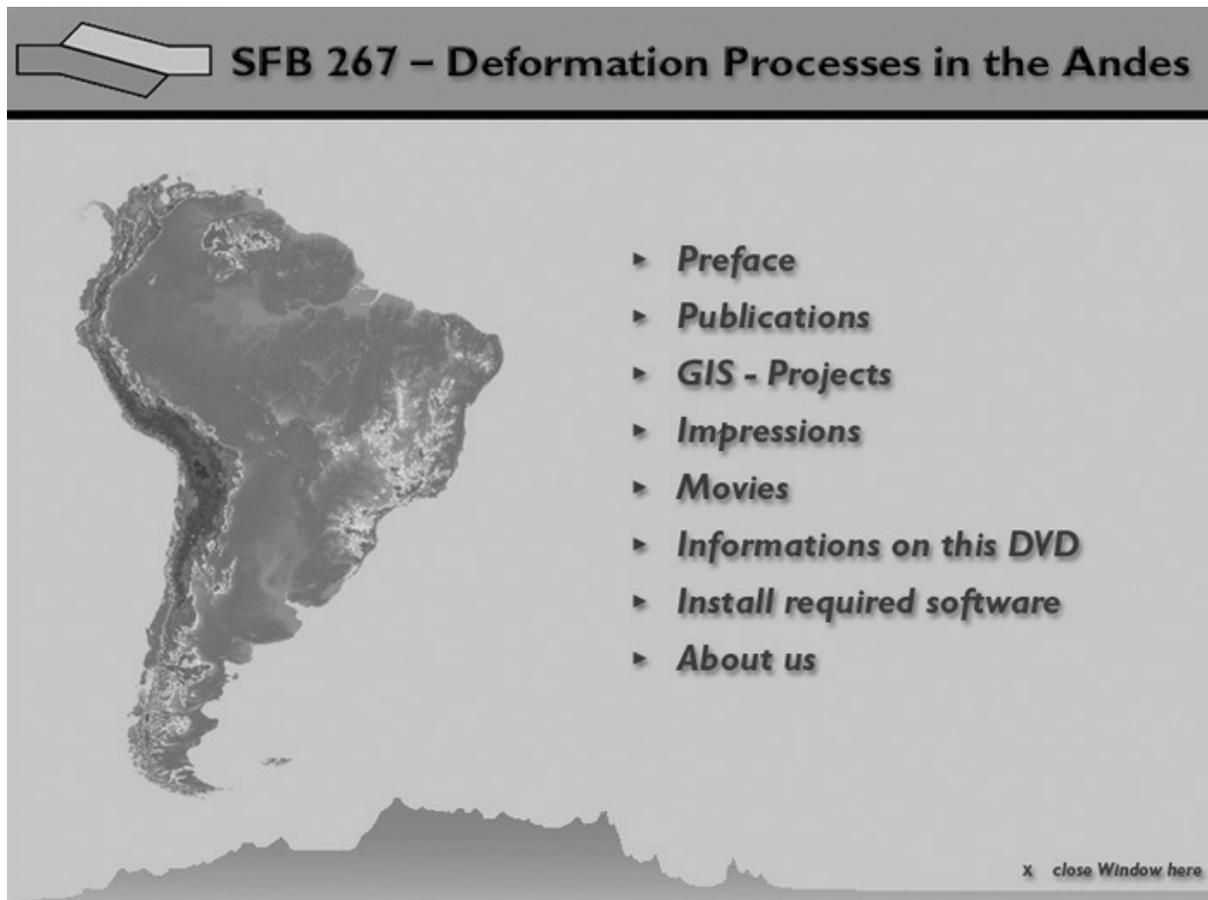


Abb. 5: Startseite der in Vorbereitung befindlichen Abschluss-DVD des SFB 267

5 Probleme und Ausblick

Während 2D- (oder sog. 2½D) Daten inzwischen über geeignete Konvertierungsroutinen zwischen verschiedenen Geoinformationssystemen ausgetauscht werden können, ist man bei 3D-Modellen noch weit davon entfernt. Dabei ist die Geometrie der Modelle noch relativ einfach über das weit verbreitete DXF-Format austauschbar, aber die Topologie und die Datenstrukturen für die Eigenschaften („property model“) sind bei den gängigen geologischen Modellierungsprogrammen (z.B. Gocad, Lynx, DataMine, Surpac) so unterschiedlich, dass selbst im Fall des erfolgreichen Imports eines Modells eine Nachbearbeitung (z.B. der Topologie) notwendig wird.

Datenmanagement und der Einsatz von Geoinformationssystemen bei interdisziplinären geowissenschaftlichen Forschungsprojekten werden bei der Bewilligung und Finanzierung dieser Projekte immer öfter von den Geldgebern und Gutachtern gefordert.

Der Entwurf von Datenbanken, die Einrichtung von Geoinformationssystemen und die Betreuung von Web-Seiten sind sehr arbeits- und zeitaufwendig. Den komplexen Strukturen

und Vernetzungen der wissenschaftlichen Institute und Projekte stehen die mächtigen Softwarepakete gegenüber, deren Einsatz für die o. a. Aufgaben nicht von einem Mitarbeiter nebenher (also z.B. neben seiner Dissertation) wahrgenommen werden können. Die Notwendigkeit, die gewonnenen Daten auch nach Abschluss der Projekte der „scientific community“ und der Öffentlichkeit (die die Forschung über Steuergelder finanziert) zugänglich zu machen, erfordert professionelles Management, das auch seinen Preis kostet (z.B. eine Mitarbeiterstelle).

Es muss innerhalb der Forschergruppe ein Konsens bestehen, dass ein zentrales Datenmanagement notwendig ist – nur dann werden auch Daten geliefert. Hier fällt der Leitung des Forschungsprojekts die wichtige Aufgabe zu, durch Hinweis auf die Pflicht zur Publikation und Öffentlichkeitsarbeit immer wieder (mehr oder weniger) sanften Druck auf die Mitglieder der Forschergruppe auszuüben.

6 Danksagung

Die Verfasser bedanken sich bei den vielen hier nicht namentlich aufgeführten Mitgliedern des SFB267, die Daten und Modelle und Kommentare für die vorliegende Publikation geliefert haben. Darüber hinaus gilt der Dank der DFG für die Förderung des SFB.

7 Literaturverzeichnis

- BREUNIG, M., CREMERS, A.B., GÖTZE, H.-J., SEIDEMANN, R., SCHMIDT, S., SHUMILOV, S. & SIEHL A., (2000): Geologic mapping based on 3D models using an interoperable GIS. – GIS-Journal for Spatial Information and Decision Making, **13**(2): pp 12 B 18.
- GÖTZE, H.-J. & SCHMIDT, S., (2003): Geophysical 3D-Modelling Using GIS-Functions. – Proc. Annual Conf. IAMG, Berlin, 2002: pp. 14—28.
- GÖNI, P., (2003): Ein geologisches Modell für den südlichen Altiplano bei 21° S (Bolivien), erstellt mit Fernerkundungs- und GIS-Methoden. FU Berlin Digitale Dissertation, <http://www.diss.fu-berlin.de/2003/162/>
- OTT, N., GÖTZE, H.-J., SCHMIDT, S., BURGER, H. & ALTEN M., (2002): Meta Geoinformation System Facilitates Use of Complex Data for Study of Central Andes. – EOS, **83**(34): http://www.agu.org/eos_elec/020081e.html.
- REUTTER, K.-J., DÖBEL, R., BOGDANIC, T. & KLEY, J., (1994): Geological Map of the Central Andes between 20°S and 26°S. – In: Reutter, Scheuber, Wigger (eds.): Tectonics of the Southern Central Andes: 121—139; Springer Verlag, Berlin.
- REUTTER K.H. & GÖTZE H.-J., (1994): Comments on the geological and geophysical maps. – In: Reutter, Scheuber, Wigger (Eds.): Tectonics of the Southern Central Andes: pp. 329—333, Springer Verlag Heidelberg.

Remote surface mapping of synrift deposits in North Sardinia, Italy

Paolo Ballato¹, Gabriela Marcano¹, Hans-Ulrich Wetzel²,
Maria Mutti¹, Merle Hagen³, Christian Betzler³

Abstract: The goal of this study is to recognize the geometrical relationships of a complex depositional system involving carbonate, clastic and volcanic rocks outcropping in northern Sardinia. These rocks were deposited in association with a multiphase rifting process which caused the Western Mediterranean back arc opening during Upper Oligocene-Lower Miocene time. This work has been performed draping Landsat-7 ETM (Enhanced Thematic Mapper plus) and ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) data over DEM (Digital Elevation Mode) within a geographic information system (GIS) database using the program ArcGIS. Because of the presence of strong lateral heterogeneity in geologic bodies and in some case extensive vegetation covers, the use of band ratio and principal component (PC) transformation permitted to emphasize variations in rocks spectral reflectance. This helped to recognize several classes broadly corresponding to the lithological units. This work suggests that depositional units and depocentre geometry are strongly controlled by the interaction of paleo-topography and faults activity.

1 Introduction

The Islands of Sardinia and Corsica, in the central Mediterranean, represent a continental crust block, surrounded by two oceanic basins: the Liguro-Provencal Basin to the west that opened between 30 and 15 Ma, and the Tyrrhenian Sea to the east, which started to develop around 10-12 Ma and is still spreading (FACCENNA et al., 2002). These basins have been commonly interpreted as back arc basins controlled by subduction roll back and slab detachment processes (e.g. FACCENNA et al., 1997). The Island of Sardinia records the evolution and the migration of these extension processes, by means of continental rift phenomena. This work focuses on the northern sector of the Sardinia rift system (Anglona area, Perfugas sub-basin) (Fig.1 & 2) with the goal to (1) characterize the geometrical relationships among outcropping carbonate, clastic and volcanic rocks and (2) to understand the role of tectonic activity and paleo-topography as a control over depocenters of sedimentation and patterns of progradation of carbonate environments. This work is based on the integration of stratigraphic, sedimentologic, remote sensing (ASTER, Landsat-7) and topographic observations (DEM).

2 Geological setting of Sardinia

The Island of Sardinia represents a segment of the southern European Hercynic orogenic belt. During Mesozoic and lower Paleogene times, Sardinia was part of the southern passive margin

¹ Paolo Ballato, Gabriela Marcano, Prof. Dr. Maria Mutti, Universität Potsdam, Institut für Geowissenschaften, e-mail: ballato@geo.uni-potsdam.de, gmarcano@geo.uni-potsdam.de, mmutti@geo.uni-potsdam.de

² Dr. Hans-Ulrich Wetzel, Geoforschungszentrum Potsdam, Department 1, Sektion 1.4, e-mail: wetz@gfz-potsdam.de

³ Merle Hagen, Prof. Dr. Christian Betzler, Universität Hamburg, Geologisch-Paläontologisches Institut, e-mail: mhagen@geowiss.uni-hamburg.de, betzler@geowiss.uni-hamburg.de

of the Eurasian plate and continental and marine shallow water deposition occurred unconformably over the Hercynic basement (CARMIGNANI, et al. 2001).

Since Late Paleogene, Sardinia started to be involved into rift processes, which dominate the western sector of the island (~200 km long and 30 to 60 km wide. Two main segments can be differentiated: a northern one that trends N-S and is mainly linked to Oligo-Miocene extension phases and a southern one that is oriented NW-SE and is genetically connected with the Upper Miocene-Pleistocene extension (MONAGHAN, 2001) (Fig. 1).

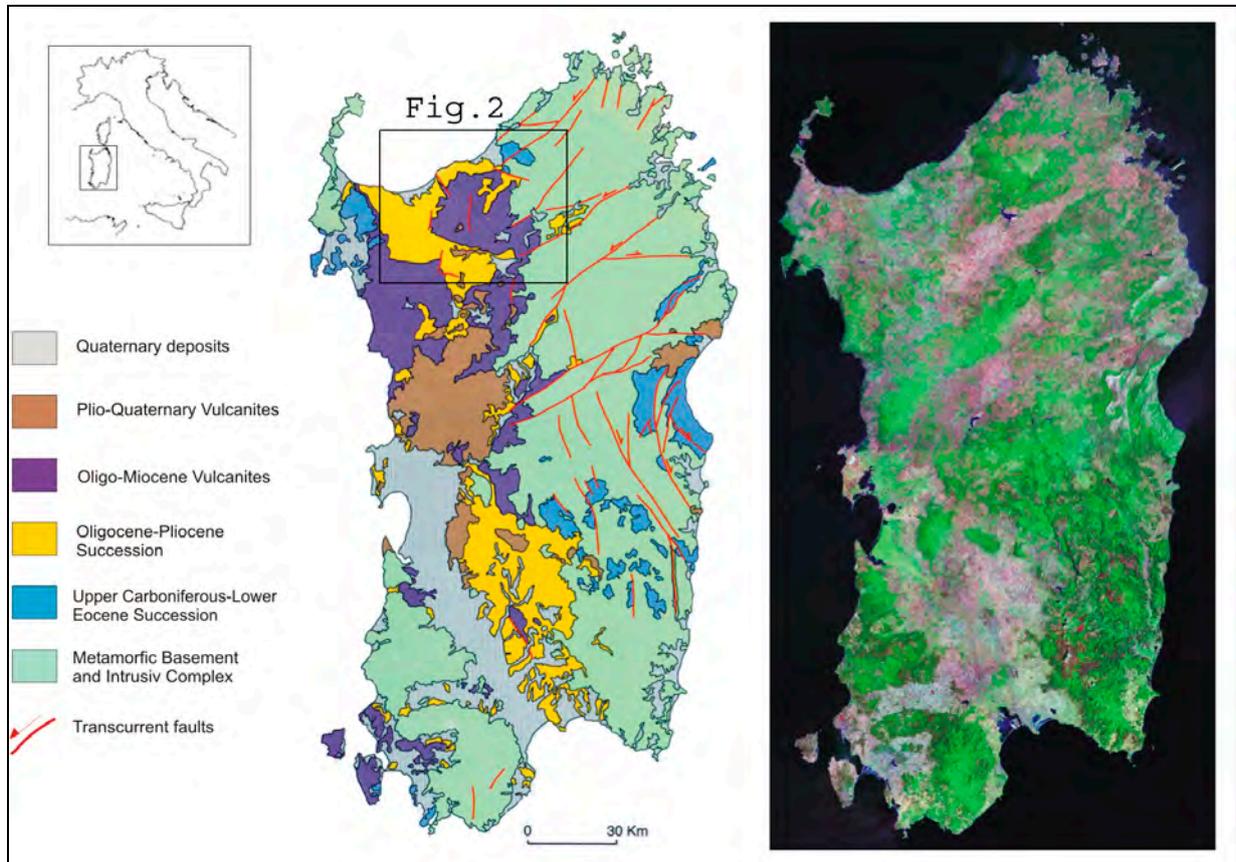


Fig. 1: Comparison between geological map (modified after CARMIGNANI et al., 2001) and MrSid Image. Note that in the northern area the main morphostructural elements affecting the basement trend NE-SW, while Upper Paleogene-Neogene deposits follow N-S direction. In the central south area basement anisotropies follow a NNW-SSE trend that coincides with Quaternary deposits distribution.

Geometry and timing of extension along the Northern Sardinian rift

The Sardinia rift has been described by several authors as a multi stage rift creating many sub-basins with different ages and structural styles. THOMAS & GENNESSEAU, (1986) on the basis of offshore seismic lines conclude that in the northern area the extension occurred in two phases: initially, from Late Oligocene to Aquitanian time toward N-S high angle normal faults; and later in Early Burdigalian, which follows the same trend. FACCENNA et al., (2002) on the base of anisotropy of magnetic susceptibility of synrift deposits demonstrate that the first extensional episode is oriented N-S (E-W trending fault) and is related to transtension events. Further E-W distension occurs in Lower-Middle Miocene, giving to the Sardinian Rift the actual N-S configuration. In Anglona area, SOWERBUTTS, (2000) recognizes three phases: a first Late Oligocene phase with the formation of NNW half-graben, a second Lower Miocene event E to SE trending and a final short phase of Middle Burdigalian age, with development of N to NNW fault system.

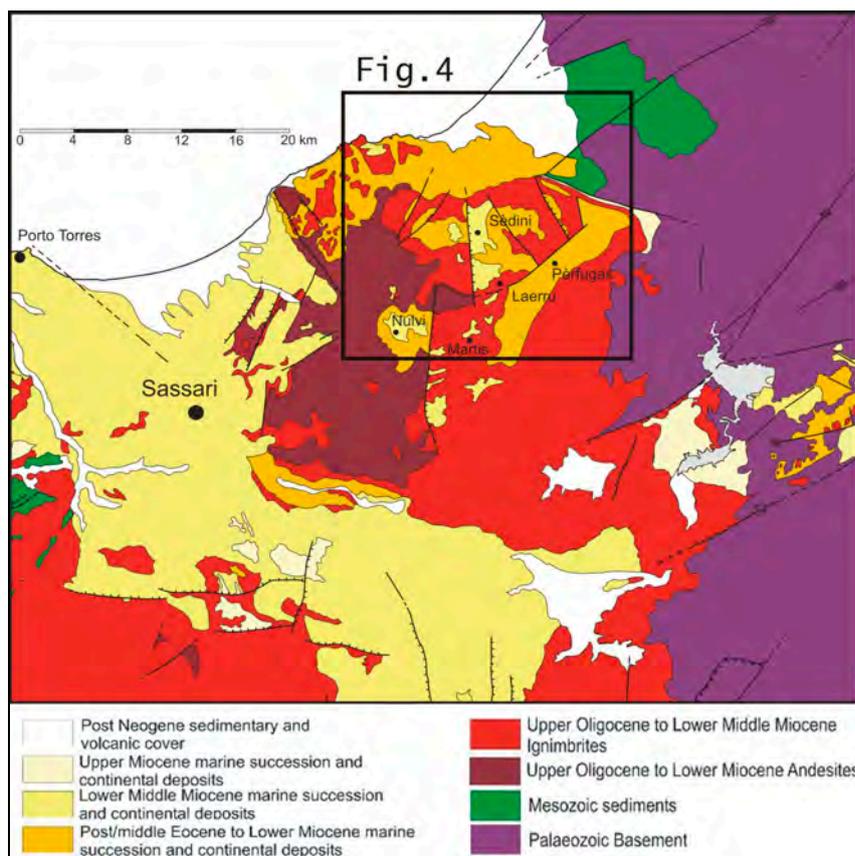


Fig. 2: Geological map of Anglona area (after CARMIGNANI et al., 2001)

3 Stratigraphic settings

According with previous stratigraphic studies focussed on northern Sardinia deposits (SOWERBUTTS, 2000, MONAGHAN, 2001 and CARMIGNANI et al., 2001), the synrift (Fig. 2) succession is represented by: Upper Oligocene to Lower Miocene andesitic deposits (Tergu Formation *sensu* SOWERBUTTS, 2000), Upper Oligocene to Lower Middle Miocene ignimbrites (2 *sensu* SOWERBUTTS, 2000), which in the Anglona area represent a stratigraphic marker of latest Early Burdigalian age; Lower Miocene marine succession and continental deposits, that in the Anglona are characterized by lacustrine limestones, cherts and tuffs (Perlugas Formation *sensu* SOWERBUTTS, 2000) and Lower-Middle Miocene marine succession and continental deposits that are represented by Upper Burdigalian-Lower Serravalian marine carbonates and marlstones (Laerru Formation *sensu* SOWERBUTTS, 2000). In this work we focus on the Laerru Formation to show its relationship with the basin geometry and paleo-topography and the spatial distribution of depositional facies. Four lithostratigraphic sections (see Fig.3) have been reconstructed through detailed field work to reconstruct depositional facies deposited on a carbonate ramp. The northernmost sections (Monte Monti and Sadini Town) are characterized by shallow water bioclastic limestones (rudstones to grainstones) overlying 'coastal' conglomerates, consisting of sub angular basement clasts. These deposits record the beginning of the Middle Burdigalian-Early Serravalian marine transgression (SOWERBUTTS, 2000) into a high energy depositional setting in the inner ramp. More to the south (Spilunca Valley) high angle tabular cross-bedded strata (moderated to bad sorted rudstones to pack/grainstones) are unconformably overlain by low angle cross-bedding bioclastic deposits, which represent mid ramp, channelized bar systems. On the top, the intercalation of foraminifera-rich, bioturbated wackestones/floatstones indicate a deepening upward trend of the sequence. In the southernmost section (Sa Rocca Manna) bioturbated "deeper water" limestones deposits (mid/outer? ramp) are overlain by boundstones and bioclastic cross-

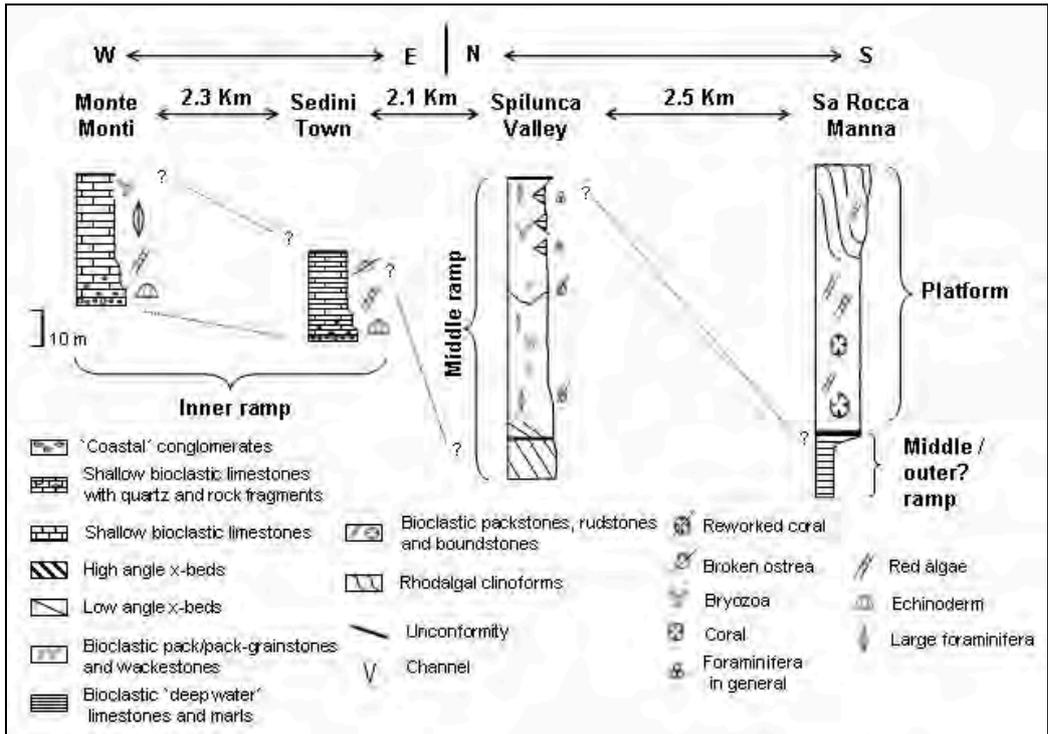


Fig. 3: Stratigraphic sections (see figure 4 for location).

bedded packstones. Rhodalgal clinoforms represent the top of the section. Sedimentary features indicate current activity and a progradation toward S-SE. The Sa Rocca Manna section reveals a change in depositional geometry from a ramp (Spilunca Valley) into a rimmed platform-geometry.

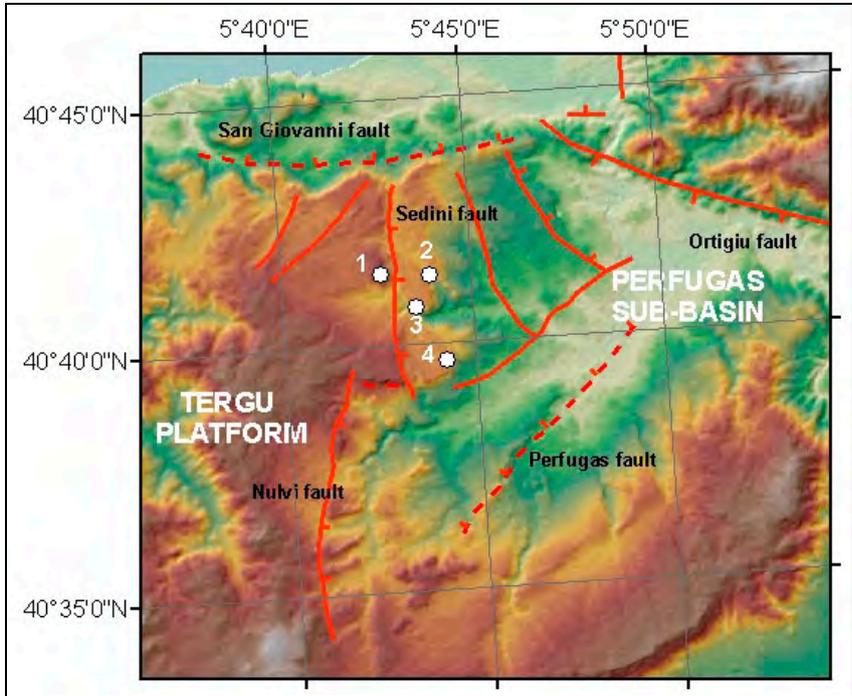


Fig. 4: DEM over shaded relief map of Perfugas sub-basin showing major faults. Stippled red lines represent inferred fault (modified after CARMIGNANI et al., 2001 and SOWERBUTTS, 2000). White dot represent stratigraphic section positions: 1, Monte Monti, 2 Sedini Town, 3 Spilunca Valley, 4 Sa Rocca Manna.

4 Remote sensing data

A cloud free ASTER scene of northern Sardinia was recorded on October 16 2002. The 30 meters resolution SWIR (short-wave infrared) bands have been spatially registered to the 15 meters resolution VNIR (visible-near-infrared) bands. A cloud free Landsat-7 ETM was recorded on June 27 2000. The satellite images have been overlaid on 30 meter pixel resolution DEM (Fig 4) produced from ASTER data.

4.1 Data processing

ASTER and Landsat bands have been displayed in colour images in order to obtain the better spectral contrast and allow a realistic geological interpretation. Several tests have been made, following the more common combinations generally used for Landsat scene (SABINS, 1997). However, due to the presence of vegetation cover (Mediterranean macchia) and cultivated fields these strategy did not work properly. For this reason an alternative approach has been attempted through the application of band ratios and PC transformation. The band ratio image was obtained from ASTER data. The bands selected from the study are band 9 (2.360-2.430 μm) and 4 (1.6-1.7 μm). To emphasize the reflectance contrast, the 9-4 ratio has been divided further by band 4 and the image has been subjected to a linear contrast stretch with 2% saturation. Finally the grey scale has been substituted with a coloured scale (Fig. 5). PC transformation (SABINS, 1997) permits to produce uncorrelated output bands starting from multispectral data highly correlated.

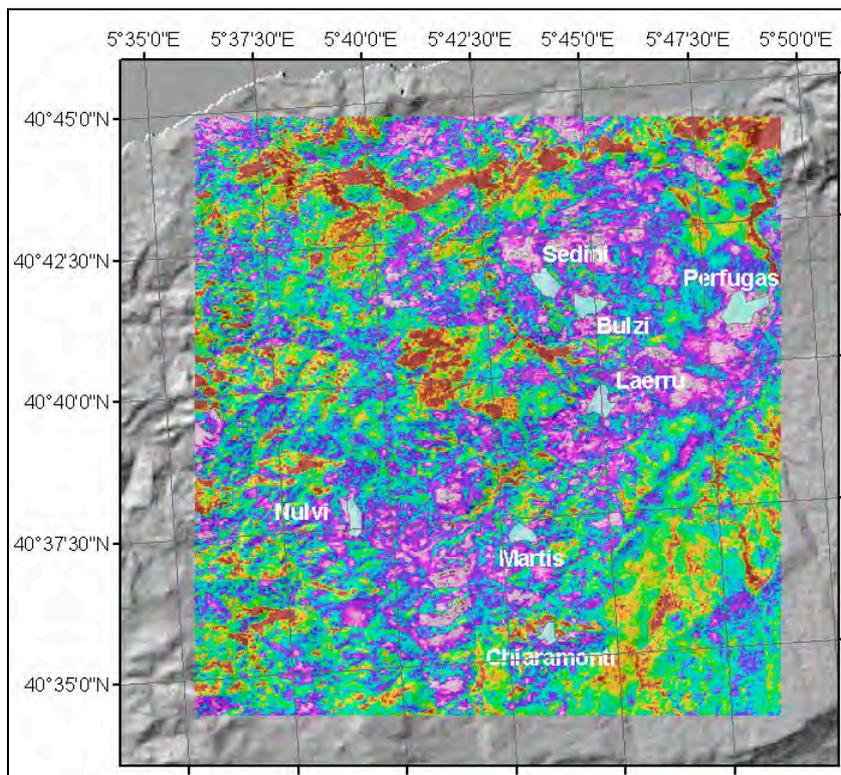


Fig. 5: ASTER ratio colour image.

This is done by calculating a new coordinate system that is perpendicular to the original system, in order to obtain the maximum variance. The best results using this technique have been obtained with Landsat data. The PC bands have been combined to create a colour image in the following way: PC 6 = R, PC 3 = G and PC 2 = B. The image was finally subjected to linear contrast stretch with 2% saturation (Fig 6).

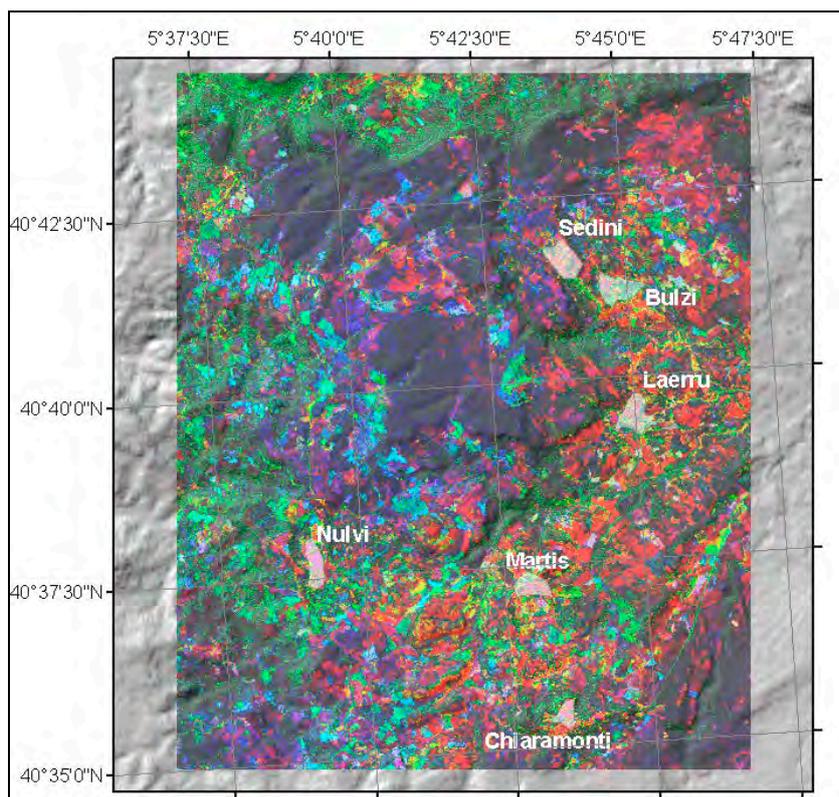


Fig. 6: Landsat ETM principal component colour image. PC 6 = R, PC 3 = G and PC 2 = B.

4.2 Image analysis

During rift evolution Northern Sardinia has been subjected to several extension and transtension phases with different structural trend. The DEM of Anglona area (Fig. 4) shows at least three main morpho-structural directions that bounded the sub-triangular Perfugas sub-basin. This depression is delimited by a NE-SW lineament on the south-western side (Perfugas fault), by an E-W to WNW-ESE lineament on the northern side (San Giovanni and Ortigiù fault) and by an N-S structure on the western side (Sedini and Nulvi fault). The combined use of ASTER and Landsat PC images of Perfugas sub-basin allowed to recognize the main lithological units to produce an interpretive geological map (Fig. 7). The geological formations that have been individuated are: Laerru Formation, Perfugas Formation, τ_2 ignimbrites and Tergu Formation. Due to lithological heterogeneity (conglomerates, marls and carbonates with different texture) the Laerru Formation has not a clear signal, but it can be mapped thanks to its different features relative to adjacent rocks. The Perfugas Formation shows a light violet colour on ASTER image, which distribution fits with the orange-red signal on Landsat PC image. The ignimbrite deposits are easily recognizable from both images because they have the highest digital numbers (dark blue to violet on Landsat PC and brown to green on ASTER image). Finally the andesites show a clear green colour on Landsat PC, while on ASTER they have not a characteristic feature. The interpretive map (Fig 7) shows a good agreement with the geological map (Fig. 2). The combined use of DEM with the interpretive map, obtained from ASTER and Landsat PC images, highlights the geometrical relationship between the lithological units. Ignimbrites and lacustrine deposits are faulted by Sedini fault. Close to the fault, they are covered by Laerru Formation. To the east they crop out, representing actually the lower area of Perfugas sub-basin. Laerru Formation can be observed in the footwall of Sedini fault as a small outcrop (section 1) and as well in the hangingwall onlapping the fault scarp (sections 2, 3 & 4). Southernmost it occurs as small outcrops showing a cut-off angle with Nulvi fault.

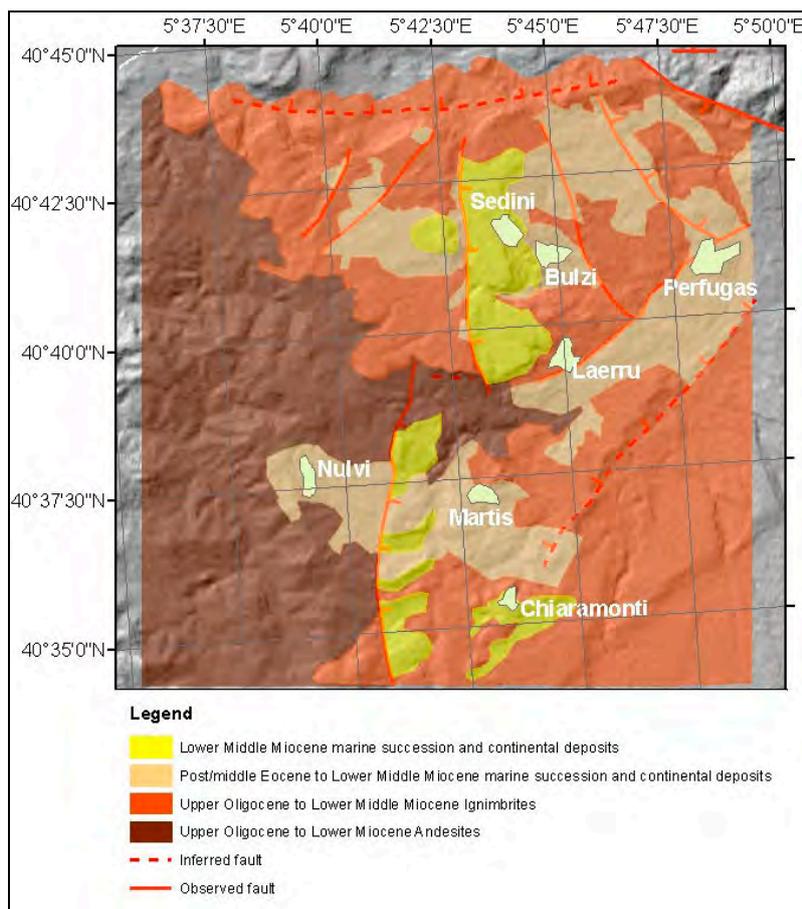


Fig.7: Geological interpretive map.

5 Discussions

Andesitic rocks of Upper Oligocene-Lower Miocene represent a topographic high during last rift events, being not subjected to sedimentation. Ignimbrites have been erupted during latest Early Burdigalian times and mark the end of Upper Oligocene-Lower Miocene volcanic activity in the northern Sardinia (SOWERBUTTS, 2000). After this event a lacustrine setting was established. The base of Laerru Formation marks the beginning of marine conditions. Sea water entered in Perfugas sub-basin from the northern area, probably for the combined effect of sea level change and N-S distension due to E-W faulting (San Giovanni fault). At this point the basement was flooded and the conditions for carbonate deposition were restored. Sedimentation took place both in hangingwall and footwall of Sedini fault, as testified by the presence of coastal conglomerates. The fault at that time probably did not exist yet. At this time the eastern and southern parts of Perfugas basin were already low topographic regions, because NE-SW and WNW-ESE structures precede the last extension (SOWERBUTTS, 2000). Therefore, the shallowest marine area was in northern-western part (section 1 & 2) while the deepest one was in the southern-eastern area (section 3). During carbonate deposition Sedini fault started to be active. The interaction between sea level change and normal fault activity has probably created accommodation space on the hangingwall and carbonates deposition condition was maintained. On the contrary on the footwall sub-aerial exposure took place. Probably the faulted block was tilted creating an eastern topographic barrier and a narrow elongated area of deposition close to the fault, as testified by the carbonate thickness, which decreases towards east and by the absence of carbonates in the eastern area. Paleocurrent data and cross-bedding strata geometries clearly pointed to a carbonate progradation toward S and SE, with the basal area located southern. After carbonate deposition the area was subject to emersion and continental condition were maintained right now.

6 Conclusions

The combined use of remote sensing data over DEM and field information allow defining the relationship between fault dynamic evolution and sediment deposition in an area subjected to extensional tectonic activity. In particular it has been possible:

1. To discriminate between pre-fault deposits (Tergu Formation, τ_2 ignimbrites and Perfugas Formation) and syn-fault deposits (Laerru Formation).
2. To link the fault dynamic activity and paleo-topography evolution to carbonate depositional geometry (Laerru Formation).

Acknowledgments

This work is supported by the Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG Project MU 1680/6-1). We thank Angela Landgraf for the supports with ArcGIS software.

References

- CARMIGNANI, L., OGGIANO, G., BARCA, S., CONTI, P., SALVADORI, A., ELTRUDIS, A., FUNEDDA, A. & PASCI, S., 2001: Geologia della Sardegna. Note illustrative della Carta Geologica della Sardegna a scala 1:200.000. Memorie descrittive della Carta Geologica d'Italia vol. LX.
- FACCENNA, C., MATTEI, M., FUNICIELLO, R., & JOLIVET, L., 1997: Styles of back-arc extension in the central Mediterranean Terra Nova, 9, 126-130.
- FACCENNA, C., SPERANZA, F., D'AJELLO CARACCILO, F., MATTEI, M. & OGGIANO, G., 2002: Extensional tectonics on Sardinia (Italy): insights into arc-back-arc transitional regime, *Tectonophysics*, 356, 213-232.
- MONAGHAN, A., 2001: Coeval extension, sedimentation and volcanism along the Cenozoic rift system of Sardinia. In: Ziegler, P.A., Cavazza, W., Robertson, A.H.F., Crasquin-Soleau, S. (eds.) *Peri-Tethys Memoir 6, Peri-Tethyan Rift/Wrench Basins and Passive Margins*. Mémoires du Muséum national d'Histoire naturelle, Paris, 186, 707-734.
- SABINS, F., F., 1997: *Remote sensing-Principles and interpretation* (3d ed.), New York, Freeman, 498 p.
- SOWERBUTTS, A., 2000: Sedimentation and volcanism linked to multiphase rifting in an Oligo-Miocene intra-arc basin, Anglona, Sardinia, *Geol. Mag.* 137, 395-418
- THOMAS, B. & GENNESSEAU, M., 1986: A two stages rifting in the basins of Corsica-Sardinia straits. *Mar. Geol.*, 72, 225-239.

Kalibrierung und Georeferenzierung photogrammetrischer Aufnahmen

OTTO HOFMANN¹

Zusammenfassung: Die klassische Bestimmung der Orientierungsdaten photogrammetrischer Aufnahmen durch Aerotriangulation wird zunehmend ergänzt oder verdrängt durch direkte Beobachtungen mit GPS- und Inertialsystemen (IMU). Hierzu wurde ein Verfahren entwickelt und das Konstruktionsprinzip einer Kalibrierungseinrichtung konzipiert, die diese Aufgabe mit minimalem Aufwand optimal erfüllt.

Die direkten Beobachtungen der Orientierungsdaten mit IMU- und GPS-Sensoren sind mit systematischen Fehlern behaftet, die von Fehlerparametern dieser Sensoren verursacht sind. Um diese Fehlerquellen zu ermitteln und die daraus resultierenden Fehler der Sensordaten zu eliminieren, werden im Rahmen operationeller Aufnahmen Kameradaten homologer Bildpunkte von Gelände-Objektpunkten ermittelt, die von mindestens drei Aufnahmezeitpunkten erfasst sind. Diese Kamera-Koordinaten werden mit den entsprechenden IMU- und GPS-Daten einer Ausgleichung unterzogen, die zu folgenden Ergebnissen führt:

- *Orientierungsdaten zu jedem Aufnahmezeitpunkt des Bildfluges,*
- *Offsetdaten,*
- *systematische Fehler der Messeinrichtungen,*
- *Genauigkeiten dieser Daten.*

Die Algorithmen dieses Verfahrens wurden für den operationellen Gebrauch und Modell-Simulationen erstellt und codiert. Testfeld-Kalibrierungen erübrigen sich. Das Verfahren ist sowohl für Aufnahmen mit photographischen als auch digitalen Flächen- und Zeilen-Kameras aus Luft- und Raumfahrzeugen sowie für Online-Prozesse anwendbar. Es funktioniert auch ohne die Beobachtung von GPS-Daten.

1 Problemstellung

Die Georeferenzierung photogrammetrischer Aufnahmen durch direkte Beobachtungen der Orientierungsdaten erfolgt mit Inertial- und GPS- Systemen. Das inertielle Messsystem (IMU) erzeugt Drehraten und Linear-Beschleunigungen, aus denen die Orientierungsdaten der Kamera, Positions- und Lagedaten, abzuleiten sind. Das IMU-System ist fest mit der Kamera verbunden. Der Abstand zwischen Kamera und IMU ist irrelevant, aber ihre Koordinatensysteme müssen parallel zueinander ausgerichtet sein, Winkelabweichungen werden als Boresightwinkel bezeichnet. Der GPS-Empfänger ist fest auf dem Träger montiert. Sein Abstand zum Projektionszentrum der Kamera liegt im Meterbereich. Infolge der Stabilisierungs-Bewegungen der Kamera während des Fluges verändern sich die Exzentrizitäts-Koordinaten des GPS-Empfängers in Bezug auf das Kamera-Koordinatensystem. Die IMU- und GPS-Beobachtungsdaten sind mit stochastischen und systematischen Fehlern sowie Offsetdaten behaftet. Diese Fakten werfen Probleme auf, sowohl für die Kalibrierung als auch für die Bestimmung der Orientierungsdaten.

In der PFG-Geoinformation 4/2003 veröffentlicht M. CRAMER Ergebnisse und Erfahrungen umfangreicher Untersuchungen direkter Georeferenzierungen und Feldkalibrierungen mit photogrammetrischen Kameras. Darin stellt er u. a. fest, dass „systeminterne

¹ Dr.-Ing. Otto Hofmann, Lerchenstr. 4, D-85649 Brunenthal, Tel. 08102-1500, Fax: 08102-99 59 77, E-Mail: oho-brunenthal@-online.de

Fehler der IMU nicht gänzlich eliminiert werden konnten“ und dass sie zeitlich nicht stabil sind. Eine Erklärung dafür erregte den Verdacht, „dass die Prozessierung der GPS/Inertial-Daten nicht mit ausreichender Sorgfalt durchgeführt wurde“. Darüber hinaus stellte der Autor fest, dass ohne Kontrollpunkte systematische Fehler gar nicht aufgedeckt werden konnten und dass sich Offsets zeitlich verändern und nicht reproduzierbar sind.

Die Bestimmung der Boresightwinkel erfordere eine „optimale Verarbeitung der GPS-Inertialdaten“, und der Autor folgert, dass nur durch eine „flugtag-spezifische“ Verbesserung der Systemkalibrierung oder durch „integrierte Sensororientierung“ im eigentlichen Befliegungsgebiet Fehler kompensiert werden können.“

TEMPELMANN, HINSKEN & RECKE (2003) publizieren ein Feld-Kalibrierungsverfahren für Zeilenkameras unter Verzicht geometrischer Laborkalibrierungen der Zeilensensoren: Eine bidirektionale Kreuz-Befliegung über ein „flaches“ Testfeld ohne Kontrollpunkte erfolgt aus zwei unterschiedlichen Flughöhen. Die Kamerakoordinaten der Zeilenpixel werden aus ca. 3000 bis 3500 homologen Objektpunkten mit etwa 4000 Strahlen von drei Sensorzeilen und der Einführung von Polynomen in einem Ausgleichungsprozess bestimmt.

Die in diesen Beiträgen publizierten Ergebnisse, Erfahrungen und Fakten sind technisch und wirtschaftlich problematisch.

2 Kalibrierung

Eine genaue und wirtschaftlich akzeptable geometrische Kalibrierung photogrammetrischer Aufnahmesysteme ist optimal nur mit einem geeigneten Instrumentarium und Verfahren im Labor möglich. Die Genauigkeit der Ergebnisse hängt ausschließlich von der Zweckmäßigkeit und Qualität der Kalibrierungseinrichtung ab und wird nicht von anderen Prozessen, Beobachtungen und Umständen beeinflusst.

Die Vermessung der Kamera, d. h. die Bestimmung der Pixelkoordinaten digitaler Kameras (oder der Rahmenmarken photographischer Kameras) erfolgt mit einem Kollimator, d. h. mit der Zielmarke eines auf unendlich fokussierten Fernrohrs, das um zwei rechtwinklig zueinander angeordnete Achsen drehbar ist. Um unvermeidliche Achsenfehler des Gerätes zu eliminieren, muss der Kollimator um diese Achsen um jeweils 180° durchschlagbar sein, um die Sensorpixel in zwei Fernrohrlagen beobachten zu können (Abb. 1).

Der objektseitige Hauptpunkt des Objektivs ist der Ursprung der Kamera-Koordinaten und damit das Projektionszentrum des gesamten Aufnahmesystems.

Die Z-Hauptachse des Kamera-Koordinatensystems entspricht der Nullrichtung des Kollimators, sie liegt annähernd in Richtung der optischen Achse des Kamera-Objektivs, muss sich aber nicht mit ihr decken. Die Pixelkoordinaten ergeben sich aus den Winkelmessungen um die beiden Kollimatorachsen in einer fiktiven Bildebene normal zur Hauptachse in frei wählbarem Abstand c_k vom Projektionszentrum, der Kammerkonstante.

Luftbild- und Satelliten- Kameras haben bisweilen große Objektiv-Öffnungen und digitale Kameras mehrere Objektive. Streng genommen müssen diese Optiken separat kalibriert und die Exzentrizitäten ihrer Hauptpunkte bei der Auswertung berücksichtigt werden. Das kompliziert die Auswertung beträchtlich. Dieser Umstand ist vermeidbar, wenn man die Optiken so anordnet, dass ihre Projektionszentren annähernd zusammenfallen. Sie werden gemeinsam kalibriert und die Pixelkoordinaten in eine gemeinsame Bildebene projiziert. Daraus folgt, dass Kameras mit nur einem Optikmodul vorteilhafter sind als Systeme mit mehreren Objektiven. Boresightwinkel verursachen Maßstabsfeh-

ler der Positions- und Lagebeobachtungen, die im Rahmen eines generellen Ausgleichsprozesses behoben werden. Bei normalen Geradeausflügen entstehen nur zufällige Fehler, deren Größe von den Amplituden der Winkel- und Geschwindigkeits-Bewegungen des Trägers abhängen. Dagegen wirken sich in Flugkurven Boresightwinkel beträchtlich aus. Sie lassen sich analytisch nicht beheben. Die Koordinatensysteme der Kamera und der IMU müssen daher parallel zueinander ausgerichtet sein.

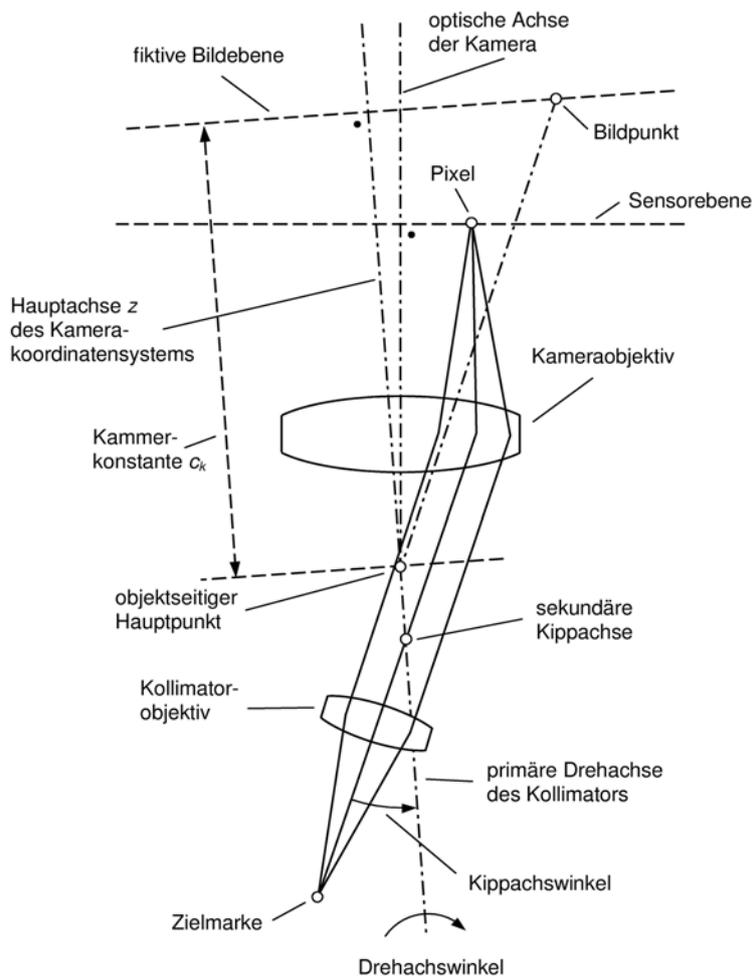


Abb. 1: Kamera-Kalibrierung

Die vorstehenden Anforderungen werden optimal von einer Kalibrierungseinrichtung erfüllt, die vom Autor konzipiert wurde und sich durch folgende Eigenschaften auszeichnet:

- Beobachtung der Pixel in zwei Fernrohrlagen,
- relativ kleine Öffnung des Kollimators, unabhängig von Größe und Zahl der Optiken,
- genaue Parallelausrichtung zwischen IMU- und Kamera-Koordinatensystem,
- minimaler technischer und finanzieller Aufwand.

3 Georeferenzierung

Die Beobachtungen für direkte Georeferenzierungen sind mit stochastischen und systematischen Fehlern behaftet. Um sie zu minimieren bzw. zu eliminieren werden sie einem Ausgleichsverfahren unterzogen. Dabei sind die originalen Beobachtungsda-

ten der Kamera und der IMU- und GPS-Sensoren in den Ausgleichungsprozess einzubringen. Andernfalls sind die jeweiligen systematischen Fehler der Sensoren und ihrer Daten sowie deren Genauigkeiten nicht bestimmbar. Vorprozessierte und vermischte GPS/IMU-Daten sind daher zur Lösung dieser Aufgabe untauglich. - In den Ausgleichungsprozess werden folgende Beobachtungsdaten eingeführt.

3.1 Beobachtungsdaten

Es werden Bildpunkte, IMU- und GPS-Daten beobachtet. Dabei ist hervorzuheben, dass im Rahmen dieses Verfahrens der direkten Georeferenzierung Bildpunktbeobachtungen im Unterschied zur konventionellen Aerotriangulationen zunächst dazu dienen, die Fehler-Parameter der Sensoren zu ermitteln und die daraus resultierenden systematischen Fehler der Beobachtungen zu eliminieren.

3.1.1 Kamera-Koordinaten

Entlang des Flugweges werden die homologen Bildpunkte frei wählbarer Objektpunkte ermittelt, die jeweils von mindestens drei Aufnahmestandpunkten aufgenommen sind. Bei Aufnahmen mit Flächensensoren liegen diese Objektpunkte nur im dreifachen Überdeckungsgebiet. Dagegen erfassen Push-broom-Aufnahmen mit Zeilen-Sensoren A, B, C sämtliche Objektpunkte von jeweils drei Aufnahmestandpunkten.

Die sich im Objektpunkt schneidenden Bildstrahlen sind durch Kollinearitätsgleichungen darstellbar. Sie enthalten die genäherten Orientierungsdaten des Aufnahmestandpunktes, die den direkten Beobachtungsdaten der IMU- und GPS-Sensoren entsprechen. Zur Orientierung im örtlichen, geodätischen Koordinatensystem der Auswertung sind Passpunkte aufzunehmen, zweckmäßig je zwei am Anfang und Ende eines Flugstreifens.

3.1.2 Berechnung der Orientierungs-Rohdaten aus IMU-Beobachtungen

Die IMU liefert in Bezug auf den Inertialraum Drehraten p [rad/s] und Linearbeschleunigungen b [m/s²]. Sie werden in Taktintervallen Δt abgetastet und ergeben

- Winkelinkremente Δp [rad] = p [rad/s]· Δt [s] und
- Geschwindigkeits-Inkremente Δv [m/s] = b [m/s²] Δt [s].

Das sind die Originalbeobachtungen der IMU. Daraus sind die photogrammetrischen Orientierungs-Rohdaten, Koordinaten und Lagewinkel der Aufnahmestandpunkte jedes Taktes der IMU, abzuleiten. Sie sind nicht unabhängig voneinander, sondern korreliert und enthalten stochastische und systematische Fehler und Offsets.

3.1.3 GPS-Daten

Die vom GPS-Empfänger beobachteten und auf das örtliche Koordinatensystem bezogenen Positionsdaten sind auf das Kamera-Koordinatensystem zu transformieren. Die Exzentrizitäts-Koordinaten des GPS-Empfängers ändern sich infolge der Stabilisierungsbewegungen der Kamera-Plattform. Sie werden off-line mit den Winkeldaten der Plattform berechnet. Die Exzentrizitäts-Koordinaten der Plattform sind a priori nur unsicher bestimmbar. Sie werden daher im Rahmen der Ausgleichung gemeinsam mit den Offset- und Driftfehlern des GPS korrigiert.

3.2 Ausgleichungsprozess

Mit den Fehlergleichungen der Kollinearitätsgleichungen, der IMU-Rohdaten und GPS-Beobachtungen werden die Fehlergleichungsmatrix und das Normalgleichungssystem aufgestellt. Die iterative Auflösung und Inversion liefert folgende Ergebnisse:

- die Orientierungsdaten zu jedem IMU-Takt,
- die Koordinaten der ausgewählten Objektpunkte,
- Offsetdaten,
- IMU- und GPS-Driftfehlerparameter,
- Exzentrizitäts-Koordinaten des GPS-Empfängers,
- die stochastischen Fehler dieser Ergebnisdaten.

Die Algorithmen dieses Verfahrens wurden für operationelle Anwendungen und Modell-Simulationen vom Autor entwickelt und von P. Navé² codiert.

4 Anwendungen und Vorzüge des Verfahrens

Das Verfahren eignet sich für Aufnahmen aus Luft- und Raumfahrzeugen sowohl mit photographischen als auch digitalen Flächen- und Zeilen-Kameras.

Die Orientierungsdaten eines Bildaufnahmefluges und die systematischen Fehlerparameter des Aufnahmesystems werden optimal mit minimalem Aufwand bestimmt. Testfeld-Kalibrierungen erübrigen sich.

Die systematischen Fehler-Parameter des Kamerasystems sind naturgemäß konstant. Sie werden für jede Befliegung neu bestimmt und regeneriert, sofern entsprechend Pos. 3.1 entlang des Flugweges homologe Bildpunkte von Objektpunkten in die Ausgleichung einbezogen werden. Für etwas geringere Genauigkeitsansprüche kann aber darauf verzichtet werden. Dann ist lediglich die Beobachtung von Passpunkten erforderlich. Damit entfällt der Prozess zur Bestimmung homologer Bildpunkte von Objektpunkten. Das Verfahren vereinfacht sich und das Datenvolumen der Beobachtungen und des Ausgleichungsprozesses ist gering.

Das Verfahren funktioniert auch ohne GPS-Daten und ist grundsätzlich für Online-Prozesse anwendbar.

5 Literaturverzeichnis

- HOFMANN, O., 1986: Dynamische Photogrammetrie. - Bildmessung und Luftbildwesen, Heft 3/1986.
- HOFMANN, O., KALTENECKER, A. & MÜLLER, F., 2003: Das flugzeuggestützte digitale Dreizeilenaufnahme- und Auswertesystem DPA - erste Flugerprobungsergebnisse.- Photogrammetric Week 93, S. 97-107.
- CRAMER, M., 2003: Erfahrungen mit der direkten Georeferenzierung. - Photogrammetrie Fernerkundung Geoinformation, 4/2003, S. 267 - 278.
- TEMPELMANN, U., HINSKEN, L. & RECKE, U., 2003: ADS40 calibration and verification process.- Proceedings on Optical 3-D Measurement Techniques, Zürich.

² Dr. Peter M. W. Navé, Hubertusstr. 5, 85662 Hohenbrunn, E-Mail: pmwnave@yahoo.de

Neue Generation einer 360° Panoramakamera

Andreas Eckardt⁽¹⁾, Ingo Walter⁽²⁾, Reinhard Schuster⁽³⁾

Zusammenfassung: In den letzten Jahren hat die Einrichtung Optische Informationssysteme [OS] des DLR verschiedene Scannerentwicklungen im visuellen Spektralbereich durchgeführt. Die spezielle Expertise der Einrichtung OS beruht auf dem Systemansatz vor und während der Entwicklung.

Die Scannersysteme, die OS entwickelt hat, entsprechen allen Anforderungen an Messgeräten hinsichtlich der radiometrischen und geometrischen Güte. Diese Scannersysteme, die für spezielle Aufgabenstellungen in der Photogrammetrie und Fernerkundung entwickelt wurden, werden auf verschiedensten Plattformen für Weltraum- oder Flugzeuganwendungen eingesetzt. Neu kam die Verwendung als Panoramasektor Ende der Neuziger Jahre hinzu.

OS beschäftigt sich seit mehr als sechs Jahren mit einer Panoramatechnologie, die für zwei- und dreidimensionale Vermessungen benutzt wird. Das verwendete Verfahren beruht auf dem Grundprinzip einer zeilenweisen 360°-Bildgewinnung. Das LLPC-Grundprinzip (Low Ligh Panoramic Camera) beruht darüber hinaus auf der TDI-Technologie, die zur Verbesserung des SNR in der Satellitenfernerkundung entwickelt wurde. Auf Basis dieser Technologie konnte eine deutliche Verbesserung der Empfindlichkeit (Faktor 10) erzielt werden. Diese Spin-Off-Technologie aus der Raumfahrt trägt dazu bei, das Beleuchtungsproblem in Innenräumen zu minimieren. Das LLPC-Elektronikdesign beruht auf Elektronikkomponenten, die für die Filmabtastung entwickelt wurden.

Die Technologie und die technologische Umsetzung werden sowohl in der Präsentation als auch in der Veröffentlichung dargestellt.

Einleitung und Motivation

Die Einrichtung für optische Informationssysteme des DLR hat seit mehr als 6 Jahren Erfahrungen im Umgang mit hochauflösenden 360° Panoramabildern. Unter der Verwendung von herkömmlichen CCD-Zeilen in Anordnungen mit 6 cm Standardobjektiven war man schnell in der Lage sowohl die räumlich hohe Auflösung zu garantieren als auch basierend auf der 360° Drehbewegung digitale Panoramabilder zu erzeugen. Es stellte sich allerdings schnell heraus, dass in Innenräumen nur dann qualitativ gute Farbaufnahmen gemacht werden können, wenn die Räume mit hinreichend großer Lichtleistung ausgeleuchtet werden.

Dieses stellte sich nach und nach als ein sehr aufwendiger Prozess heraus. Panoramasyeme der zweiten Generation sollten, aus Sicht des Anwenders, mit Hilfe ihrer höheren Empfindlichkeit in der Lage sein, sich automatisch an die jeweiligen Belichtungsverhältnisse anzupassen. Hierzu dient die LLPC-Projekt Technologie.

(1) Andreas Eckardt, DLR, Optical Information Systems, Rutherfordstr. 2, 12489 Berlin, Germany, Tel.: +4930-67055539, Fax: +4930-67055532, Email: andreas.eckardt@dlr.de

(2) Ingo Walter, DLR, Optical Information Systems, Rutherfordstr. 2, 12489 Berlin, Germany, Tel.: +4930-67055186, Fax: +4930-67055532, Email: ingo.walter@dlr.de

(3) Reinhard Schuster, DLR, Optical Information Systems, Rutherfordstr. 2, 12489 Berlin, Germany, Tel.: +4930-67055583, Fax: +4930-67055532, Email: reinhard.schuster@dlr.de

Das LLPC Prinzip

Wie aus der Gleichung (1) ersichtlich, ist die Empfindlichkeit eines Sensors direkt proportional zur Sensorfläche [A] und zur Integrationszeit [ti]. Auf Grund dessen, dass die zweite Generation von Panoramasensoren in der Lage sein soll, die Empfindlichkeit an die Beleuchtungsverhältnisse vor Ort zu adaptieren, kommt genau diesem Designaspekt eine große Bedeutung zu. Aus Gleichung (1) lässt sich auch ersehen, dass die Quanteneffizienz [PL] ebenfalls direkt proportional in die Anzahl der Photonen [Nph] eingeht.

$$N_{ph} = \frac{Pl \cdot A \cdot t_i \cdot \lambda}{h \cdot c} \quad (1)$$

$$s_i = t_i \cdot I_K \cdot \left(\frac{dV}{dN_e} \cdot A_s \right) \cdot \frac{\pi}{4} \cdot \left(\frac{1}{F} \right)^2 \int_{\Delta\lambda} \left(\frac{QE}{E_{ph}(\lambda)} \right) \cdot T_r(\lambda) \cdot L_d(\lambda) d\lambda + D_{s_i} \quad (2)$$

Die Gleichung (2) gibt den Zusammenhang zwischen verschiedenen Parametern, die einen Einfluss auf die Signalspannung [si] und somit auf die Empfindlichkeit haben. Es lässt sich schnell erkennen, dass man Objektive mit möglichst kleiner Blendenzahl [F] einsetzen sollte und die spektralen Filter [dλ] je nach Applikation, so breit als möglich, zu implementieren sind. Auch unter allen diesen Randparametern kann derzeit kein Sensorsystem entwickelt werden, welches über eine hinreichen große Empfindlichkeit verfügt, die man elektronisch steuern kann.

Zur Lösung dieses Problems trägt ein seit nunmehr mehr als 20 Jahren altes Prinzip aus der Raumfahrt bei. Dieses so genannte Time Delay and Integration (TDI) Verfahren wird in Abbildung 1 dargestellt.

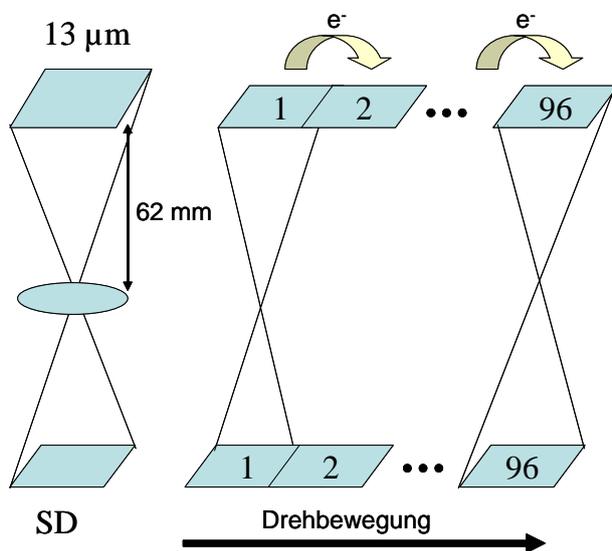


Abb. 1:
TDI-Prinzip in Anwendung bei LLPC

Das TDI-Verfahren reduziert das für Quantensensoren dominante Photonenrauschen (auch als shot noise bekannt) durch Mehrfachbelichtung ein und desselben Pixels. Die Anzahl der Belichtungen ist abhängig von der Anzahl der TDI-Stufen. Die Gleichung (3) zeigt welchen Einfluss die TDI-Stufen des Sensors auf das Photonenrauschen haben. Dieses Verfahren kommt einer Vergrößerung der Apertur auf elektronischen Weg gleich.

$$Photon_SNR_{TDI} = Photon_SNR * \sqrt{Nr_TDI_Steps} \quad (3)$$

Auf Grund der mehrfachen Integration kommt es oftmals gerade bei mechanisch instabilen Verhältnissen zu einer Abnahme der Ortsauflösung über die Anzahl der TDI-Stufen (siehe Gleichung (4)). Es ist daher ratsam, bei derartigen Systemen eine möglichst kurze Belichtungszeit zu wählen und die Rauschverbesserung über den TDI Effekt zu erzielen. Die alleinige Betrachtung der Geometrie in Bezug auf die Auflösung führt nur teilweise zum Ziel.

$$MFT = MTF_{Optics} * MTF_{Pixel} * MTF_{Chanel} * MTF_{smear[TDI]} \quad (4)$$

Der Vorteil der Verbesserung der Empfindlichkeit kommt auch der geometrischen Auflösung zu Gute und drückt sich in dem Zusammenhang aus, dass erst ab einem bestimmten Kontrast zwei Objekte voneinander zu unterscheiden sind. Dieser Zusammenhang ist intuitiv leicht verständlich. Ein sehr übliches Kriterium hierfür ist das Rayleigh-Kriterium (5). Aus diesem Kriterium kann die Kontrastdefinition als Unterschied zweier Objekte, die sich mit einem Kontrastunterschied von 25 % voneinander unterschieden, definiert werden.

$$K_{min} = \frac{MAX\{I\} - MIN\{I\}}{MAX\{I\}} = 25\% \quad (5)$$

Der zu erreichende minimale Kontrastunterschied K_{min} ergibt sich aus der Rayleigh-Beziehung (5). Diese Beziehung beschreibt den geringst möglichen Kontrastunterschied zur Unterscheidung zweier Objekte. Dieser Unterschied wird im Verhältnis Maximal- $MAX\{I\}$ zu Minimalwert $MIN\{I\}$ der Objekte wiedergespiegelt. Damit ist ein direkter Zusammenhang zwischen radiometrischer und geometrischer Auflösung gegeben.

Technisches Konzept

Das Aufnahmeprinzip der LLPC beruht auf einer 360°- Drehbewegung mit senkrecht orientierten TDI-Zeilendetektoren, die in getrennt aufgebauten Wellenlängenbereichen Rot, Grün, Blau und nahes Infrarot die Umgebung in einem Feldwinkelbereich von ca. 30° abtasten. Das vorliegende Konzept für die LLPC hat Prototypcharakter und ist aus Modulen für Optik, Fokalebene und Sensornahe Elektronik zusammengesetzt, die Anpassungen ohne wesentliche Änderung der Schnittstellen erlaubt. Dieser Kamerakopf ist als integrierter optomechanischer Aufbau auf einen Drehtisch zu montieren. Für Kamerasteuerung und Datenspeicherung dient ein abgesetzter 64Bit PC.



Abb. 2: Fokalebene modul LLPC mit 2k TDI Zeile

Sensor

Herzstück der LLPC ist ein Fokalebene-Modul mit TDI-Sensorzeilen der Firma Fairchild Imaging, welche ursprünglich für die Raumfahrt entwickelt worden sind. Die Abbildung 2 zeigt die verwendete 2k TDI-Sensorzeile auf dem Fokalebene-Modul. Es enthält neben dem Sensor die Detektorelektronik.

Das thermale Interface des TDI-Sensors ist auf der Rückseite massiv ausgeführt und dient gleichzeitig als Mechanik für die Justage der optischen Koregistrierung. Auf Grund der zu erwartenden Verlustleistung kann davon ausgegangen werden, dass selbst bei ungünstigen Umweltbedingungen eine passive Kühlung des Sensors ausreichend ist.

Optik

Ein eigens für die LLPC entwickeltes bildseitiges telezentrisches Objektiv mit einberechnetem Strahlteiler trennt das elektromagnetische Spektrum in die Grundfarben Rot, Grün, Blau auf und besitzt zusätzlich einen NIR Kanal.

Das Design entsprechend Abbildung 3 ist getrieben durch die hohen Anforderungen an die Verzeichnung und spektralen Abberationen um eine Pixeldeckung der 4 diskret aufgebauten Fokalmodule zu sichern. Gleichzeitig muss ein langer Glasweg für den Strahlteiler berücksichtigt werden. Hier liegt ein klassischer Prismensynopter als Konzept zugrunde, der nochmals die beiden optischen Einzelpfade in jeweils 2 um 90° versetzte Ausgänge trennt. Damit wird eine geometrische 1 auf 4 - Strahlenteilung erzeugt.

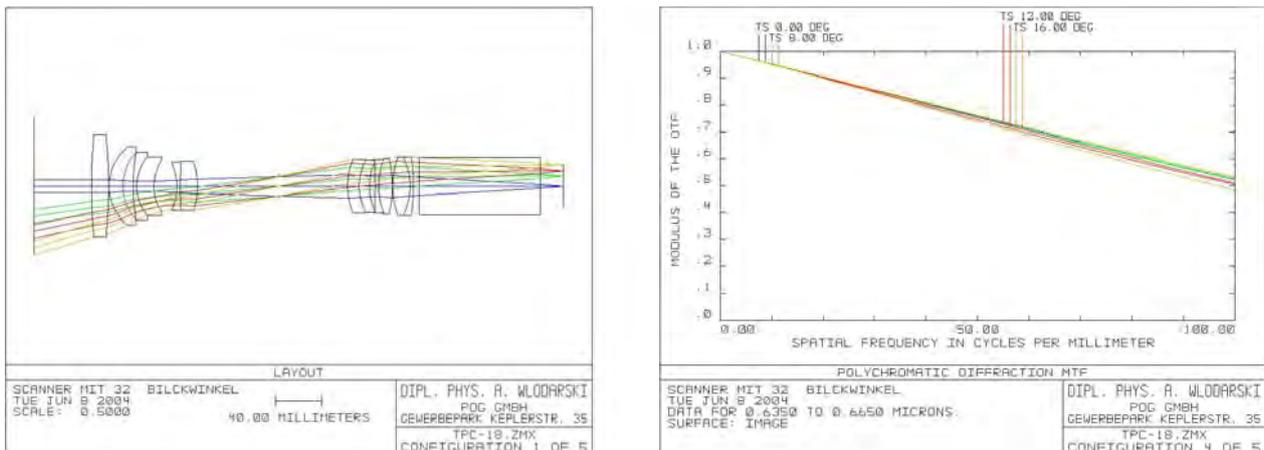


Abb. 3: LLPC-Optikentwurf (Lay-Out und MTF Rot-Kanal)

Das Optikdesign ist hochkorrigiert (12 Linsen) und in seiner Leistung nahezu an der Beugungsgrenze. Erste Messungen mit dem Prototyp der Optik ohne Strahlteiler bestätigen die Qualität, Abbildung 4 zeigt gemessene MTF der Optik mit längs und quer zum Messdetektor gerichteter Spalt/ Spot-Verschiebung.

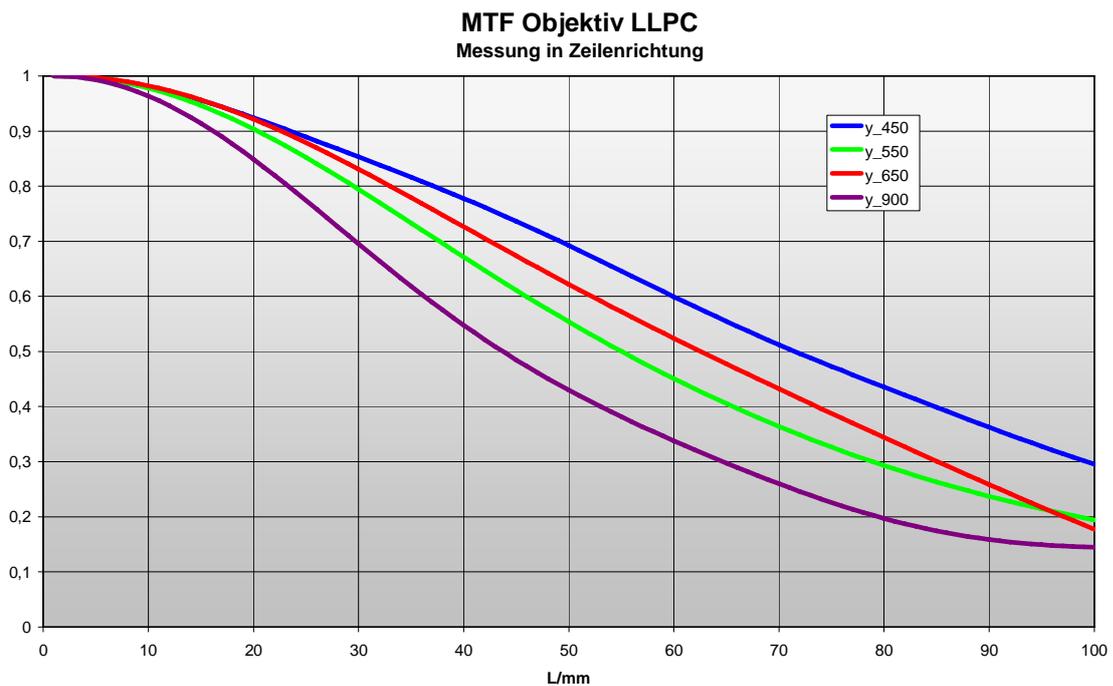
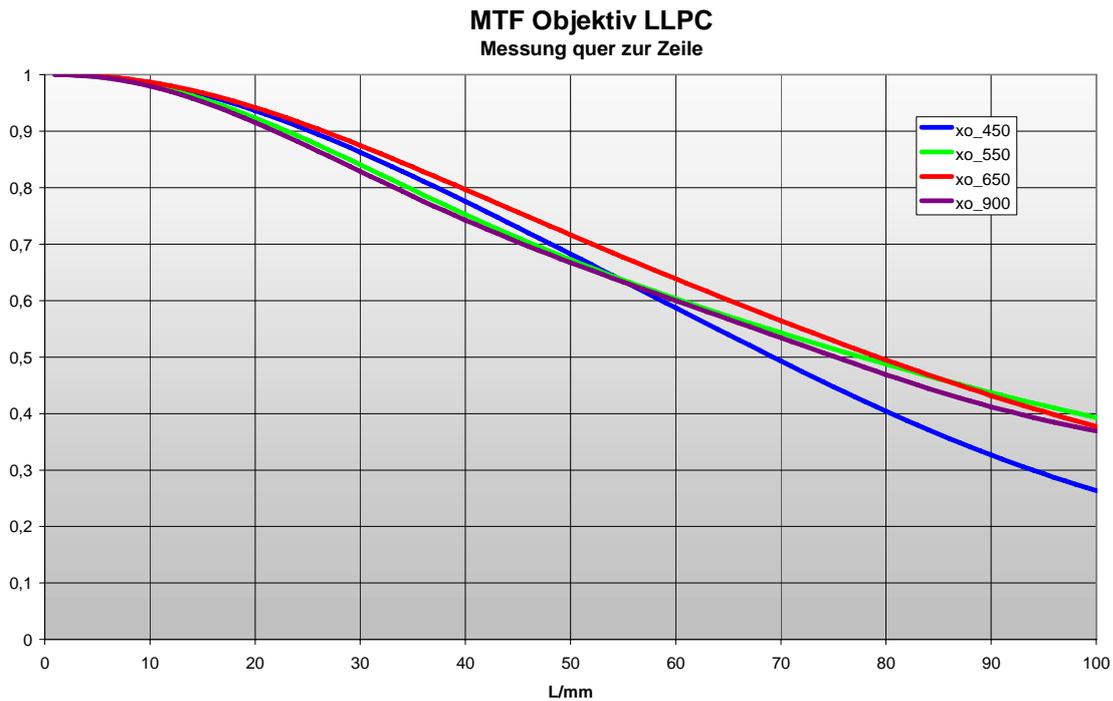


Abb. 4: Gemessene MTF des Objektiv-Prototypen LLPC

Optomechanik

Neben der Struktur für die Objektiv-Strahlteilerkombination hat die Optomechanik die Aufgabe, die Einzelbilder RGB und NIR zur Deckung zu bringen. Durch das Konzept des diskreten Aufbaus der Fokalmodule ist das nur leistbar, wenn diese in den erforderlichen Freiheitsgraden justierbar sind. Gegenwärtig sind dafür im Sinne eines Prototyps alle 6 Freiheitsgrade jedes Kanals justierbar. In einer Weiterentwicklung kann entsprechend den technologischen Erfahrungen diese Zahl eingeschränkt werden.

Abbildung 5 zeigt die Objektiv-Strahlteileranordnung mit angesetzten Fokalebeneinheiten, der Strahlteiler dient dabei als optomechanischer „Knoten“ der Konstruktion.

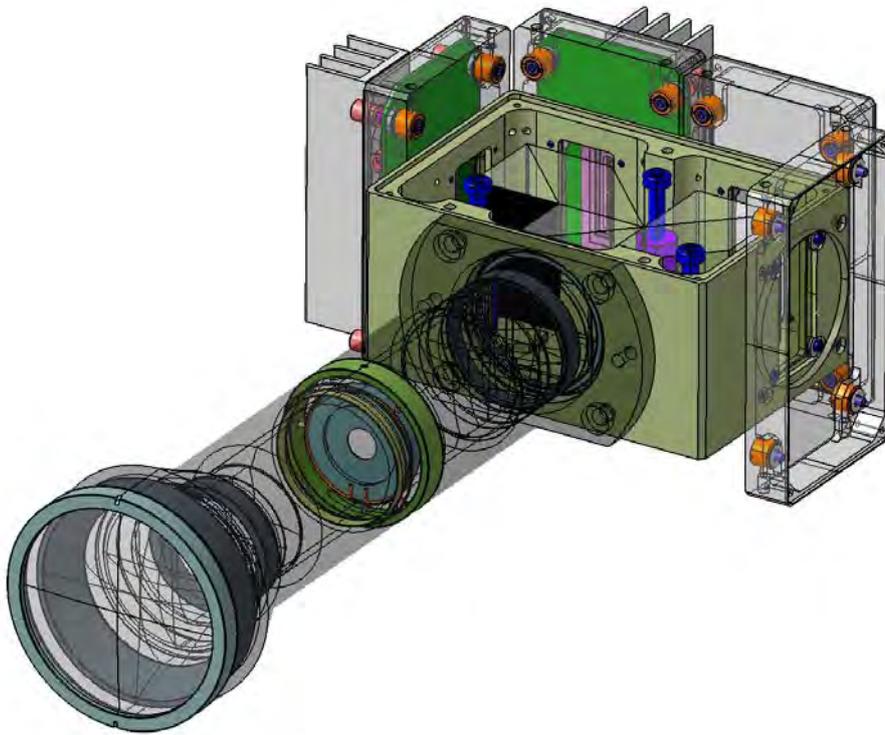


Abb. 5: LLPC-Scankopf

Kameraelektronik

Die Elektronik zur AD-Wandlung bis zum Digital-Interface ist in je einem Block für jeweils 2 Kanäle integriert und wird über eine flexible Leiterkarte mit der sensornahen Elektronik auf dem Fokalmodul verbunden. Jeder Elektronikblock enthält ein AD-Board, einen 64Bit-Frame-Grabber und ein Interface-Board, welches die Schnittstelle zu einem abgesetzten 64 Bit PC für Kommandierung und Datenmanagement – die Bilddaten werden im 48 Bit TIF-Format gespeichert – ist. Abbildung 6 zeigt die bereits entwickelten Elektronikarten.

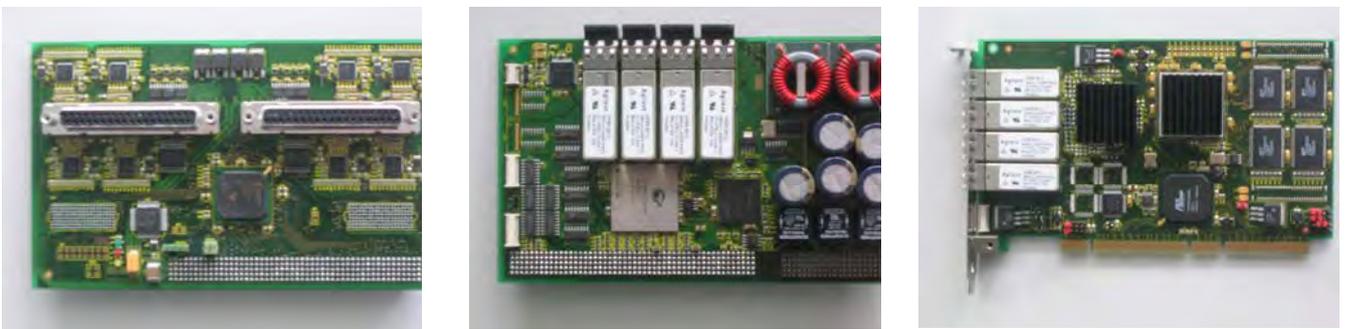


Abb. 6: Elektronikkomponenten der LLPC-Kameraelektronik: AD-Board, Interface-board und 64Bit Frame-Grabber (von links)

Die Elektronik ist in der Lage, alle systematischen Fehler in Echtzeit zu korrigieren. Somit kann das System ohne Kenntnis von PRNU und DSNU Effekten eingesetzt werden. Die Erzeugung des 48 Bit TIF Datenformates wird im PC organisiert. Im TIF-Header werden alle zusätzlichen Informationen zur Bildaufnahme geschrieben. Typischerweise wird dem Nutzer eine 1k Byte ASCII Textbeschreibung zu Verfügung gestellt. Auch Informationen zur Lage und Position, falls vorhanden, werden im Header abgelegt.

Systemspezifikation

Eine vorläufige Zusammenfassung der wesentlichsten Parameter ist in Tabelle 1 gegeben. Die Spektralbereiche sind gegenwärtig durch den Einsatz von Standardfiltern bestimmt.

Tab. 1: Spezifikation der LLPC

Focal length	62 mm / F 5,6
Pixel size	13 μ m
TDI CCD line	2048 pixels
Programmable TDI steps	24, 48, 64, 96
Dynamic range	14 bit
Radiometric resolution	14 bit
TDI Line Rate [max]	39.000 lines / s
Spectral channels	
• Red	620 - 700 nm
• Green	510 - 560 nm
• Blue	400 - 500 nm
• Near Infrared	780 - 1200 nm

Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Verwendung von TDI-Sensoren für Applikationen in Innenräumen oder bei nicht optimalen Beleuchtungsverhältnissen im Außenbereich große Vorteile mit sich bringen. Der Status im LLPC-Projekt ist, dass derzeit das Objektiv hinsichtlich seiner Farblängsfehler und der Abbildungseigenschaften untersucht wird. Es wurde ein spezielles Kalibrations-Target entwickelt, welches erlaubt, ohne Sensorbewegung die Koregistrierung der Farbkanäle zu justieren.

Nach diesen Arbeiten wird erstmalig die Funktionsweise der LLPC nachgewiesen. Im Zusammenhang mit den Betrachtungen zur Auflösung und zur Kalibration werden im Anschluss Sensormodelle erzeugt, die eine spätere Simulation der Gesamtanordnung erlauben.

Der Vorteil einer sehr empfindlichen 360° Panoramakamera wird mit Hilfe der radiometrischen Weißlichtkalibration im Labor nachzuweisen sein. Somit ist man nicht nur theoretisch in der Lage die Verbesserung des SNR zu errechnen, sondern man hat die Möglichkeiten über die Kenntnis der tatsächlichen Strahlleistungsdichte vor der LLPC, die Verbesserung des SNR durch die Wahl von 24, 48, 64 und 96 TDI-Stufen zu verifizieren.

Des Weiteren wird die Möglichkeit der adaptiven Regelung von TDI-Sensoren in Abhängigkeit der Beleuchtungsverhältnisse nach statistischen Schätzverfahren untersucht und die Vor- und Nachteile von Bildregionen mit unterschiedlich großen Photonrauschen bewertet. Es wird angestrebt, alle Untersuchungen bis Ende 2005 abzuschließen.

Literatur

- ECKARDT, A., ARNOLD, G., LORENZ, E., JAHN, H., OERTEL, D. & BÖRNER, A., 2004: Advanced sensors for surveying and mapping, [Proc. SPIE Vol. 5612](#), p. 172-179, Electro-Optical and Infrared Systems: Technology and Applications; Ronald G. Driggers, David A. Huckridge; Eds, Dec 2004
- SCHEIBE, K., KOSITZKY, H., REULKE, R., SCHEELE, M. & SOLBRIG, M., 2001: EYESCAN – A High Resolution Digital Panoramic, Camera: Lecture Notes in Computer Science, Proceeding New Zealand, pp. 77-83
- REULKE, R., SCHEELE, M., SCHEIBE, K. u.a., (2001): Multi-Sensor-Ansätze in der Nahbereichsphotogrammetrie, *21. Jahrestagung DGPF*, Konstanz, Sept. 2001, DGPF, Photogrammetrie und Fernerkundung.
- REULKE, R., (2003): Design and Application of High-Resolution Imaging Systems, GIS Geoinformationssysteme, p. 30-37, 3/2003
- ECKARDT, A., 2002: Design und Verifikation der ersten digitalen kommerziellen Luftbildkamera, Dissertation - TU-Berlin, 10.10.2002.
- WŁODARSKI, A., 2004: Optikstudie Scanner 32°, Auftragsstudie Optikentwicklung POG GmbH, Gera 2004.

Hochauflösende Digitale Geländemodelle der Marsoberfläche auf der Grundlage von Mars Express HRSC Daten

K. GWINNER¹, F. SCHOLTEN¹, M. SPIEGEL², R. SCHMIDT³, B. GIESE¹, J. OBERST¹, R. JAUMANN¹, G. NEUKUM⁴, HRSC CO-INVESTIGATOR TEAM

Zusammenfassung: Die Oberflächenrekonstruktion aus HRSC-Stereodaten unterliegt veränderlichen Einflussfaktoren, die mit Eigenschaften des Aufnahmesystems, der Marsatmosphäre sowie der Marsoberfläche selbst verknüpft sind. Adaptive Verarbeitungskomponenten und zuverlässige Qualitätsparameter für die Kontrolle der Datenauswertung erscheinen daher als wichtige Hilfsmittel für die Ableitung hochauflösender Geländemodelle. Hierzu durchgeführte Testreihen zeigen, dass Punktgenauigkeiten im Subpixel-Bereich und DTM-Auflösungen von bis zu 50 m für große Bereiche der Marsoberfläche und mit vertretbarem Aufwand erzielbar sind.

1 Einleitung

Seit Januar 2004 wird die High Resolution Stereo Camera (HRSC, NEUKUM et al., 2004) im Rahmen der ESA Mission Mars Express zur Aufnahme der Marsoberfläche eingesetzt. HRSC ist ein Pushbroom-Mehrzeilensensor, der die Aufnahme von bis zu fünf in unterschiedlichen Beobachtungsrichtungen aufgenommenen panchromatischen Bildstreifen pro Orbit gestattet. Gleichzeitig werden Bilddaten in 4 Multispektralkanälen aufgezeichnet. Die Bodenauflösung erreicht bis zu 10 m/Pixel.

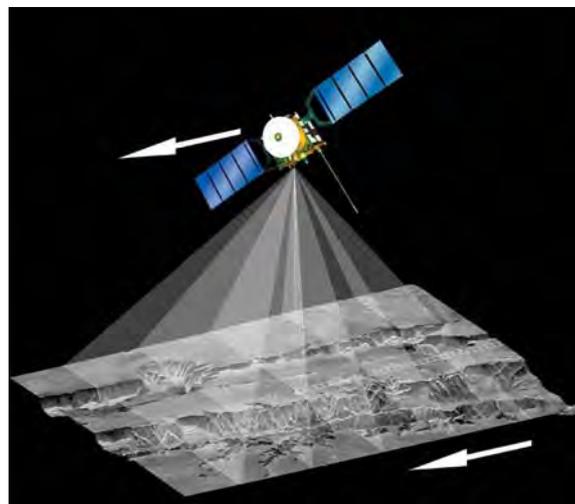


Abb. 1: Aufnahmeprinzip der High Resolution Stereo Camera (HRSC).

¹ M.A. Dipl.-Geol. KLAUS GWINNER, Dipl.-Ing. FRANK SCHOLTEN, Dr. BERND GIESE, Dr. JÜRGEN OBERST, Dr. RALF JAUMANN, Institut für Planetenforschung, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), 12489 Berlin, Tel.: ++49-30-67055-310, e-mail: Klaus.Gwinner@dlr.de

² Dipl.-Ing. MICHAEL SPIEGEL, Photogrammetrie und Fernerkundung, Technische Universität München, 80333 München

³ Dipl.-Ing. RALPH SCHMIDT, Institut für Photogrammetrie und GeoInformation, Universität Hannover, 30167 Hannover

⁴ Prof. Dr. GERHARD NEUKUM, Freie Universität Berlin, Fernerkundung der Erde und der Planeten, 12249 Berlin

2 DGM-Generierung

Die Oberflächenrekonstruktion aus den panchromatischen Bilddaten kann sich auf die Vorteile des Mehrfachstereo-Verfahrens stützen, nämlich verbesserte Zuverlässigkeit, Qualitätskontrolle und Automatisierbarkeit durch günstige Sichtbarkeitsbedingungen und überbestimmte Objektpunkte. Das Pushbroom-Verfahren gewährleistet außerdem eine zeitnahe Aufzeichnung aller Stereobeobachtungen.

Zur stereophotogrammetrischen Auswertung von HRSC-Daten wurde am DLR ein umfangreiches, auf Vorarbeiten an der TU Berlin aufbauendes Softwaresystem, entwickelt (SCHOLTEN et al., 2005). Es umfasst Prozeduren zur digitalen Bildkorrelation, Objektpunktbestimmung, DGM-Interpolation und Orthorektifizierung. Die Ableitung von digitalen Höhenmodellen kann auf verbesserten Daten der äußeren Orientierung aufbauen, die mit an der TU München und der Universität Hannover entwickelten Verfahren zur Bündelausgleichung und Bestimmung von Verknüpfungspunkten abgeleitet werden (SCHMIDT et al., 2005; SPIEGEL et al., 2005).

Die Ableitung von Digitalen Geländemodellen (DGM) aus HRSC-Daten unterliegt einer Vielzahl von veränderlichen Einflussfaktoren, die mit Eigenschaften der Oberfläche des Planeten und seiner Atmosphäre sowie mit den technischen Merkmalen des Aufnahmesystems verknüpft sind. So wirken sich z.B. Kontrastverluste durch örtliche Zunahme der optischen Dicke der Atmosphäre unmittelbar auf die Kompressionseigenschaften der Bilddaten aus. Darüber hinaus liegen unterschiedliche Qualitäten der Daten zur äußeren Orientierung vor sowie eine beträchtliche Variationsbreite der nominellen Bodenauflösung.

Infolge dessen erscheint für die Erstellung hochauflösender Geländemodelle mit standardisierten Qualitätsmerkmalen die Verwendung adaptiver Verarbeitungskomponenten sinnvoll. Daneben kommt der Definition von geeigneten Qualitätsparametern zur Steuerung automatischer Verarbeitungsabläufe und für die Produktkontrolle große Bedeutung zu. Vor diesem Hintergrund durchgeführte Untersuchungen anhand von Testreihen zu unterschiedlichen Verarbeitungsvarianten dienen neben der Definition optimierter Verarbeitungsprozeduren auch einer eingehenderen Beurteilung der Potenziale, die HRSC für die Ableitung hochauflösender DGM der Marsoberfläche bietet. Bei den Testreihen wurde unter anderem auch die Verwendung eines adaptiven Verfahrens zur Tiefpassfilterung mit variabler Bandbreite (GWINNER et al., 2005) erprobt.

3 DGM-Analyse und Ergebnisse

Im Zentrum des Interesses steht bei diesen Untersuchungen die innere Genauigkeit der Modelle, die sich in erster Linie aus der räumlichen Dichte und relativen Genauigkeit der abgeleiteten Objektpunkte ergibt und z.B. Vollständigkeit, Detailreichtum und morphologische Formtreue der Oberflächenbeschreibung betrifft. Aspekte der Absolutgenauigkeit in bezug auf ein geodätisches Referenzsystem werden z.B. in SPIEGEL et al. (2005) behandelt. Die Ergebnisse werden anhand von verarbeitungsinternen Qualitätsparametern und durch Vergleich mit existierenden topographischen Daten des MOLA Experiments (Mars Orbiter Laser Altimeter; SMITH et al., 2003) beurteilt. An dieser Stelle kann nur eine zusammenfassende Darstellung der erzielten Ergebnisse gegeben werden. Eine ausführlichere Beschreibung findet sich in GWINNER et al. (2005).

Als Testdatensatz werden HRSC Stereodaten des ersten Missionsjahres aus 30 verschiedenen Orbits verwendet. Die Daten decken Gebiete mit unterschiedlichen Relieftypen (Graben-systeme, Flachländer, südliches Hochland, Schildvulkane) ab. Die Flächenabdeckung beträgt ca. 2 Mio. km², d.h. einige wenige Prozent der innerhalb der nominellen Missionsdauer erwarteten Abdeckung.

Für die Korrelation der HRSC-Bilder lässt sich bei Verwendung von durch Bündelausgleichung verbesserten Orientierungsdaten Subpixelgenauigkeit nachweisen: Die mittleren Objektpunktschnittfehler zeigen eine deutlich ausgeprägte lineare Korrelation mit der nominellen Bodenauflösung des Nadirkanals und betragen durchschnittlich 90 % der letzteren. Dies entspricht einer Schnittgenauigkeit von 36-64 % der mittleren Bodenauflösung aller 3 bzw. 5 Stereokanäle. Insgesamt bestätigen sich damit frühere Befunde zur grundsätzlichen Realisierbarkeit einer subpixelgenauen Korrelation JPEG-komprimierter Bilder (z.B. PARKES et al., 1991). Jedoch lässt sich die Hauptschwierigkeit bei der Bildzuordnung für HRSC im Erreichen einer flächenhaft und im Sinne von Mehrfachbeobachtungen möglichst vollständigen und fehlersicheren Bildzuordnung erkennen. In der überwiegenden Mehrheit der Fälle hat sich hier eine Vorverarbeitung der Bilddaten durch adaptive Tiefpassfilterung mit variabler Bandbreite als vorteilhaft erwiesen. Sie führt zur größten Vollständigkeit der Bildzuordnung, zum höchsten Akzeptanzgrad der Objektpunkte und zum höchsten Besetzungsgrad des DTM-Rasters (Prozentsatz von Rasterzellen, die mindestens einen Objektpunkt enthalten). Eine nicht adaptive Filterung mit konstanter Bandbreite erbringt im allgemeinen zwar eine gute Vollständigkeit der Bildzuordnung, führt aber häufig durch geringe Akzeptanz der Objektpunkte zu niedrigen Besetzungsgraden. Die Verwendung ungefilterter Daten führt mit deutlich geringerer Erfolgsrate beim Matching zu den kleinsten Besetzungsgraden.

Für die auf Basis der adaptiven Filterung erstellten DGM ergaben sich folgende Durchschnittswerte (und Bestwerte) für die wichtigsten internen Qualitätsmerkmale:

Vollständigkeit der Bildkorrelation:¹ **66% (95%)**
davon Mehrbildzuordnungen: 90% (97%)

Mittlerer Objektpunktschnittfehler:² **≥ 7 m,**
im Durchschnitt etwa 90% der Nadirauflösung

¹ bei geometrischer Vorkorrektur auf vierfache nominelle Nadirauflösung

² mit verbesserten Orientierungsdaten

Die Erzeugung von DGM mit Auflösungen von bis zu 50 m scheint angesichts der erzielten Punktgenauigkeiten und Besetzungsgrade für große Bereiche der Marsoberfläche realisierbar zu sein.

4 Beispiele

Abb. 2 zeigt ein Produktbeispiel für ein hochauflösendes HRSC-Geländemodell sowie die Verbesserung der Geländedarstellung im Vergleich zum MOLA-DGM. Die Stereodaten wurden in Orbit 1070 mit einer Bodenauflösung von ca. 11 m/Pixel (Nadirkanal) aufgezeichnet, also etwa mit der maximalen Bodenauflösung. Ein weiteres Beispiel (Abb. 3) zeigt dagegen den Fall einer Bildsequenz mit für HRSC auf Mars Express ungewöhnlich niedriger Bodenauflösung (ca. 58 m/Pixel für den Nadirkanal). Es ist erkennbar, dass selbst in diesem Fall noch eine zu MOLA insgesamt gleichwertige Repräsentation der Marsoberfläche erzielbar ist. Auch hier sind lokal (z.B. an den Abhängen der Valles Marineris) im HRSC-DGM zusätzliche morphologische Details erkennbar.

Die Höhendifferenzen zwischen beiden DGM liegen zumeist unterhalb 100 m. Größere Differenzen von bis zu wenigen hundert Metern sind in der Regel mit durch Interpolation geschlossenen Datenlücken (in beiden Datensätzen) verbunden.

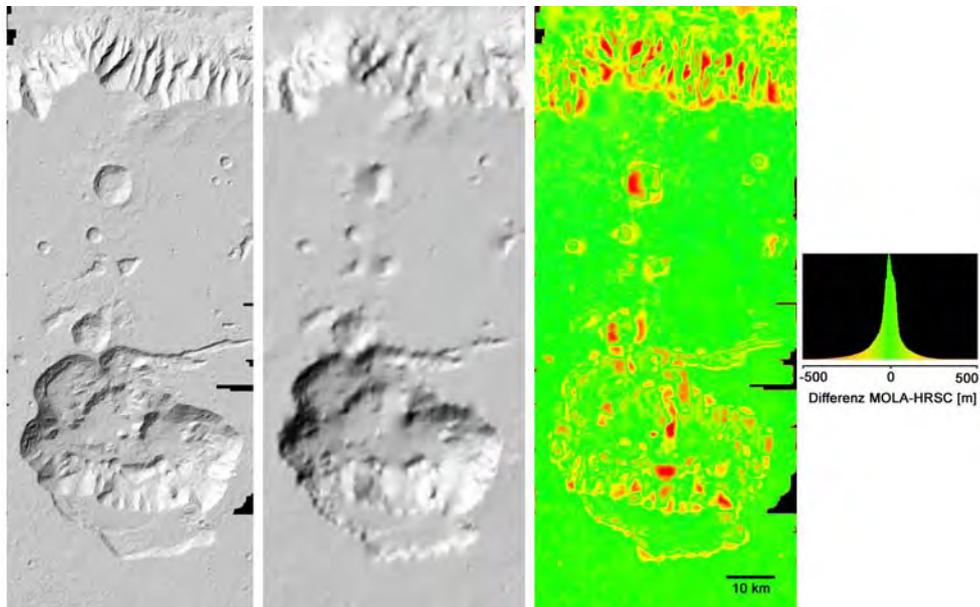


Abb. 2: Juventae Chasma, schattierte Ansicht von HRSC-DGM (50m-Raster, Orbit 1070, links) und MOLA-DGM (Mitte). Rechts: Differenzbild MOLA-HRSC mit Histogramm. Farbkodierung in Histogramm und Differenzbild sind identisch (siehe CDROM-Version für Farbdarstellung).

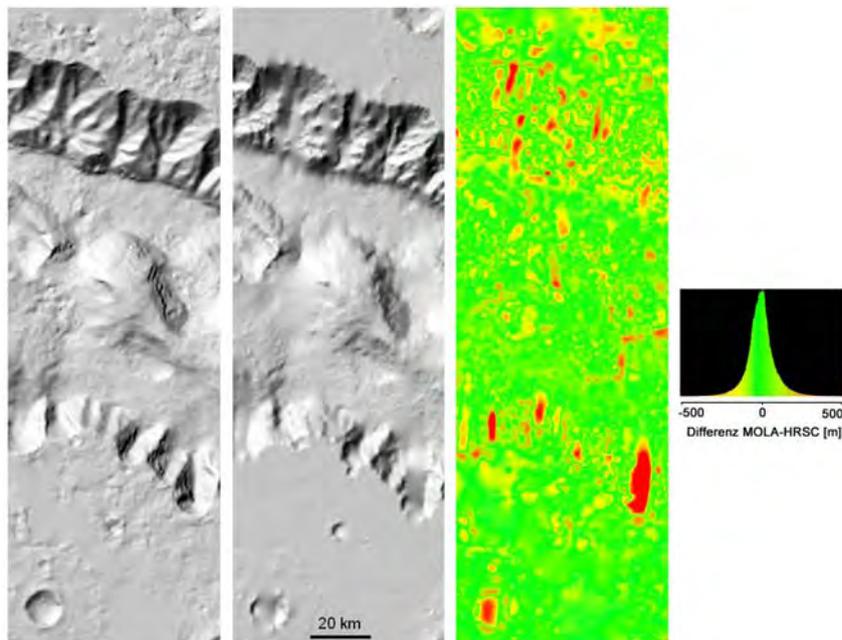


Abb. 3: Candor Chasma (Valles Marineris), schattierte Ansicht von HRSC-DGM (175m-Raster, Orbit 0515, links) und MOLA-DGM (Mitte). Rechts: Differenzbild MOLA-HRSC mit Histogramm. Farbkodierung in Histogramm und Differenzbild sind identisch (siehe CDROM-Version für Farbdarstellung). Beispiel für einen HRSC-Datensatz mit ungewöhnlich niedriger Bodenauflösung.

5 Literaturverzeichnis

- GWINNER, K., SCHOLTEN, F., SPIEGEL, M., SCHMIDT, R., GIESE, B., OBERST, J., JAUMANN, R., NEUKUM, G. & HRSC CO-INVESTIGATOR TEAM, 2005: Hochauflösende Digitale Geländemodelle auf der Grundlage von Mars Express HRSC-Daten. - Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation, **5**, eingereicht.
- NEUKUM, G., JAUMANN, R. & HRSC Co-Investigator Team, 2004: HRSC – The High Resolution Stereo Camera of Mars Express. - ESA Special Publications, 1240.
- PARKES, S.M., ZEMERLY, M.J.A. & MULLER, J.-P., 1991: Image Data Compression and its Effects on Stereo Height Extraction Processing. - Proc. IGARSS 91: S. 1449-1452.
- SCHMIDT, R., HEIPKE, C., BRAND, R., NEUKUM, G. & HRSC CO-INVESTIGATOR TEAM, 2005: Automatische Bestimmung von Verknüpfungspunkten in HRSC-Bildern der Mars Express Mission. - Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation, **5**, eingereicht.
- SCHOLTEN, F., GWINNER, K., ROATSCH, T., MATZ, K.-D., WÄHLISCH, M., GIESE, B., OBERST, J., JAUMANN, R., NEUKUM, G. & HRSC CO-INVESTIGATOR TEAM, 2005: Mars Express HRSC Data Processing. - Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, im Druck.
- SMITH, D., NEUMANN, G., ARVIDSON, R. E., GUINNESS, E. A. & SLAVNEY, S., 2003: Mars Global Surveyor Laser Altimeter Mission Experiment Gridded Data Record. NASA Planetary Data System, MGS-M-MOLA-5-MEGDR-L3-V1.0.
- SPIEGEL, M., STILLA, U., GIESE, B., NEUKUM, G. & HRSC CO-INVESTIGATOR TEAM, 2005: Bündelblockausgleichung von HRSC-Bilddaten mit Mars Observer Laser Altimeter-Daten als Passinformation. - Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation, **5**, eingereicht.

BIRD – Wegbereiter für das zukünftige IR Element der ESA

**DIETER OERTEL, WINFRIED HALLE, ECKEHARD LORENZ, WOLFGANG SKRBEK,
HOLGER VENUS, INGO WALTER, BORIS ZHUKOV, Berlin & MARTIN WOOSTER, London**

Zusammenfassung: Der Mikro-Satellit zur Bi-spektralen IR Detektion (BIRD) des Deutschen Zentrums für Luft und Raumfahrt (DLR) wurde im Oktober 2001 gestartet, und er wurde 2003 erfolgreich eingesetzt als semi-operationeller Demonstrator eines innovativen Sensorsystems im Rahmen einer Feuer-Detektions- und -Monitoring-Kampagne im ESA-Projekt FUEGOSAT. Das BIRD-Hot-Spot-Recognition-System erlaubt es, Hochtemperaturereignisse mit einer abgesandten Strahlungsleistung ab 1 Megawatt (MW) aufwärts zuverlässig zu erkennen und zu bewerten. Ein quantitativer Vergleich zeigt, dass das BIRD-Hot-Spot-Recognition-System um eine Größenordnung empfindlicher ist, als andere verfügbare Weltraumsensoren, die zur Fernerkundung aktiver Feuer genutzt werden. Die BIRD-Mission generell, und ihr Hot-Spot-Recognition-System im Speziellen, sind Wegbereiter für den zukünftigen Feuer-Detektions- und -Monitoring-IR-Sensor, das so genannte IR-Element, vorgesehen als mehrfach einzusetzender Nutzlast-Passagier auf den geplanten ESA-Satelliten „Sentinel 2“ und „Sentinel 3“, die Bestandteil der Weltraumkomponente der europäischen Initiative zu Global Monitoring for Environment and Security (GMES) sind.

Einleitung

Hochtemperaturereignisse (HTE) auf der Erdoberfläche verursachen sehr oft Umweltkatastrophen. Solche HTE sind Wald- und Torfbrände, wilde Brände von Kohle, Vulkantätigkeiten und anderes (z.B. Brände von Ölquellen, Pipelines usw.). Vegetations- und Torffeuer sind eine der Hauptquellen von Kohlenstoffemissionen in die Atmosphäre. Es gibt große Unsicherheiten in Schätzungen der Kohlenstoffemissionen von unkontrollierten Bränden (wildfires), wenn aus *a posteriori* gewonnenen Satellitendaten zur Brandfläche dann die verbrannte Masse abgeleitet wird. Alternative Methoden sind in Entwicklung, um Kohlenstoffemissionen aktiver Brände mit infraroten Satellitendaten zu überwachen.

Das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) hat, nach einer Machbarkeitsstudie (JAHN u. a., 1995) und experimentellen Vorarbeiten, einen Mikrosatelliten zur Bi-spektralen InfraRot-Detektion (BIRD) in Berlin-Adlershof entwickelt, gebaut, getestet und kalibriert. BIRD wurde am 22.10.2001 mit zwei weiteren Satelliten mit einer indischen Rakete, dem Polar Satellite Launch Vehicle (PSLV), in eine sonnensynchrone polare Umlaufbahn in 600 km Höhe gestartet (BRIESS u. a., 2003). BIRD hat zwischen November 2001 und Februar 2004 infrarote Datensätze von HTE auf allen Kontinenten (außer der Antarktis) gewonnen, die in ihrer radiometrischen und räumlichen Auflösung einmalig sind. Das ist z. B. in den Veröffentlichungen von ZHUKOV u. a. (2003), OERTEL u. a. (2004a), OERTEL u. a. (2004b), ZHUKOV u. a. (2005) dargestellt. BIRD demonstrierte sehr erfolgreich das Potential kompakter IR-Sensoren, die nach dem Pushbroom-Prinzip funktionieren, zur hochaufgelösten Detektion und Bewertung von HTE, wie ausführlich beschrieben im DLR-Forschungsbericht FB 2005-04 (2005). BIRD wurde 2003 im ESA-Projekt FUEGOSAT sehr erfolgreich als Demonstrator eines neuen Feuersensorsystems eingesetzt LORENZ u. a. (2003). Im Ergebnis wird BIRD und sein IR-System als Wegbereiter für den geplanten „Feuer-Detektions- und Monitoring-IR-Sensor“, genannt *IR-Element*, der ESA-Weltraumkomponenten für Global Monitoring for Environment and Security (GMES) betrachtet.

Verfügbare Weltraumsensoren für die Erkundung von Hochtemperaturereignissen

BIRD ist bislang weltweit das einzige System zur dedizierten Fernerkundung von HTE. Es gibt allerdings mehrere nicht speziell für die Feuerfernerkundung entwickelte Sensorsysteme auf Satelliten zur Erdbeobachtung, die für die Detektion von HTE „mit benutzt“ werden. Tabelle 1 zeigt eine verdichtete Beurteilung der derzeit für die Fernerkundung von HTE verwendeten Sensoren, die alle über einen 4- μm -Kanal verfügen, im Hinblick auf zwei entscheidende Parameter für die Detektion und Bewertung von HTEs:

- Minimale Fläche eines 800 K heißen HTEs, welches noch detektiert werden kann, wobei zwei Schwellen für die HTE-Pixeltemperatur im 4- μm -Kanal angenommen werden: 12 oder 6 K über der Hintergrund-Pixeltemperatur,
- Sättigungsfläche eines 800 K heißen HTEs.

Tab. 1: Detektions- und Sättigungsschwellen der 4- μm -Kanäle von derzeit verfügbaren Weltraumsensoren, bezogen auf die Fläche eines 800 K heißen Hochtemperaturereignisses (HTE)

SENSOR	Beobachtung am Tag		Beobachtung bei Nacht	
	Min. detektierbare Fläche eines 800 K HTEs (für 12/6 K über der Hintergrundtemperatur)	Fläche eines 800 K HTEs die zur Sättigung führt	Min. detektierbare Fläche eines 800 K HTEs (für 12/6 K über der Hintergrundtemperatur)	Fläche eines 800 K HTEs die zur Sättigung führt
AVHRR	500/225 m ²	670 m ²	170/75 m ²	1300 m ²
VIRS	1350/850 m ²	1880 m ²	650/285 m ²	3760 m ²
MODIS	430/230 m ²	66400 m ²	190/85 m ²	66800 m ²
HSRS /BIRD	50/30 m ²	32100 m ²	23/10 m ²	42700 m ²
SEVIRI (MSG)	10300/4650 m ²	40500 m ²	4360/1910 m ²	51600 m ²
VAS (GOES)	4000/2100 m ²	11000 m ²	1570/690 m ²	16200 m ²

- # AVHRR - Advanced Very High Resolution Radiometer auf Satelliten der National Ocean & Atmosphere Administration (NOAA),
- # VIRS - Visible and InfraRed Scanner der Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM),
- # MODIS - Moderate Resolution Imaging Spectro-radiometer auf den Satelliten "Terra" and "Aqua" des Earth Observing System (EOS) der NASA,
- # HSRS - Hot Spot Recognition System auf dem BIRD(Bi-spectral Infrared Detection)-Satelliten (Experimentalmission),
- # SEVIRI – Spinning Enhanced Visible and InfraRed Imager auf dem geostationären Satelliten Meteosat Second Generation (MSG) von Eumetsat,
- # VAS - Visible Infrared Spin Scan Radiometer Atmospheric Sounder auf den GOES-Satelliten der NOAA.

Tabelle 1 zeigt, dass die niedrig umlaufenden Satellitensensoren AVHRR, VIRS, MODIS und HSRS/BIRD über eine unterschiedliche Dynamik zwischen ihren jeweiligen Detektions- und Sättigungsschwellen der 4- μm -Kanäle bei Nachtbeobachtungen verfügen. Bei Beobachtungen tagsüber (Vegetationsfeuer brennen nachmittags am heftigsten) haben nur MODIS und HSRS/BIRD eine hinreichende radiometrische Dynamik, um neben der Detektion auch eine quantitative Bewertung der HTEs zu ermöglichen. Die geostationären Satellitensensoren VAS und SEVIRI sind unempfindlich gegenüber kleinen und mittleren Feuern und verfügen für Feuerbeobachtungen am Tag nur über eine eingeschränkte Dynamik. Daraus folgt, dass

die IR-Daten von AVHRR, VIRS, SEVIRI und GOES (a) zur Erkennung des Auftretens von Feuern (“fire occurrence”) bei Tag und bei Nacht benutzt werden können und (b) eine limitierte Feuerbewertung bei Nacht aber fast keine bei Tag gestatten.

Komplementarität von Scannertypen in der Feuerfernerkundung

Ziel dieses Kapitels ist es, zu zeigen, wie sich zwei im Wirkprinzip unterschiedliche IR-Sensorsysteme bei Detektion und quantitativer Analyse von Feuern aus niedrigen Erdumlaufbahnen (Bahnhöhe < 1000 km) ergänzen, nämlich der

- Whiskbroom(Fegebesen)-Scannertyp mit kurzer Pixelverharrungszeit („dwell time“) und meist weitem Aufnahmeschwad, und
- Pushbroom(Schiebebesen)-Scannertyp mit langer Pixel-Dwell-Time, die eine Mehrfachbelichtung der Detektorzeilen innerhalb der dwell time erlaubt und damit eine hohe radiometrische Dynamik ermöglicht.

Das Hot Spot Recognition System (HSRS) und der Wide-Angle Optoelektronic Stereo Scanner (WAOSS-B) auf BIRD sind Pushbroom-Scanner. HSRS und WAOSS sind beschrieben in BRIESS u. a. (2003), WALTER u.a. (2003) und in OERTEL u. a. (2003).

Das MODerate resolution Imaging Spectro-radiometer (MODIS) ist ein typischer Whiskbroom-Scanner. Die beiden MODIS-Instrumente werden semi-operationell zu globaler Detektion/globalen Monitoring von HTE auf den US-amerikanischen Satelliten “Terra” (seit 2000) und “Aqua” (seit 2002) verwendet. Die MODIS-Instrumente, die auch globale Land-, Ozean-, und Atmosphären-Daten liefern, sind derzeit die “Arbeitspferde” der globalen Feuerfernerkundung. Die MODIS-Level2-Datenprodukte MOD14 (Terra) and MYD14 (Aqua) sind grundlegend für die Feuerdetektion mit mittlerer räumlicher Auflösung. Dabei wird jedem 1km-Pixel im MODIS-Schwad eine von neun Klassen zugeordnet, und zwar inklusive dreier Feuerklassen (gestaffelt nach verschieden hoher Detektionssicherheit). Der verwendete MODIS-Feuer-Detektions-Algorithmus ist im Detail beschrieben in GIGLIO u. a. (2003). Tab. 2 enthält die für die Feuerfernerkundung wichtigsten Parameter von MODIS und den BIRD-IR-Sensoren.

Tab. 2: Hauptparameter von MODIS und den BIRD-IR-Sensorkanälen die für die Feuerfernerkundung relevant sind

	MODIS, Terra und Aqua	HSRS & WAOSS-B-Nadir- Kanal, BIRD
Spektrale Kanäle benutzt für Feuerbeobachtung	MIR: 3,9 – 4,0 μm TIR: 10,8 – 11,3 μm RED: 0,62 – 0,67 μm NIR: 0,84 – 0,88 μm	MIR: 3,4 – 4,2 μm TIR: 8,5 – 9,3 μm NIR: 0,84 – 0,90 μm
MIR-Kanal-Sättigung bei	500 K	600 K
Räumliche Auflösung (nadir)	1 km	370 m/185 m
Schwadbreite	2330 km	190 km
Wiederholperiode der Aufnahmen („re-visit time“)	12 h jeweils für Terra und Aqua	24 h (an max. 3 Tagen nacheinander für ausgewählte Gebiete)

MIR = Middle InfraRed (der „führende“ Kanal bei der Feuerfernerkundung)

TIR = Thermal InfraRed

NIR = Near InfraRed

MODIS und HSRS/BIRD sind weltweit die einzigen Satellitensensoren mit Middle-IR(MIR)- und Thermal-IR(TIR)-Kanälen, die von mittleren bis starken HTE nicht in die Sättigung betrieben werden. Das erlaubt - ZHUKOV u. a. (2005):

- die Anwendung von Algorithmen mit flexiblen Schwellen zur effizienten Unterdrückung von Falschalarmen,
- die Ableitung von quantitativen Parametern von HTEs, wie freigesetzte Strahlungsleistung (Fire Radiative Power /FRP/), effektive Feuertemperatur und effektive Feuerfläche, sowie
- einen innovativen Ansatz für die Abschätzung von verbrannter Biomasse und dem damit einhergehenden pyrogenen Kohlenstoffausstoß, der basiert auf (a) der Bestimmung der bei der Verbrennung freigesetzten Strahlungsleistung, die ein Maß für die Intensität der Verbrennung darstellt, und (b) der Ableitung der insgesamt nach oben abgestrahlten Energie eines Vegetationsfeuers (Fire Radiative Energy release /FRE/) während dessen aktiver Phase.

Die insgesamt von einem Biomassefeuer emittierte Strahlungsenergie (FRE), erlaubt eine Abschätzung der verbrannten Biomasse und der damit einhergehenden Emissionen von CO₂ und weiteren Treibhausgasen, sowie von Aerosolen - WOOSTER *u.a.* (2003). Die FRE wird aus der zeitlichen Integration der wiederholt bestimmten FRP abgeleitet. Zur Bestimmung der momentanen Strahlungsleistung FRP werden verwandt:

- die effektive Feuertemperatur T_F and effektive Feuerfläche A_F , oder
- das Signal des ungesättigten MIR-Kanals des Sensors (was hinreichend ist für Feuertemperaturen > 700 K, und nicht für schwelende Brände anwendbar ist).

Die Abb. 1 – 6 zeigen Ergebnisse der quantitativen Feuerbewertung aus nahezu simultan gewonnenen Aufnahmen von MODIS/Terra und HSRS/BIRD von Vegetationsbränden am Westufer des Baikalsees im Juli 2003, in Portugal im August 2003 und in Ostaustralien im Januar 2002.

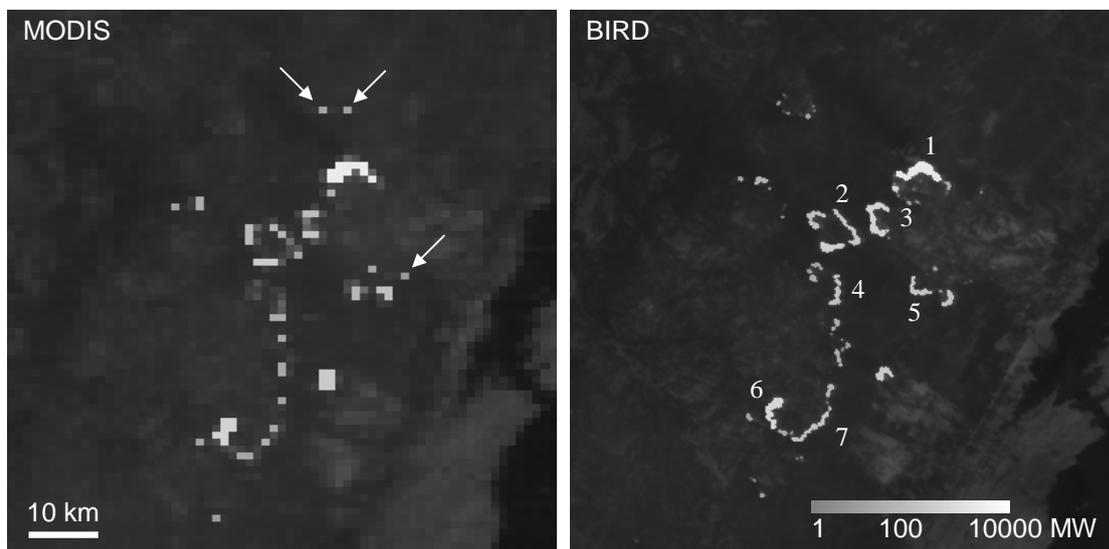


Abb. 1: Bildfragmente von borealen Waldbränden aufgenommen über dem Westufer des Baikals am 16. Juli 2003 mit MODIS/Terra (zu 4:21 GMT, links) und BIRD (zu 4:46 GMT, rechts); die detektierten Feuercluster sind in ihrer momentanen Strahlungsleistung (FRP) in Megawatt (MW) mit einem Graukeil skaliert und dem in schwarz-weiß gezeigten MIR(4 μ m)-Kanal-Hintergrundsignal überlagert; die zwei weißen Pfeile im linken Bild oben zeigen zwei offensichtliche Falschalarme im MODIS-Detektionsprodukt (MOD 14)

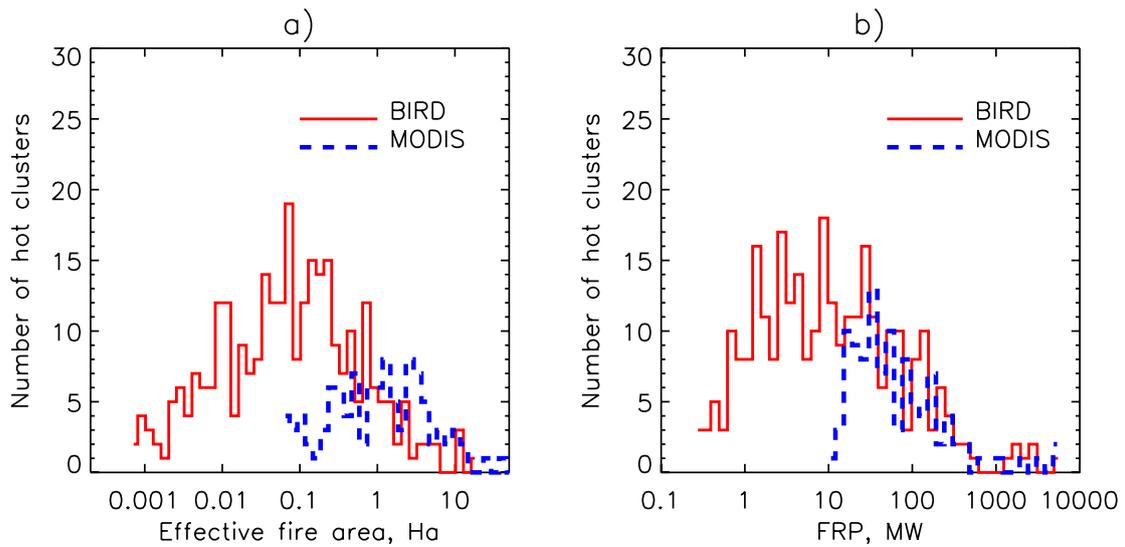


Abb. 2: Histogramme der Anzahl der Feuercluster in Abhängigkeit von (a) effektiver Feuerfläche A_F (in Ha) und (b) momentaner Strahlungsleistung FRP (in MW, rechts) jeweils abgeleitet aus drei zeitlich und räumlich zueinander passenden MODIS/Terra- und HRSR/BIRD-Aufnahmestreifen gewonnen über borealen Waldbränden in Sibirien in 2003; HRSR erkennt boreale Feuer ab einer effektiven Feuerfläche von ca. 10 m^2 ($0,001 \text{ Ha}$) und einer momentanen Strahlungsleistung von $0,3 \text{ MW}$; MODIS erkennt boreale Feuer erst ab einer effektiven Feuerfläche von ca. 500 m^2 ($0,05 \text{ Ha}$) und einer momentanen Strahlungsleistung von 10 MW .

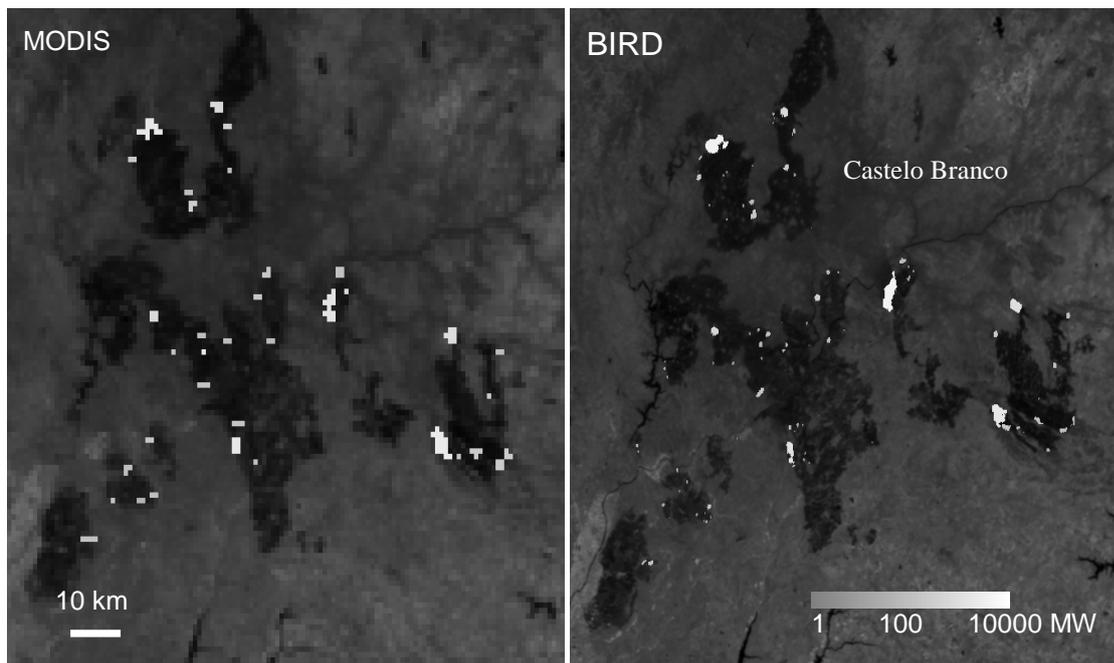


Abb. 3: Bildfragmente von Waldbränden in Zentralportugal aufgenommen am 4. August 2003 mit MODIS/Terra (zu 11:30 GMT, links) und BIRD (zu 12:04 GMT, rechts); die detektierten Feuercluster sind in ihrer momentanen Strahlungsleistung (FRP) in Megawatt (MW) mit einem Graukeil skaliert und dem schwarz-weiß gezeigten NIR($0,86 \mu\text{m}$)-Kanal-Hintergrundsignal überlagert.

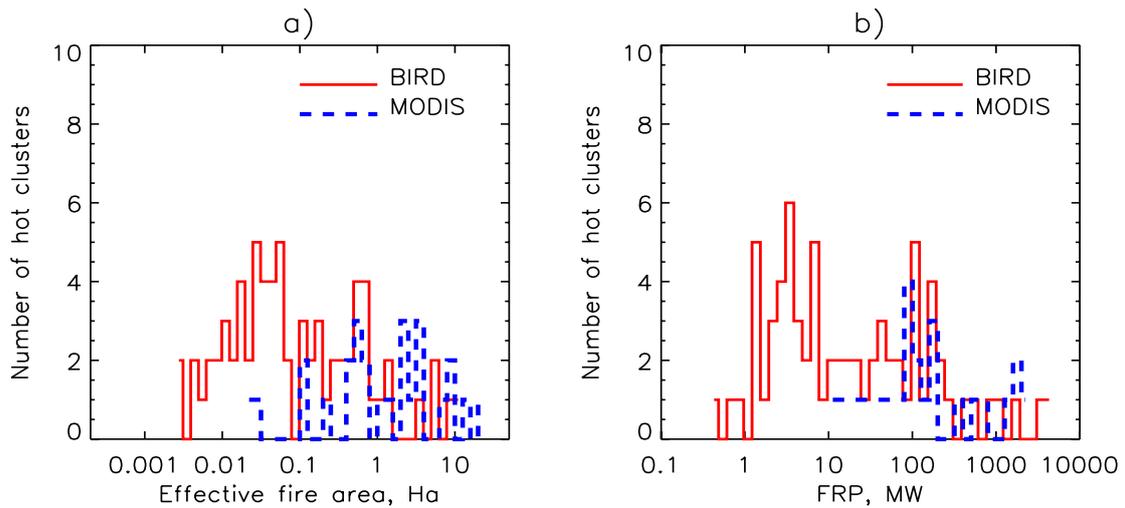


Abb. 4: Histogramme der Anzahl der Feuercluster in Abhängigkeit von (a) effektiver Feuerfläche A_F (in Ha) und (b) momentaner Strahlungsleistung FRP (in MW, rechts), jeweils abgeleitet aus zeitlich und räumlich zueinander passenden MODIS/Terra- und HRSR/BIRD-Aufnahmestreifen gewonnen über Zentralportugal am 4. August 2003; HRSR erkennt mediterrane Feuer ab einer effektiven Feuerfläche von ca. 20 m^2 ($0,002 \text{ Ha}$) und einer momentanen Strahlungsleistung von $0,5 \text{ MW}$; MODIS erkennt mediterrane Feuer erst ab einer effektiven Feuerfläche von ca. 200 m^2 ($0,02 \text{ Ha}$) und einer momentanen Strahlungsleistung von 10 MW .

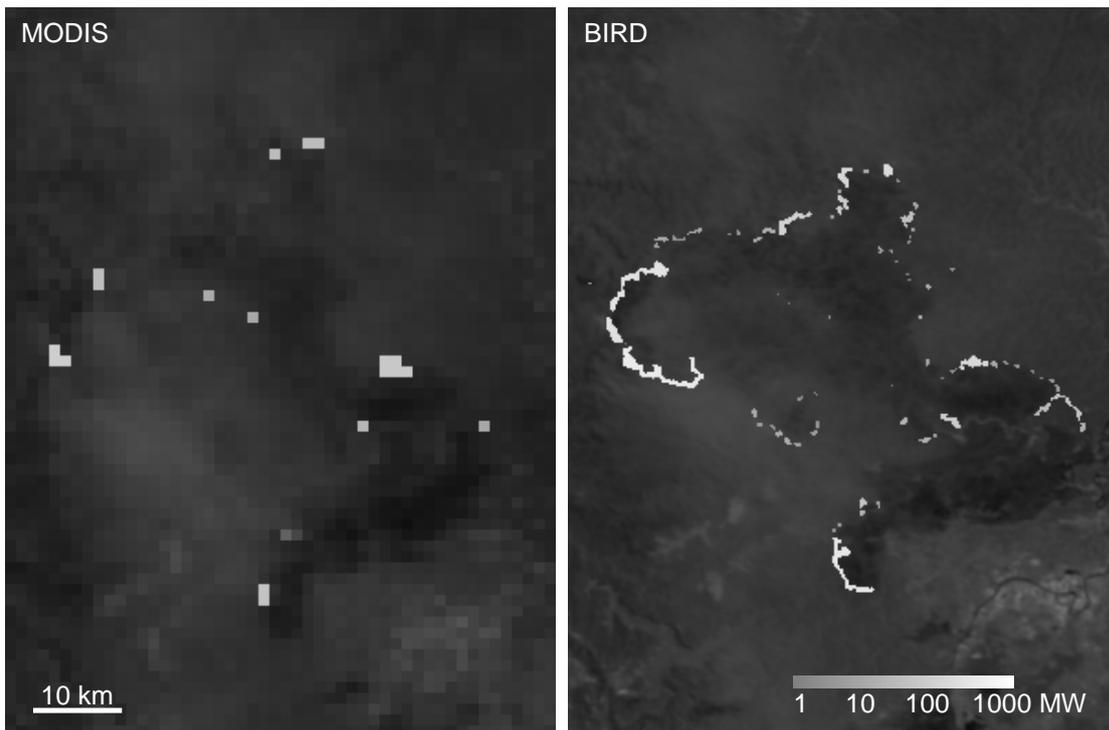


Abb.5: Bildfragmente von Buschbränden in Ostaustralien bei Sydney, aufgenommen am 5. Januar 2002 mit MODIS/Terra (zu 0:22 GMT, links) und BIRD (zu 0:08 GMT, rechts); die detektierten Feuercluster sind in ihrer momentanen Strahlungsleistung (FRP) in Megawatt (MW) mit einem Graukeil skaliert und dem schwarz-weiß gezeigten NIR($0,86 \mu\text{m}$)-Kanal-Hintergrundsignal überlagert.

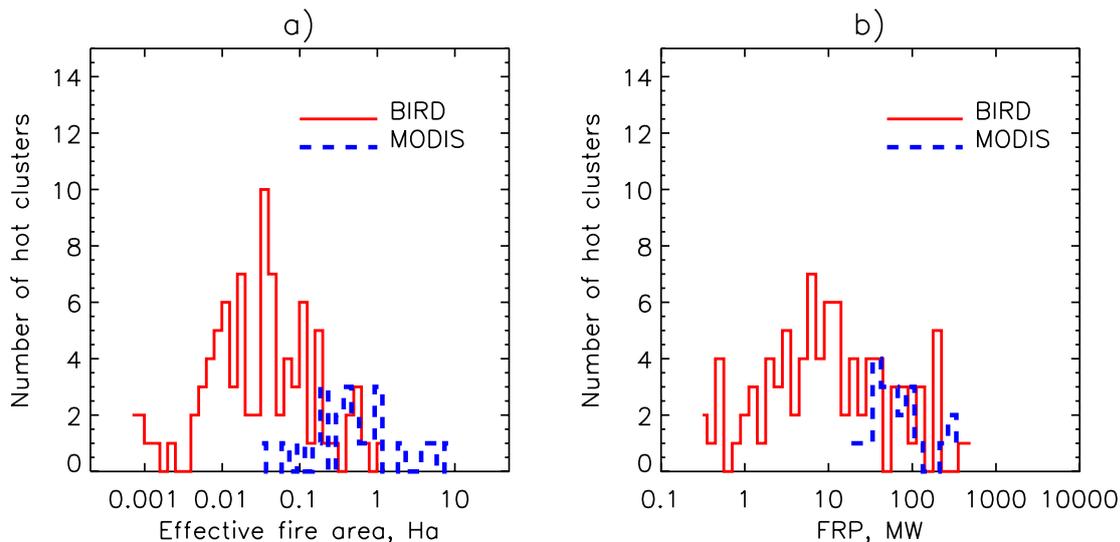


Abb. 6: Histogramme der Anzahl der Feuercluster in Abhängigkeit von (a) effektiver Feuerfläche A_F (in Ha) und (b) momentaner Strahlungsleistung FRP (in MW, rechts), jeweils abgeleitet aus zeitlich und räumlich zueinander passenden MODIS/Terra- und HRSR/BIRD-Aufnahmestreifen gewonnen am 5. Januar über Ostaustralien (bei Sydney) im Januar 2002; HRSR erkennt diese Buschfeuer ab einer effektiven Feuerfläche von ca. 10 m^2 ($0,001 \text{ Ha}$) und einer momentanen Strahlungsleistung von $0,3 \text{ MW}$; MODIS erkennt diese Buschfeuer erst ab einer effektiven Feuerfläche von ca. 300 m^2 ($0,03 \text{ Ha}$) und einer momentanen Strahlungsleistung $> 10 \text{ MW}$.

Tab. 3 enthält die Anzahl der detektierten Feuercluster und die kumulative Strahlungsleistung der zeitlich und räumlich zueinander passenden Aufnahmestreifen von BIRD und MODIS/Terra für die drei ausgewählten Szenen (Baikal, Portugal, Ostaustralien). Obwohl MODIS weniger als die Hälfte (59) der von BIRD detektierten Feuer (162) am Baikal erkennt, weicht die aus MODIS-Daten bestimmte kumulative Strahlungsleistung nur 4 % von der aus den BIRD-Daten bestimmte FRP ab. Für die Portugal-Feuerszene führt die Nutzung der MODIS-Daten zu einer 13-%igen Unterschätzung gegenüber der mit BIRD-Daten berechneten kumulativen FRP, und für die ostaustralische Feuerszene führt die Nutzung der MODIS-Daten zu einer 44-%igen Unterschätzung gegenüber der mit BIRD-Daten berechneten kumulativen FRP.

Tab. 3: Anzahl der detektierten Feuercluster und deren kumulativer Strahlungsleistung (FRP) bestimmt aus BIRD and MODIS/Terra-Daten für die in den Abb. 1, 3 und 5 gezeigten Szenen; (das FRP-Konfidenzintervall der geschätzten Strahlungsleistung ist in Klammern angegeben)

Szene	Anzahl der detektierten Feuer-cluster		Kumulative Strahlungsleistung (FRP), in Gigawatt	
	BIRD	MODIS	BIRD	MODIS
West-Baikal, 16. Juli 2003	162	59	11.5 (10.7-11.5)	11.9 (10.7-12.0)
Portugal, 4. August 2003	99	35	15.5 (15.0-15.8)	12.0 (10.8-12.1)
Ostaustralien, 5 January 2002	227	34	5.2 (5.1-5.3)	2.9 (2.6-3.0)

Grund für diese Unterschiede in der BIRD und MODIS bezogenen Bestimmung der kumulativen FRP ist vermutlich die Tiefe der Feuerfronten und die Intensität der Verbrennung. Breite Feuerfronten sind typisch in borealen Zonen (z. B. am Baikal). Enge aber sehr heiße Feuerfronten sind dagegen typisch für die ostaustralischen Eukalyptus-Buschfeuer.

Schlussfolgerungen

Die vergleichenden Analysen von MODIS- und BIRD-Feuerdaten, sowie aktuelle Nutzerbefragungen zeigen: Gebraucht wird ein operationeller Weltraumsensor, der weltweit Feuer-Informationsprodukte bereitstellt mit

- der räumlichen und radiometrischen Auflösung des BIRD-Hot-Spot-Recognition-Systems (HSRS) und
- der flächenhaften und zeitlichen Abdeckung von MODIS auf Terra und Aqua (globale Überdeckung 4 x pro Tag).

Die im DLR in der BIRD-Mission gewonnenen und der Europäische Raumfahrtagentur (ESA) in mehreren Studien verfügbar gemachten Erfahrungen in der räumlich und radiometrisch hochauflösenden Feuerfernerkundung bereiteten den Weg für ein neues dediziertes Feuer-Sensorsystem: das **IR-Element** als Bestandteil der Weltraumkomponente der europäischen Initiative zu Global Monitoring for Environment and Security (GMES), vorgesehen als mehrfach einzusetzender Nutzlast-Passagier auf den operationellen ESA Satelliten „Sentinel 2“ und „Sentinel 3“ – FIRE MONITORING INFRARED PAYLOAD (2004).

Literaturverzeichnis

- JAHN, H., BRIESS, K. & GINATI, A., 1995: Fire recognition System for Small Satellites FIRES, Phase-A Study, DLR-Berlin, OHB-System-Bremen.
- BRIESS, K., JAHN, H., LORENZ, E., OERTEL, D., SKRBEK, W. & ZHUKOV, B., 2003: Remote Sensing Potential of the Bi-spectral InfraRed Detection (BIRD) Satellite. - Int. J. Remote Sensing, **24**, 865-872.
- ZHUKOV, B., BRIESS, K., LORENZ, E., OERTEL, D. & SKRBEK, W., 2003: BIRD Detection and Analysis of High-temperature Events: First Results. - Proc. SPIE, 4886, 160-171.
- OERTEL, D., BRIESS, K., LORENZ, E., SKRBEK, W. & ZHUKOV, B., 2004a: Detection, monitoring and quantitative analysis of wildfires with the BIRD satellite. - Proc. SPIE, 5232, 208-218.
- OERTEL, D., ZHUKOV, B., THAMM, H-P., ROEHRIG, J. & ORTHMANN, B., 2004b: Space-borne high resolution fire remote sensing in Benin West Africa. - Int. J. Remote Sensing, **25**, 2209-2216.
- LORENZ, E., BRIESS, K., HALLE, W., OERTEL, D., SKRBEK, W. & ZHUKOV, B., 2003: Objectives and Results of the BIRD Mission. - Proc. of SPIE, 5151, 586-598.
- ZHUKOV, B., BRIESS, K., LORENZ, E., OERTEL, D. & SKRBEK, W., 2005: Detection and analysis of high-temperature events in the BIRD mission. - Acta Astronautica, **56**, 65-71.
- GIGLIO, L., DESCLOITRES, J., JUSTICE, C. O. & KAUFMAN, Y. J., 2003: An Enhanced Contextual Fire Detection Algorithm for MODIS. - Remote Sens. Environm., **87**, 273-282.
- WALTER, I., BRIESS, K., BAERWALD, W., SKRBEK, W. & SCHRANDT, F., 2003: The BIRD Payload Platform, - Proc. SPIE, 4881, 460-471.
- WOOSTER, M., ZHUKOV, B. & OERTEL, D., 2003: Fire radiative energy release for quantitative study of biomass burning: derivation from the BIRD experimental satellite and comparison to MODIS fire products. - Remote Sens. Environm., **86**, 83-107.
- ZHUKOV, B., LORENZ, E., OERTEL, D., WOOSTER, M. & ROBERTS, G., 2005: Experience of detection and quantitative characterisation of fires during the experimental small satellite mission BIRD, DLR Forschungsbericht FB 2005-04, in press
- FIRE MONITORING INFRARED PAYLOAD, 2004: Interface Control Document, ICD for IR Payload-issue 1, ESA, "Sentinel" Announcement of Opportunity.

Drei-Achsen-stabilisierte Picosatellitenplattform für Fernerkundungsaufgaben

Frank Baumann, Klaus Briß & Hakan Kayal,

Zusammenfassung: Picosatelliten bilden eine neue Satellitenklasse. Für Fernerkundungsaufgaben muss die Lage in allen drei Achsen präzise stabilisiert werden können. Schlüsselkomponenten der Lageregelung sind Reaktionsräder, die an der TU Berlin entwickelt wurden. Die Weltraumtauglichkeit dieser Reaktionsräder wird im Rahmen des Picosatellitenprojekts BEESAT verifiziert.

Picosatelliten

Eine beachtenswerte Entwicklung zeigt sich bei Satellitenplattformen mit kleinsten Abmessungen. Picosatelliten bilden eine neue Satellitenklasse, die durch eine Gesamtmasse des Satelliten von weniger als 1 kg gekennzeichnet ist. Picosatelliten können mit geringeren Kosten entworfen, gebaut, getestet und in den Orbit transportiert werden. Die Entwicklungszeiten sind kürzer als bei herkömmlichen Satelliten.

Zugleich ergeben sich neue Möglichkeiten, die mit größeren Satelliten nur aufwändig realisierbar sind. Hierzu zählen insbesondere Formationsflüge und Satellitenkonstellationen.

Basierend auf einer Initiative der California Polytechnic State University und der Stanford University wurde ein Standard für Picosatelliten festgelegt, der vorwiegend deren mechanische Eigenschaften beschreibt. So genannte CubeSats sind Picosatelliten in Würfelform mit einer Kantenlänge von 10 cm. Im Juni 2003 wurden die ersten CubeSats gestartet. Einige funktionieren noch heute. Derzeit arbeiten weltweit mehr als 40 Universitäten an der Entwicklung von Picosatelliten.

Von großer Bedeutung ist die Entwicklung neuer, für Picosatelliten geeigneter Komponenten und Systeme. Für Fernerkundungsaufgaben wird eine drei-Achsen-stabilisierte Plattform mit präziser Lageregelung benötigt. An der TU Berlin erfolgt in Zusammenarbeit mit einem Industriepartner die Entwicklung von Reaktionsrädern zur Erzeugung eines Drehmoments. In einem nächsten Schritt soll die Weltraumtauglichkeit dieser Reaktionsräder im Orbit verifiziert werden. Die Entwicklung weiterer Komponenten ist geplant.

Fernerkundung mit Picosatelliten

Für Picosatellitenanwendungen existieren zwei Zielrichtungen:

- 1) Ergänzung etablierter Anwendungen, die bisher mit größeren Satelliten realisiert wurden;
- 2) innovative Anwendungen, die sich nur mit Picosatelliten sinnvoll umsetzen lassen.

Die erste Zielrichtung lässt sich durch die Miniaturisierung von Komponenten und Systemen verfolgen. So könnten zum Beispiel Nutzlastdaten-Transmitter mit kleineren Abmessungen und geringerer elektrischer Leistungsaufnahme oder entfaltbare Optiken entwickelt werden.

Innovative Anwendungen können Formationsflüge oder Satellitenkonstellationen mit einer Vielzahl beteiligter Satelliten sein. Beispiele für diese Anwendungen sind: Erfassung des Weltraumwetters mit Hilfe zahlreicher Messpunkte (Messungen des Sonnenwinds und Änderungen in der Magnetosphäre) und Okkultationsmessungen. Im Formationsflug kann ein bestimmtes Gebiet der Erde häufiger beobachtet werden. Stereoskopische Aufnahmen mit einem größerem Basisabstand sind möglich. Des Weiteren könnten die einzelnen Satelliten miteinander kommunizieren und sich Aufgaben teilen. Picosatelliten sind flexibler einsetzbar. Der Ausfall eines einzelnen Picosatelliten kann leichter kompensiert werden.

Reaktionsräder für Picosatelliten

Viele Komponenten, die für Picosatelliten gebraucht werden, existieren entweder gar nicht oder nur mit beschränkter Leistungsfähigkeit. So sind die meisten verfügbaren Komponenten zur präzisen Lageregelung noch zu groß oder wegen ihrer großen Masse ungeeignet. Es ist aber absehbar, dass mit steigender Verfügbarkeit von entsprechenden Komponenten auch immer anspruchsvollere Missionen mit Picosatelliten möglich werden.

Für Fernerkundungsaufgaben wird eine präzise Lageregelung um alle drei Achsen benötigt. Bisherige Picosatellitenprojekte verwenden Magnetspulen oder Permanentmagneten zur Stabilisierung. Eine Lageregelung in Wechselwirkung mit dem Erdmagnetfeld ist jedoch auf Grund von schlecht vorhersagbaren Schwankungen zu ungenau. Bei größeren Satelliten kommen daher Reaktionsräder als Aktuatoren der Lageregelung zum Einsatz. Diese können sehr präzise Drehmomente erzeugen, die eine Lageänderung des Satelliten bewirken.

Für Picosatelliten ist diese Schlüsselkomponente zur Lageregelung bisher noch nicht verfügbar. Um diese Lücke zu schließen, wurden an der TU Berlin mit Förderung durch das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR FKZ 50JR0452) sowie in Zusammenarbeit mit der Firma Astro- und Feinwerktechnik Adlershof GmbH geeignete Reaktionsräder entwickelt (siehe Abb. 1).



Abb. 1: Reaktionsrad für Picosatelliten
(ohne Ansteuerelektronik)

Die Reaktionsräder haben einen Durchmesser von 20 mm, eine Höhe von 14 mm und eine Masse von 16 g. Sie werden von bürstenlosen Motoren angetrieben und können ein maximales Drehmoment von 4×10^{-5} Nm erzeugen. Die Abbildungen 2–4 verdeutlichen elektrische und dynamische Eigenschaften.

Aufbauend auf den Erfahrungen, die mit den ersten Prototypen gesammelt wurden,

sollen die Reaktionsräder und die Ansteuerelektronik verbessert und weltraumtauglich gemacht werden.

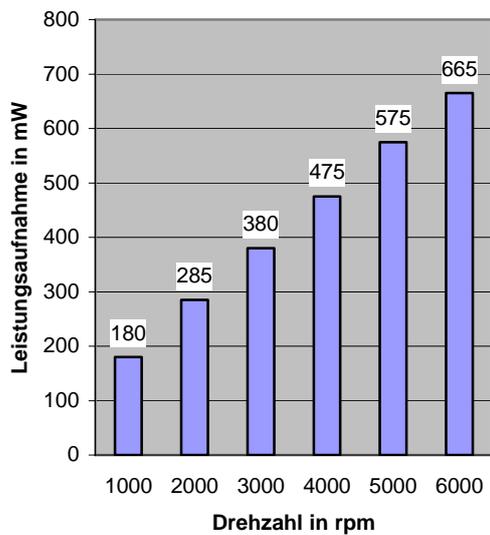


Abb. 2: Elektrische Leistungsaufnahme eines Reaktionsrades (inkl. Ansteuerelektronik) in Abhängigkeit von der Drehzahl

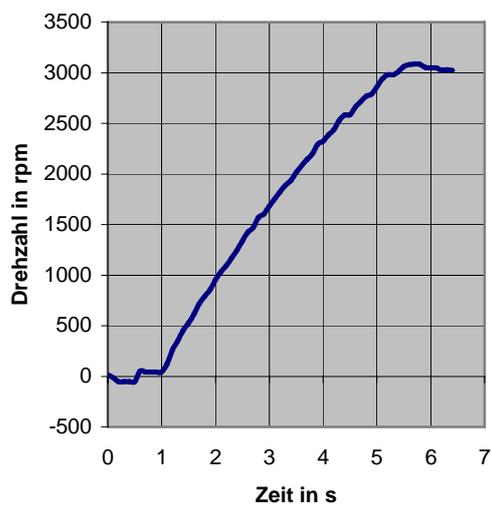


Abb. 3: Beispiel für das Beschleunigungsverhalten eines Reaktionsrades

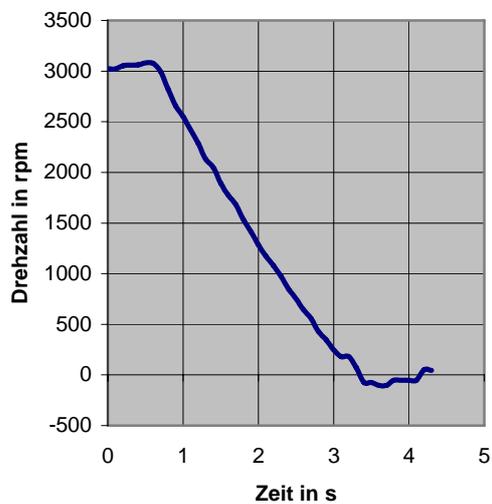


Abb. 4: Beispiel für das Abbremsverhalten eines Reaktionsrades

Picosatellitenprojekt BEESAT

An der TU Berlin werden seit über 15 Jahren Erfahrungen in der Entwicklung, im Bau und dem Betrieb von Kleinsatelliten gesammelt. Bisher wurden 6 Kleinsatelliten erfolgreich gestartet.

Die geringeren Kosten von CubeSats sind ideale Voraussetzungen für Entwicklungen im universitären Bereich. Studenten der Raumfahrttechnik und angrenzender Fachgebiete können im Rahmen ihrer Ausbildung an der Entwicklung von CubeSats mitwirken und in Teamarbeit neue Ideen und Konzepte verwirklichen.

Am Institut für Luft- und Raumfahrttechnik der TU Berlin wurde ein Picosatellitenprojekt begonnen, das den Bau eines CubeSats und dessen Betrieb im niedrigen Erdorbit (450 km ... 850 km) für mindestens ein Jahr zum Ziel hat. Dieses Projekt mit dem Namen „Berlin's Educational Experimental Satellite“ (BEESAT) befindet sich derzeit noch in der Definitionsphase. Missionsziele sind:

- die Verifikation der entwickelten Reaktionsräder im Weltraum,
- die Verifikation weiterer grundlegender Picosatellitentechnologien sowie
- die Ausbildung von Studenten.

Der Start des CubeSats ist für Anfang 2007 geplant. Abb. 5 gibt einen Überblick über die Subsysteme im BEESAT. Im Folgenden soll näher auf die einzelnen Subsysteme eingegangen werden.

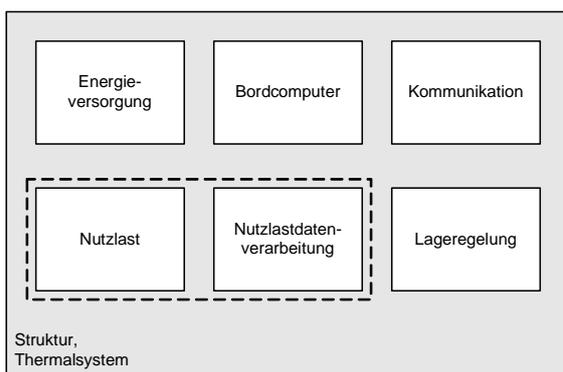


Abb. 5: Funktionale Systemübersicht von BEESAT

Energieversorgung

Elektrische Energie wird mit Solarzellen gewonnen. Geplant ist die Verwendung von GaAs-Zellen der Firma RWE mit einem Wirkungsgrad von 26 %. Sie werden an allen Außenflächen des CubeSats befestigt. Ein Ausklappmechanismus für Solar-Arrays ist im Rahmen dieses Projekts nicht vorgesehen.

Überschüssige elektrische Energie wird verwendet, um Lithium-Polymer-Zellen zu laden. Eine Power-Control-Unit (PCU) steuert die Verteilung elektrischer Energie per elektronischer Schalter auf die einzelnen Subsysteme und überwacht die Einhaltung konfigurierbarer Grenzwerte für die Leistungsaufnahme.

Solarzellen, Akkumulatoren, Power-Control-Unit, DC/DC-Wandler und Schalter werden redundant ausgelegt.

Bordcomputer

Die Aufgaben des Bordcomputers bestehen in der Überwachung und Steuerung der meisten Satellitenaktivitäten. Hierzu zählen insbesondere:

- Festlegung des Satelliten-Betriebsmodus',
- Energieverwaltung für Subsysteme,
- Kommunikation mit der Bodenstation und den Subsystemen,
- Kommandoverarbeitung und Telemetrie,
- Navigation sowie
- Lageregelung.

Zum Aufbau des redundant ausgelegten Bordcomputers siehe Abb. 6.

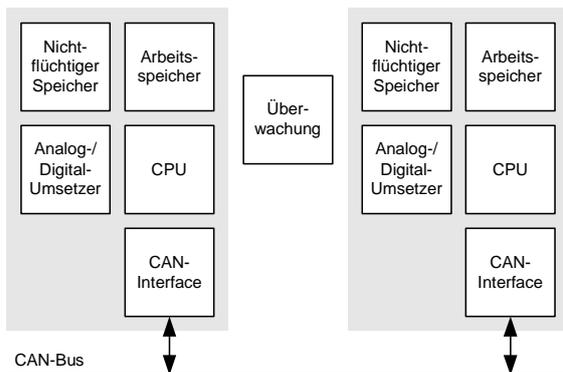


Abb. 6: BEESAT Bordcomputer

Kommunikation

Die Kommunikation mit der Bodenstation erfolgt über ein redundant ausgelegtes UHF-Funkgerät mit GMSK-Modulation und einer Übertragungsgeschwindigkeit von 9600 bit/s. Es werden Amateurfunk-Frequenzen verwendet.

Die Kommunikation zwischen den einzelnen Subsystemen erfolgt redundant über CAN (Controller Area Network). Hierbei handelt es sich um ein fehlertolerantes Bus-system, das vor allem im Automobilbereich weit verbreitet ist und den Verkabelungsaufwand minimiert.

Nutzlast

Als Nutzlast ist eine Kamera vorgesehen. Die aufgenommenen Bilder können unabhängig vom Bordcomputer verarbeitet werden. Bilder lassen sich auf Grund der vorhandenen Übertragungsgeschwindigkeit von 9600 bit/s nur eingeschränkt zur Bodenstation übermitteln.

Lageregelung

Als Sensoren der Lageregelung kommen 6 selbst entwickelte Sonnensensoren, 1 Drei-Achsen-Magnetometer und 3 Gyroskope zum Einsatz. Aktuatoren der Lageregelung sind 3 Magnetspulen sowie 3 zu verifizierende Reaktionsräder.

Die Verarbeitung der Sensordaten für den Lageregelungsalgorithmus einschließlich Bahnmodell sowie die Ansteuerung der Aktuatoren erfolgt per Software im Bordcomputer.

Struktur

Die Struktur ist in ihren Abmessungen durch den CubeSat-Standard spezifiziert. Abbildung 7 zeigt einen Strukturentwurf für BEESAT. Für die Antennen ist ein Ausklappmechanismus vorgesehen.

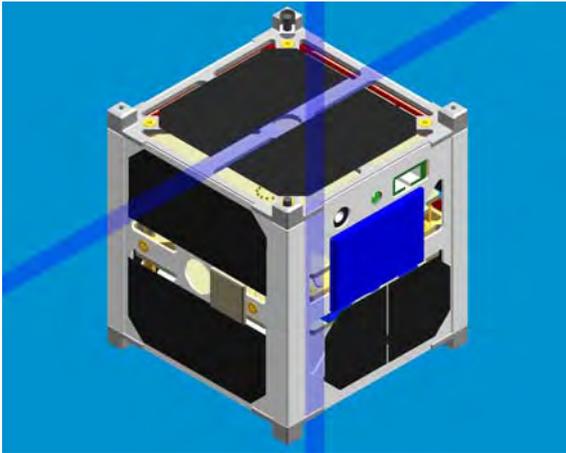


Abb. 7: BEESAT Strukturentwurf

Ausblick

Picosatelliten werden in Zukunft auch Aufgaben übernehmen, die bisher großen Satelliten vorbehalten sind. Anwendungen, die Formationsflüge oder umfangreiche Konstellationen erfordern, werden erst mit Picosatelliten kostengünstig realisierbar. Zur weiteren Kostenreduzierung werden zunehmend handelsübliche Industriekomponenten (engl.: commercial off-the-shelf, COTS) oder Komponenten aus dem militärischen Bereich statt spezieller, für den Weltraumeinsatz entwickelter, Komponenten verwendet. Hier findet ein Paradigmenwechsel in der Raumfahrttechnik statt.

Durch kürzere Entwicklungszeiten lassen sich aktuelle Technologien implementieren. Das stellt jedoch erhöhte Anforderungen an die Verifikation des Systems. Komponenten und Systeme, die für Picosatelliten entwickelt werden, lassen sich zum Teil auch für größere Satelliten (z. B. Nanosatelliten) verwenden.

Weltweit wird an der Entwicklung von Picosatellitenkomponenten für alle Subsysteme einschließlich eines Antriebs gearbeitet. Die TU Berlin arbeitet in enger Abstimmung mit der FH Aachen und der Industrie an der Entwicklung neuer Komponenten.

Die Kostenreduzierung ermöglicht in Zukunft die Serienfertigung und Kommerzialisierung von modularen Picosatelliten mit austauschbarer Nutzlast.

Literatur

- ALMINDE, L., BISGAARD, M. u. a., 2005: Experience and Methodology gained from 4 years of Student Satellite Projects. 2nd International Conference on Recent Advances in Space Technologies (RAST), Istanbul, Turkey.
- BRIEB, K.; MONTENEGRO, S. u. a., 2002: Demonstration of Small Satellite Technologies by the BIRD Mission. 16th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites, Logan, Utah, USA.
- KAYAL, H., 2005: Interner Abschlussbericht zum Projekt „Microwheel“ (DLR FKZ 50JR0452).
- KAYAL, H. & BRIEB, K., 2005: Pico Satellite Concept of TU-Berlin. 5th IAA Symposium on Small Satellites for Earth Observation, Berlin, Germany.

Vergleich der Orientierungsverfahren für Weltraumaufnahmen

KARSTEN JACOBSEN

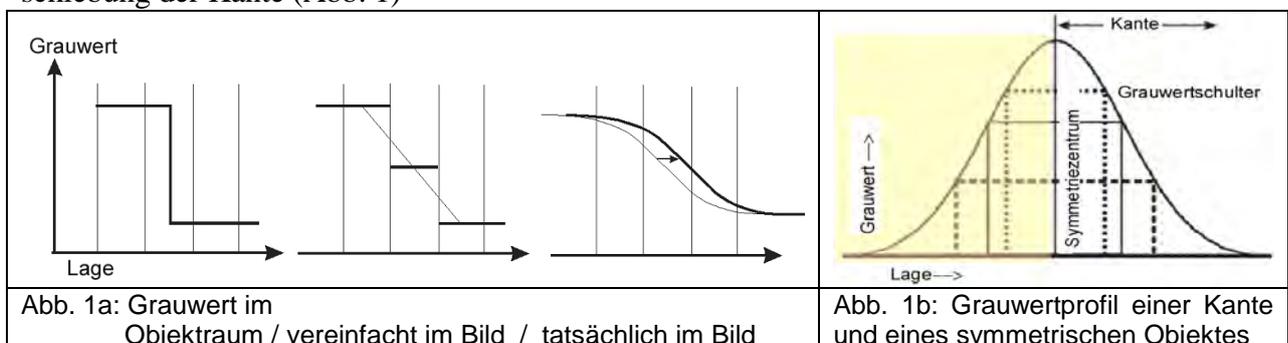
Zusammenfassung: Die Orientierung von Weltraumaufnahmen kann auf unterschiedliche Weise erfolgen. Im praktischen Einsatz sind die Bias korrigierten, Sensor bezogenen rationalen Polynomkoeffizienten (RPC), geometrische Rekonstruktionen der Aufnahmesituation, 3D-Affintransformationen, die direkte lineare Transformation (DLT) und die auf Passpunkten basierenden rationalen Polynomkoeffizienten. Nur die ersten beiden Methoden erlauben die Nutzung der direkten Sensororientierung. Die 3D-Affintransformation versucht die Orientierung ohne Nutzung vorhandener Orientierungsinformationen mit 8 Unbekannten, die DLT mit 11 Unbekannten und die auf Passpunkten basierenden RPC's mit einer variablen Anzahl von Unbekannten zu lösen. Dementsprechend erfordern sie eine Anzahl von dreidimensional gut verteilten Passpunkten.

1 Einführung

Moderne Erderkundungssatelliten sind mit schnell rotierenden Kreiselssystemen für alle drei Achsen ausgestattet. Werden die Kreisel abgebremst oder beschleunigt, so wirkt es sich als Drehmoment auf den Satelliten aus, der sich entsprechend dreht. Auf diese Weise können die Satelliten ihre Ausrichtung schnell und präzise, auch während der Aufnahme, ändern. Damit können die traditionellen mathematischen Modelle, die von einer konstanten Aufnahme- richtung des Satelliten in Bezug auf die Umlaufbahn ausgehen, nicht ohne Änderung übernommen werden. Moderne Satelliten können mittels eines Positioniersystems und präziser Winkelbestimmung die Aufnahme- richtung sehr genau bestimmen, so dass die aufgenommenen Objekte ohne Passpunkte mit einer Genauigkeit von bis zu $\pm 4\text{m}$ lokalisiert werden können. Für eine Genauigkeitssteigerung und eine unabhängige Kontrolle sind Passpunkte erforderlich. Die Anzahl und Verteilung der Passpunkte ist vom gewählten Orientierungsverfahren abhängig.

2 Passpunkte

Das Genauigkeitspotenzial optischer Weltraumaufnahmesysteme liegt im Sub-Pixelbereich, dieses lässt sich nur mit gut definierten Passpunkten erreichen. Plötzliche Änderungen des Grauwertes im Objektraum werden im Bildraum abgeschwächt und es kommt zu einer Verschiebung der Kante (Abb. 1)

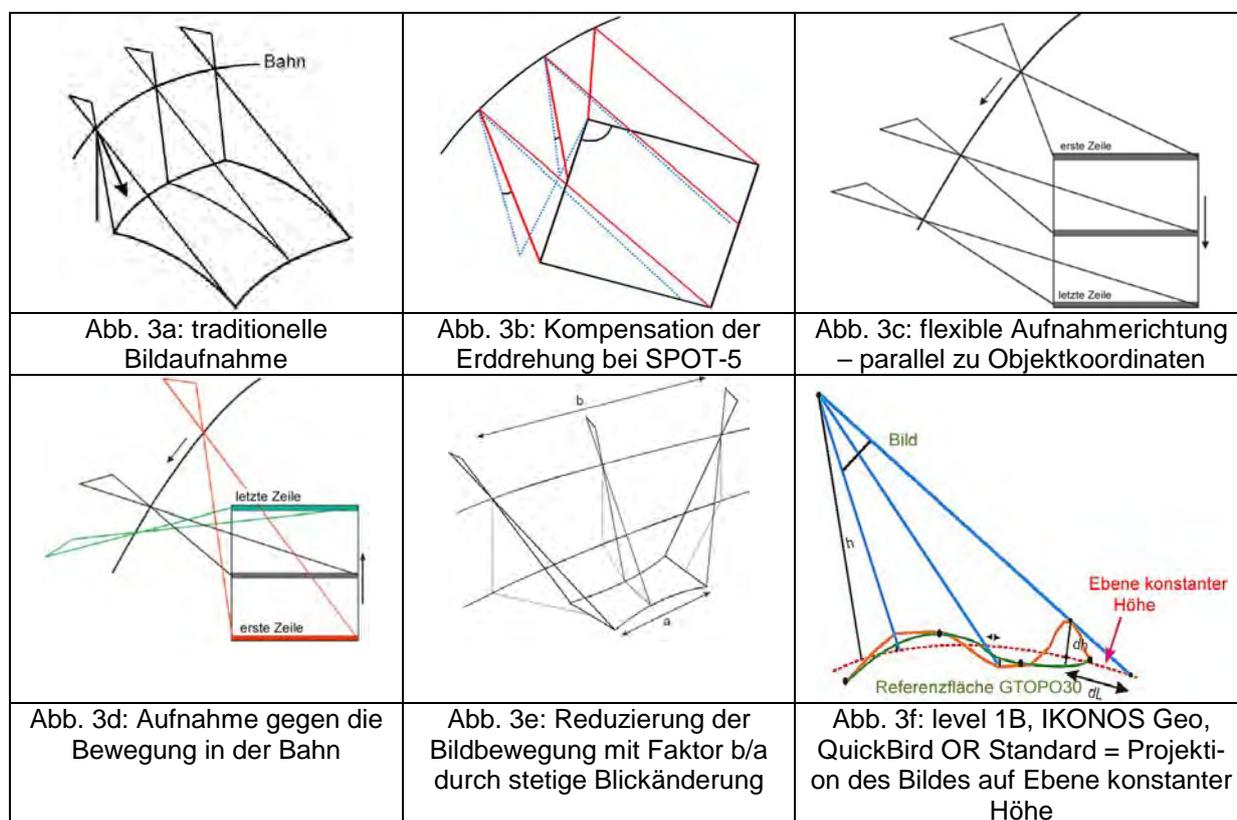


Die Kantenverschiebung, die auch in analogen Bildern auftritt, wird durch das CCD, Lichtstreuung in der Atmosphäre aber auch durch Grauwertmanipulationen zur Bildverbesserung

hervorgerufen. Werden symmetrische Objekte als Passpunkte verwendet, kommt es zu keiner Verschiebung des Zentrums (Abb. 1b und 2c), für hohe Genauigkeiten sollten deswegen symmetrische Objekte als Passpunkte verwendet werden.



3 Bildgeometrie und Bildprodukte



Die traditionellen CCD-Sensoren wie SPOT 1-4, ASTER, IRS-1C/1D, KOMPSAT-1 und der HRS-Sensor von SPOT-5 ändern ihre Aufnahmerichtung während der Aufnahme gegenüber der Umlaufbahn nicht (Abb. 3a). Der HRG-Sensor von SPOT-5 ändert die Aufnahmerichtung kontinuierlich um die Auswirkung der Erddrehung auf erfasste Fläche zu kompensieren (Abb. 3b). Die modernen, flexiblen Aufnahmesysteme wie IKONOS, QuickBird, OrbView, EROS-A1, TES, Cartosat-1 und Formosat-2 ändern ihre Aufnahmerichtung kontinuierlich in jede gewünschte Richtung, damit kann zum Beispiel IKONOS das Bild auch gegen die Bewegung in der Bahn aufnehmen (Abb. 3d). EROS-A1 und TES haben keine TDI-Sensoren und können damit die vom Objekt reflektierte Energie nicht über mehrere Bildelemente auf-

summieren, aus diesem Grund müssen sie die Vorwärtsbewegung des Bildes durch eine kontinuierliche Änderung der Aufnahme­richtung verlangsamen (Abb. 3e). Dieses ist auch bei QuickBird trotz des TDI-Sensors erforderlich, da QuickBird ursprünglich für eine Objektpixelgröße von 1m konzipiert war und erst später durch Reduzierung der Aufnahme­höhe von 680km auf 450km die Objektpixelgröße auf 62cm verkleinert wurde. Die Aufnahme­rate konnte von 6900 Zeilen/sec nicht mehr verändert werden. Die Aufnahme­rate multipliziert mit der Objektpixelgröße führt zu einer Geschwindigkeit von 4,28 km/sec ($6900/\text{sec} * 0.62\text{m} = 4280\text{m}/\text{sec}$), das ist deutlich langsamer als die Satellitengeschwindigkeit bezogen auf die Erdoberfläche, damit muss QuickBird die Bildvorwärtsbewegung durch eine Änderung der Aufnahme­richtung um den Faktor von etwa $b/a = 1,6$ verlangsamen. EROS A1 und TES benutzen ein Verhältnis von $b/a = 5$ bis 7.

Die level 1A Bilder (SPOT, IRS, KOMPSAT, ASTER) oder QuickBird Basic stellen Originalbilder dar, die allerdings bei den meisten Sensoren aus Teilbildern zusammengesetzt sind. Die innere Orientierung ist hier bereits berücksichtigt. Für IKONOS sind diese Bilder nicht verfügbar, sondern nur das level 1B-Produkt (SPOT, IRS, KOMPSAT, ASTER), das bei IKONOS als Geo und bei QuickBird als OR Standard bezeichnet wird. QuickBird wird außerdem als Standard vertrieben, dieses stellt eine Projektion auf das grobe Höhenmodell GTOPO30 dar.

4 Mathematische Modelle

4.1 Originalbilder

Die Handhabung der Originalbilder ist seit SPOT 1 bekannt. In dem hannoverschen Programm BLASPO wird die Bildgeometrie mittels der Blickrichtung und der Standardumlaufbahn rekonstruiert. Zusätzlich werden 6 Orientierungsunbekannte, die sich wegen der Bildgeometrie aber von den Standardparametern unterscheiden, bestimmt. So sind mindestens 3 Passpunkte erforderlich. Nur Bilder mit sehr ungenauer Angabe der Blickrichtung müssen vollständig orientiert werden, wozu 4 Passpunkte erforderlich sind, die deutlich unterschiedliche Höhen haben müssen. Andere Orientierungsverfahren, wie die 3D-Affintransformation (siehe 4.2.3) und die direkte lineare Transformation (DLT) (siehe 4.2.4) nutzen die vorhandenen Orientierungsinformationen nicht und sind deswegen grundsätzlich auf eine größere, dreidimensional gut verteilte Anzahl von Passpunkten angewiesen.

Die 3D-Affintransformation und die DLT-Methode sind Näherungsverfahren, die die Abbildungsgeometrie nicht genau repräsentieren. CCD-Zeilensensoraufnahmen aus dem Weltraum haben in der Zeilenrichtung eine perspektive Geometrie, bezogen auf ein Landeskoordinatensystem besteht in der Bahnrichtung genähert eine Parallelprojektion. Die 3D-Affintransformation basiert auf einer Parallelprojektion in beiden Richtungen, kann allerdings durch Korrekturkomponenten an die tatsächliche Geometrie angepasst werden (HANLEY u.a. 2003). Die DLT-Methode setzt eine Zentralprojektion voraus. Beide Verfahren können die Verringerung der Bildbewegung durch kontinuierliche Änderung der Aufnahme­richtung (Abb. 3e) nicht berücksichtigen, außerdem reagieren sie sehr empfindlich auf eine nicht ausreichende Höhenverteilung der Passpunkte.

	SX / SY [m]	Sx' / Sy' [Objektpixel]
<i>TK 350, Zonguldak</i>	8.3	(0,8)
<i>KVR 1000, level 1A, Duisburg</i>	3,3	(1.6)
<i>KFA 3000, Wien</i>	2.5	(2.0)
ASTER, Zonguldak	10.8	0.7
KOMPSAT-1, Zonguldak	8.5	1.3
SPOT, level 1A, Hannover.	4.6	0.5
SPOT 5, level 1A , Zonguldak	5,1	1,0
SPOT HRS, Bayern	6.1	0.7 / 1.1
IRS-1C, level 1A, Hannover	5.1	0.9
QuickBird Basic, Atlantic City	0.60	1.0
Tabelle 1: Orientierungsgenauigkeit unterschiedlicher Weltraumaufnahmen – Originalbilder		

Tabelle 1 zeigt die mit dem Programm BLASPO erreichte Orientierungsgenauigkeit verschiedener Originalbilder. Allgemein kann mit guten Passpunkten eine Subpixelgenauigkeit erreicht werden. In allen Fällen, in denen das nicht der Fall war, konnten die Passpunkte nicht gut identifiziert werden oder hatten eine eingeschränkte Genauigkeit. Das QuickBird-Bild von Atlantic City wurde auch mit der 3D-Affintransformation und der DLT orientiert, womit lediglich im Quadratmittel 10,8m bzw. 8,4m erreicht wurden. Die hauptsächliche Ursache war nicht das genäherte mathematische Modell, sondern das flache Gebiet. Alle statistischen Tests in dem benutzten Hannoverschen Programm TRAN3D zeigten selbst bei 174 flächig gut verteilten Passpunkten numerische Probleme an. Im Bereich von Phoenix wurde mit größeren Höhenunterschieden 1,7m bzw. 1,1m erreicht. Das ist im Verhältnis zur geometrisch richtig behandelten Orientierung noch kein gutes Ergebnis (PASSINI u.a. 2004). Auch die Orientierung von SPOT und SPOT HRS-Aufnahmen ergab mit der 3D-Affintransformation und der DLT um 50% bis 100% größere Standardabweichung als mit dem richtigen geometrischen Modell.

4.2 Level 1B-Bilder

Heute werden häufiger level 1B-Bilder (auf eine Ebene konstanter Höhe projizierte Bilder) als Originalbilder gekauft und verarbeitet. Von IKONOS werden Originalbilder auch nicht vertrieben. Ihre Geometrie muss mit einem anderen mathematischen Modell gelöst werden. Früher wurde teilweise aus den level 1B-Bildern die Geometrie von level 1A Bildern (Originalbilder) rekonstruiert und die Orientierung so berechnet. Das ist jedoch nicht erforderlich und hat meistens auch zu größeren Abweichungen geführt. Für die Orientierung werden teilweise strenge, aber auch Näherungslösungen eingesetzt.

4.2.1 Rationale Polynomkoeffizienten

Die geometrische Beziehung zwischen Bild- und Objektkoordinaten kann durch das Verhältnis von Polynomen genähert beschrieben werden (Formel 1) (GRODECKI 2001). Die Polynomkoeffizienten können aus einem strengen geometrischen Modell oder mittels Passpunkte abgeleitet werden. Von den Satellitenbetreibern werden die rationalen Polynomkoeffizienten (RPC) aus der direkten Sensororientierung abgeleitet (Sensor bezogene RPC). Da diese nur noch geringfügig durch Passpunkte verbessert werden müssen, können sie mit wenigen Passpunkten die Orientierung rekonstruieren.

$x_{ij} = \frac{Pi1(X,Y,Z)_j}{Pi2(X,Y,Z)_j}$	$y_{ij} = \frac{Pi3(X,Y,Z)_j}{Pi4(X,Y,Z)_j}$	$Pn(X,Y,Z)_j = a_1 + a_2*Y + a_3*X + a_4*Z + a_5*Y*X + a_6*Y*Z + a_7*X*Z + a_8*Y^2 + a_9*X^2 + a_{10}*Z^2 + a_{11}*Y*X*Z + a_{12}*Y^3 + a_{13}*Y*X^2 + a_{14}*Y*Z^2 + a_{15}*Y^2*X + a_{16}*X^3 + a_{17}*X*Z^2 + a_{18}*Y^2*Z + a_{19}*X^2*Z + a_{20}*Z^3$
Formel 1: Rationale Polynomkoeffizienten x _{ij} , y _{ij} = Bildkoordinaten X, Y = geographische Koordinaten		

Mit den 80 Polynomkoeffizienten kann die Geometrie einer Satellitenszene ohne Genauigkeitsverluste rekonstruiert werden. Lediglich bei großen Stereoszenen oder längeren Bildstreifen können ab 50km Szenenlänge merkbare Genauigkeitsverluste eintreten.

Aus Passpunkten können wegen hoher Korrelationen keine 80 Koeffizienten berechnet werden, deswegen beschränken sich die durch Passpunkte bestimmten RPC (terrain dependent RPC) auf wenige Koeffizienten. Diese auch in kommerziellen Programmen enthaltene Orientierungsmethode reagiert äußerst empfindlich auf dreidimensional schlecht verteilte Passpunkte und Extrapolationen und sollte deswegen auf keinen Fall verwendet werden.

4.2.2 Rekonstruktion der Bildgeometrie

Für die Szenenmitte oder die Mitte der ersten Zeile wird die Blickrichtung zum Satelliten in den Header-Daten, die zusammen mit den Bildern ausgeliefert werden, angegeben. Im Falle von IKONOS heißen sie „nominal collection azimuth“ und „nominal collection elevation“. Die Satellitenbahn, deren allgemeine Parameter publiziert sind, kann so verschoben werden, dass sie die Blickrichtung schneidet, womit die aktuelle Satellitenbahn rekonstruiert ist. Aus der Szenenkomponente in Bahnrichtung kann die Strecke in der Bahn berechnet werden, wobei auch die Änderung der Blickrichtung zur Verringerung der Bildbewegung und eine Aufnahme gegen die Bahnbewegung (Abb. 3e und Abb. 3d) zu berücksichtigen ist. Damit ist die Lage des Projektionszentrums für jeden Bildpunkt bekannt. Wie die Sensor bezogenen RPC kann dieses Verfahren auch ohne Passpunkte arbeiten, wenn die direkte Sensororientierung für das jeweilige Projekt ausreichend genau ist.

4.2.3 3D-Affintransformation

Die 3D-Affintransformation benutzt keine der gegebenen Orientierungsinformationen sondern rekonstruiert die Aufnahmegeometrie genähert über Passpunkte. Die 8 Unbekannten erfordern mindestens 4 dreidimensional gut verteilte Passpunkte. Die berechneten Koeffizienten sollten statistisch überprüft werden, mindestens die Korrelation zwischen den Unbekannten ist erforderlich da sie auf numerische Probleme, verursacht durch eine schlechte Höhenverteilung hinweist. Ein einfacher Student-Test ist nicht ausreichend.

$$x_{ij} = a_1 + a_2 * X + a_3 * Y + a_4 * Z \quad y_{ij} = a_5 + a_6 * X + a_7 * Y + a_8 * Z$$

Formel 2: 3D-Affintransformation

4.2.4 Direkte Lineare Transformation (DLT)

Auch die DLT berücksichtigt keine gegebene Orientierungsinformation. Sie rekonstruiert die Geometrie einer zentralperspektiven Aufnahme einschließlich der inneren Orientierung über Passpunkte. Das sehr schmale Aufnahmebündel, das auch nur in einer Richtung zentralperspektiv ist, erlaubt in der Regel nicht die Rekonstruktion der inneren und äußeren Orientie-

zung, weswegen die Bestimmung der 11 Unbekannten noch problematischer als die der 8 Unbekannten der 3D-Affintransformation ist.

$$x_{ij} = \frac{L1 * X + L2 * Y + L3 * Z + L4}{L9 * X + L10 * Y + L11 * Z + 1} \quad y_{ij} = \frac{L5 * X + L6 * Y + L7 * Z + L8}{L9 * X + L10 * Y + L11 * Z + 1} \quad \text{Formel 3: DLT}$$

5 Empirischer Vergleich der Orientierungsmethoden

Die verschiedenen Orientierungsverfahren wurden mit IKONOS- und QuickBird-Aufnahmen im Bereich des Testgebietes Zonguldak, Türkei verglichen. Mit einer ausreichenden Anzahl von durch GPS vermessenen Passpunkten war mit dem richtigen Orientierungsverfahren eine Subpixelgenauigkeit möglich.

Die Passpunkt bezogenen RPC wurden nach einem sehr negativ ausgefallenen Test nicht weiter untersucht. Mit einem kommerziellen Programm wurde die Orientierung einer IKONOS-Szene mit einer nicht optimalen, aber für manche Fälle noch akzeptablen Passpunktverteilung berechnet. Die Widersprüche an den benutzten 8 Passpunkten lagen im Subpixelbereich und das Programm zeigte keinen Hinweis auf geometrische Probleme. Trotzdem traten an unabhängigen Vergleichspunkten innerhalb des Passpunktbereichs bis zu 50m Abweichungen auf, außerhalb des Passpunktbereichs wurden sogar bis zu 300m erreicht. Diese Methode sollte deswegen auf keinen Fall verwendet werden.

Die Orientierung mit Sensor bezogenen RPC und der geometrischen Rekonstruktion erfolgt in 2 Schritten. Im ersten Schritt wird mit der gegebenen Orientierung eine Lagekorrektur auf Grund der aktuellen Punkthöhe auf die Referenzebene durchgeführt. Die so ermittelte Lage ist durch die absolute Genauigkeit der direkten Satellitenorientierung begrenzt. In der Praxis bereitet das Datum der Landeskoordinatensysteme mehr Probleme als die Genauigkeit der Sensororientierung, weswegen Passpunkte erforderlich sind (DIAL u.a. 2002). Die Transformation von der Referenzebene auf die Passpunkte kann im einfachsten Fall durch eine einfache Verschiebung, aber auch durch eine ebene Affintransformation oder auch noch mit weiteren Unbekannten erfolgen. Bei IKONOS-Aufnahmen führte eine einfache Verschiebung bei wenigen Passpunkten zu besseren Ergebnissen an unabhängigen Vergleichspunkten als eine Affintransformation. Wurde eine größere Anzahl von Passpunkten verwendet, unterschieden sich die Ergebnisse nicht. Somit ist theoretisch ein Passpunkt für Orientierung von IKONOS-Aufnahmen ausreichend. Bei QuickBird-Aufnahmen war dagegen eine Affintransformation erforderlich, eine einfache Verschiebung führte nur zu einer Genauigkeit von etwa 1,3m bis 1,4m.

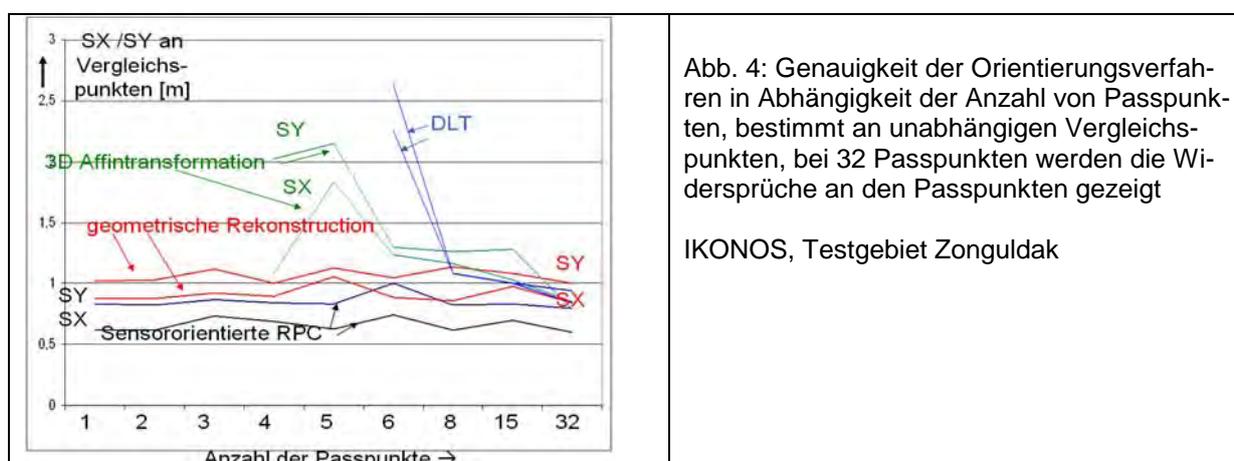


Abb. 4: Genauigkeit der Orientierungsverfahren in Abhängigkeit der Anzahl von Passpunkten, bestimmt an unabhängigen Vergleichspunkten, bei 32 Passpunkten werden die Widersprüche an den Passpunkten gezeigt

IKONOS, Testgebiet Zonguldak

Die in Abb. 4 dargestellten Ergebnisse der Orientierung einer IKONOS-Szene liefern ein klares Ergebnis, dass sich auch bei anderen Datensätzen in ähnlicher Form gezeigt hat. Die Sen-

sensor orientierten RPC und die geometrische Rekonstruktion liefern bereits mit einem Passpunkt praktisch die gleiche Genauigkeit wie mit deutlich mehr Passpunkten. Die 3D-Affintransformation und die DLT brauchen mindestens eine Überbestimmung von 2 Passpunkten bevor die Ergebnisse einigermaßen brauchbar sind, somit erfordern sie mindestens 6 bzw. 8 Passpunkte, die auch noch räumlich gut verteilt sein müssen. Mit 32 Passpunkten wurden an den Passpunkten durch alle Verfahren genähert die gleichen Widersprüche angezeigt.

Eine Orientierung basierend auf 4 Passpunkten mit deutlichen, für das Gebiet ausreichenden Höhenunterschieden ergab an unabhängigen Vergleichspunkten in der einen Koordinatenkomponente im Quadratmittel Abweichungen von 18,5m, was für IKONOS-Aufnahmen mit Objektpixeln von 1m nicht akzeptabel ist. Ursache hierfür ist, dass die Passpunkte genähert in einer schrägen Ebene liegen, womit sich numerische Probleme ergeben. Das Programm TRAN3D zeigt auch eine Warnung. Diese statische Überprüfung fehlt leider in fast allen kommerziellen Programmen.

Tab. 1: Orientierung einer QuickBird-Szene Zonguldak, mit 6 und 41 Passpunkten

Dimension: [m]	Sensor orientierte RPC		geometrische Rekonstruktion		3D-Affin-Transformation		DLT	
	SX	SY	SY	SY	SX	SY	SX	SY
6 Passpunkte, Widerspruch an den Passpunkten	0.45	.062	0.84	1.12	0.48	0.18	0.02	0.08
6 Passpunkte, Widerspruch an unabhängigen Vergleichspunkt.	0.53	0.75	0.84	1.01	0.96	2.22	1.08	1.20
41 Passpunkte, Widerspruch an den Passpunkten	0.40	0.59	0.76	0.62	1.04	1.04	1.36	1.50
41 Passpunkte, Widerspruch an den Passpunkten + 2 zusätzliche Parameter			0.48	0.46				

Die mit IKONOS-Aufnahmen erzielten Ergebnisse werden durch QuickBird-Szenen bestätigt. Die in Tabelle 1 dargestellten Ergebnisse der DLT basierend auf 6 Passpunkten sehen gut aus, sind aber ein Zufallsergebnis. Mit einer anderen Kombination von 6 Passpunkten wurden an unabhängigen Vergleichspunkten im Quadratmittel Widersprüche von 3,6m und 4,0m erzielt, womit sich die Unsicherheit der Ergebnisse basierend auf der DLT bestätigt, wenn nur die minimale Anzahl von Passpunkten verwendet wird. Mit Sensor orientierten RPC und geometrischer Rekonstruktion konnte die volle Genauigkeit bereits mit 4 Passpunkten erzielt werden.

Die Beschränkungen des mathematischen Modells der 3D-Affintransformation und der DLT zeigt sich bei der Ausgleichung mit allen Passpunkten. Wegen der kontinuierlichen Änderung der Aufnahmerichtung zur Reduzierung der Bildbewegung konnte nicht die gleiche Genauigkeit wie mit den Sensor orientierten RPC und der geometrischen Rekonstruktion erzielt werden. Aber auch die geometrische Rekonstruktion ergab, zwar mit einer ebenen Affintransformation, fast Pixelgenauigkeit, die volle Genauigkeit konnte aber erst mit 2 zusätzlichen Parametern erzielt werden, die die Aufnahmerichtung in Abhängigkeit von der Lage in der Szene noch modifizieren. Erst danach zeigten die Widersprüche keine weiteren systematischen Effekte an, was mittels einer Kovarianzanalyse überprüft wurde.

6 Zusammenfassung

Die geometrische Analyse der Orientierung von Weltraumaufnahmen ist durch Genauigkeit und Identifizierbarkeit der Passpunkte bestimmt. Mit dem richtigen mathematischen Modell können ohne weiteres Subpixelgenauigkeiten erreicht werden. Es ist nicht entscheidend, ob Originalbilder (level 1A) oder Projektionen auf eine Ebene konstanter Höhe (level 1B) benutzt werden. Ein SPOT-Modell war sowohl als level 1A als auch als level 1B vorhanden, die Genauigkeit ihrer Orientierungen unterschieden sich um weniger als 5%.

Rationale Polynomkoeffizienten, bestimmt durch Passpunkte, sollten nicht verwendet werden, da die Ergebnisse kaum kontrollierbar sind und bereits kleine Extrapolationen zu sehr schlechten Ergebnissen führen können. Die 11 Unbekannten der direkten linearen Transformation sind nicht gerechtfertigt, benötigen mehr Passpunkte und führen im Durchschnitt zu schlechteren Ergebnissen als die 3D-Affintransformation. Aber auch die 3D-Affintransformation, die in der Praxis mindestens 6 räumlich gut verteilte Passpunkte erfordert, ist nicht gerechtfertigt, da mit geometrischer Rekonstruktion und Sensor orientierten RPC bereits mit weniger Passpunkten eine bessere Genauigkeit erreicht wird. Für IKONOS-Aufnahmen ist theoretisch ein Passpunkt ausreichend, aus Gründen der Zuverlässigkeit sollten aber mindestens 2 Passpunkte benutzt werden. Die Sensor orientierten RPC führten zu den besten Genauigkeiten. Leider sind die RPC nicht immer gegeben, in diesem Fall sollte auf die geometrische Rekonstruktion ausgewichen werden, die ebenfalls zuverlässige Ergebnisse mit der gleichen Anzahl von Passpunkten liefert und auch eine Subpixelgenauigkeit erreichen lässt.

7 Danksagung

Ich danke dem Forschungszentrum Jülich und TÜBITAK, Türkei für die finanzielle Unterstützung der Arbeiten im Bereich von Zonguldak.

8 Literaturverzeichnis

- DIAL, G. & GRODECKI, J., 2002: IKONOS Accuracy without Ground Control, Pecora 15 / Land Satellite Information IV / ISPRS Com. I, Denver 2002
- GRODECKI, J., 2001: IKONOS Stereo Feature Extraction – RPC Approach, ASPRS annual conference St. Louis
- HANLEY, H.B., YAMAKAWA, T. & FRASER, C.S., 2002: Sensor Orientation for High Resolution Imagery, Pecora 15 / Land Satellite Information IV / ISPRS Com. I, Denver
- PASSINI, R. & JACOBSEN, K., 2004: Accuracy Analysis of Digital Orthophotos from Very High Resolution Imagery, ISPRS Congress, Istanbul 2004, IntArchPhRS. Band XXXV, B4, pp 695-700

Simultankalibrierung digitaler Luftbildkameras

ERWIN KRUCK ¹

Zusammenfassung: Großflächige digitale Luftbildkameras wie DMC und UltraCamD sind derzeit wegen begrenzter Größe verfügbarer Flächensensoren darauf angewiesen, das Bild einer Aufnahme jeweils aus mehreren Einzelbildern zusammenzusetzen. Im praktischen Einsatz dieser Kameras zeigen sich trotz guter Laborkalibrierungen systematische Restfehler in der Bildgeometrie, die deutlich die einzelnen Sensorflächen erkennen lassen. Wie von herkömmlichen Filmkameras bekannt, ist eine Nachkalibrierung erforderlich, weil die Verhältnisse im Flugzeugeinsatz anders sind als im Labor.

In das Softwarepaket BINGO sind Methoden integriert, die eine genaue Analyse solcher systematischen Restfehler erlauben. Aufgrund dieser Analysen wurden Algorithmen zur Beseitigung dieser systematischen Effekte entwickelt und in BINGO integriert. Nach simultaner Kalibrierung konnten bei allen bisher durchgeführten Projekten alle systematischen Effekte beseitigt werden. In einem der Testprojekte konnte die Genauigkeit am Boden nachweislich um den Faktor Zwei gesteigert werden. Der Nachweis dieser Genauigkeitsverbesserung erfolgte mit unabhängigen Kontrollpunkten. Die einmal gewonnenen Kalibrierdaten sind als Korrekturdaten für weitere Projekte verwendbar.

1. Einführung

Dieser Beitrag berührt nicht die Fabrik-Kalibrierung digitaler Kameras, die bekanntlich neben der geometrischen Kalibrierung auch die Radiometrie der Sensoren überprüft und anpasst und jedes einzelne Pixel der Sensoren bewertet. Hier werden weiter entwickelte Algorithmen zur weithin eingeführten Selbstkalibrierung vorgestellt, die an die besondere Geometrie digitaler Luftbildkameras angepasst sind. Diese Kameras setzen jeweils ein Gesamtbild aus einer Anzahl von einzelnen Bildern zusammen.

Bei der DMC von Z/I sind es zwei mal zwei Sensoren. Jeder Sensor hat eine eigene Optik. Durch Schrägstellung der gegenseitigen Aufnahmerichtungen der Kameras bleibt die Überdeckung gering und es wird ein großer Bereich am Boden erfasst. Alle vier Kameras werden synchron ausgelöst.

Bei der UltraCamD von Vexcel gibt es auch vier Optiken für schwarz-weiß Aufnahmen. Hinter jeder Optik befinden sich ein, zwei oder vier CCD-Sensoren. Die Kameras sind in Reihe angeordnet. Die Auslösungen erfolgen leicht zeitversetzt, um jeden Sensor in der gleichen Position zu belichten (syntopisch). Der so genannte Master-Cone hat vier CCD-Elemente in den Bildecken angeordnet. Die Sensoren in den weiteren Kameras sind so positioniert, dass alle Lücken aufgefüllt werden. Alle Kameras blicken senkrecht nach unten.

Die genaue gegenseitige Zuordnung der Bilder der einzelnen Sensoren spielt bei diesem Zusammensetzen natürlich eine zentrale Rolle und ist am Ende für die geometrische Qualität der Bilder von ausschlaggebender Bedeutung. Selbstverständlich erfolgt diese Zuordnung bereits durch die Software der Kamera. Im praktischen Einsatz wurden jedoch kleine Restfehler festgestellt, die bei hohen Genauigkeitsanforderungen unbedingt zu berücksichtigen sind.

¹ Dr. Erwin J. Kruck, Geoinformatics & Photogrammetric Engineering, Tännichweg 3, D-73430 Aalen. Telefon +49-7361-931434, Fax +49-7361-931435, e-mail: info@gip-aalen.de, <http://www.gip-aalen.de>

Daher wurde ein neuer zusätzlicher Kalibrieransatz in die Bündelausgleichungssoftware BINGO integriert und praktisch an mehreren Projekten erprobt. Die hiermit erzielten Kalibrierergebnisse sind ausgezeichnet. Damit ist diese Methode als Grundlage für weitere Überlegungen zur Entwicklung von normierten Verfahren zur Kamerakalibrierung geeignet.

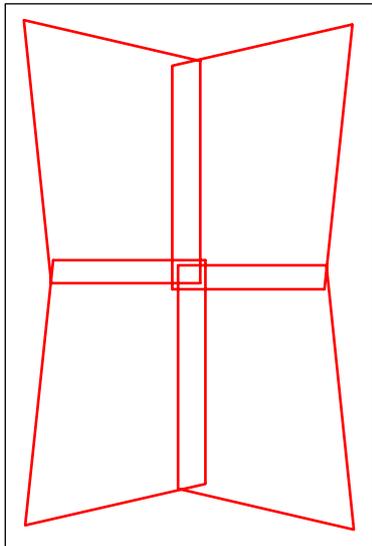


Abb.1: Teilbilder einer DMC

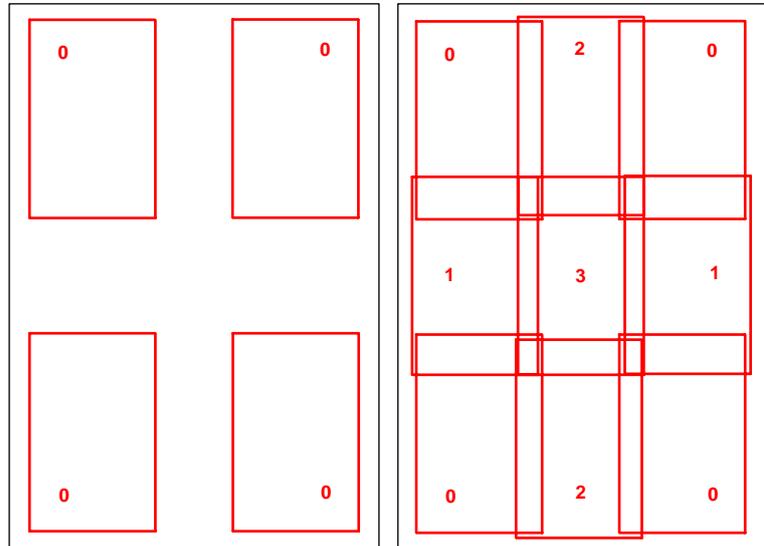


Abb. 2: Master-Cone und Teilbilder einer UltraCamD

2. Kalibrieransatz

Zur Entwicklung eines Kalibrieransatzes ist zunächst der Bedarf festzustellen, d.h., es ist zu prüfen ob die bisher verwendeten Parameter der Selbstkalibrierung noch zutreffend und hinreichend sind. Da alle Kameras vor Auslieferung im Labor kalibriert worden sind, scheint eine Überprüfung der Kalibrierung im Labor wenig sinnvoll. Außerdem ist durch die Erfahrung mit Film-Luftbildkameras bekannt, dass im praktischen Einsatz selbst bei bester und gerade durchgeführter Laborkalibrierung Effekte auftreten, die eine Selbstkalibrierung erforderlich machen. Diese Effekte sind bei Film-Kameras auf diverse Einflüsse zurückzuführen wie Temperatur-Gradienten in der Kamera und in der Luft, unterschiedliche Filmmagazine, Filmentwicklung, Erdkrümmung, Kartenprojektion usw. Bei den neuen digitalen Luftbildkameras sind andere Effekte möglich.

Die Ergebnisse einer Bündelblockausgleichung bieten eine ideale Basis zur Bestimmung systematischer Effekte, wenn ein genügend großer Datensatz mit hoher Überbestimmung ausgewertet wird. Dazu ist eine große Anzahl von Bildern mit vielen Verknüpfungspunkten und hohen Überdeckungen notwendig. Ansonsten ist es nicht möglich zuverlässige, signifikante Aussagen zu treffen. Liegen solche Datensätze vor, ist durch Betrachtung und Bewertung aller Residuen der Bildmessungen eine eventuelle systematische Verfälschung der Bildgeometrie bestimmbar.

Bringt man die Residuen der Bildmessungen aller Bilder in einem einzigen Bild grafisch zur Darstellung dürfen sich keine systematischen Effekte zeigen. Allerdings versagt diese Methode, wenn wirklich wie gefordert viele Messungen vorliegen, weil nichts mehr zu erkennen ist. Daher ist es sinnvoll kleine Bereiche zu bilden, und nur das Mittel der Residuen pro Bereich darzustellen. Diese Auswertung könnte natürlich auch rechnerisch durch Bestimmung

der Korrelation benachbarter Residuen geschehen. Man erhalte allerdings keine Aussage über die Form notwendiger geometrischer Verbesserungen.

An mehreren Beispieldatensätzen wurden die systematischen Bildfehler auf diese Weise ermittelt. Nachfolgend sind zwei für die jeweilige Kamera typische Resultate gezeigt. Während bei der DMC leichte Rotationen der einzelnen Sensoren vorliegen (Abb. 3), zeigt die Ultra-CamD leicht unterschiedliche Maßstäbe in den einzelnen Sensoren (Abb. 4).

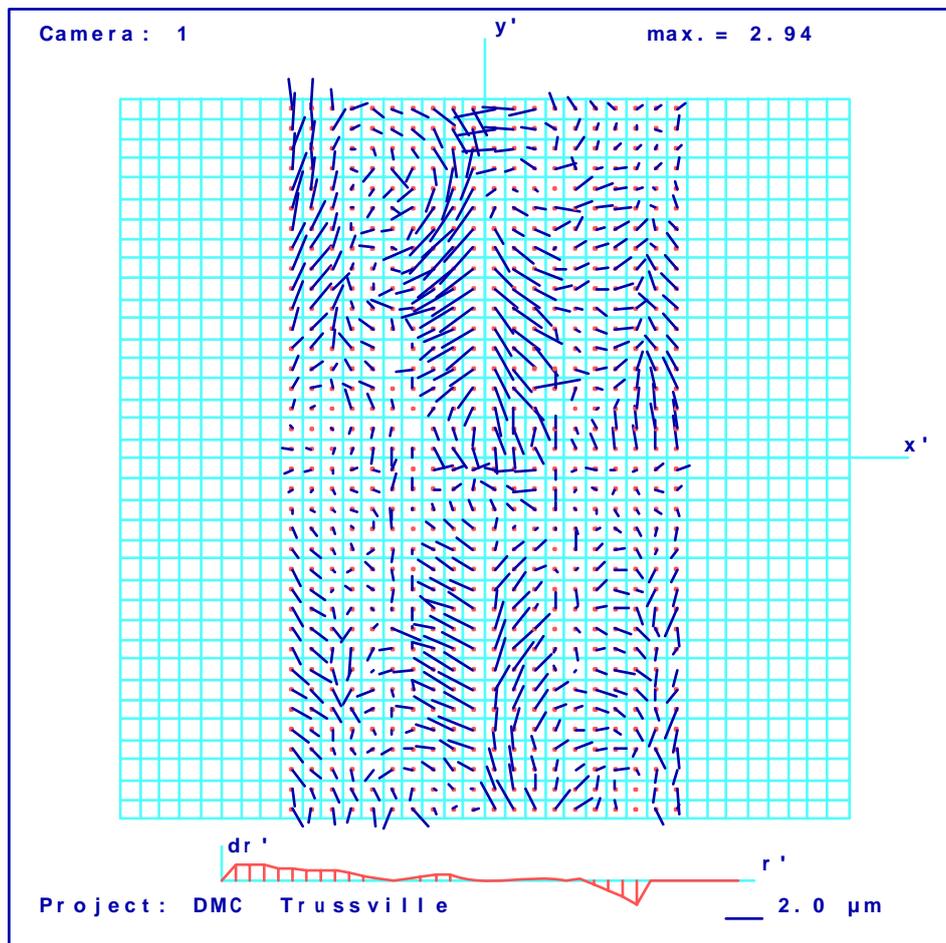


Abb. 3: Systematische Bild-Restfehler im DMC Projekt "Trussville"

Es wird deutlich, dass eine Nachkalibrierung pro Sensor erforderlich ist. Die CCD-Arrays müssen rechnerisch gedreht, verschoben und gedehnt werden. Dazu ist es notwendig, in der Bündelausgleichung genau die Sensorgrenzen zu kennen. Eine neue Klasse "Sensortyp" in BINGO erlaubt die Einbeziehung dieser Information. Nun können zusätzlich zu den üblichen globalen Parametern der Selbstkalibrierung pro Sensorfläche fünf neue Kalibrierparameter für Rotationen, Translationen und Maßstäbe in x' und y' angesetzt werden. Scherungseffekte waren in keinem Fall zu beobachten. Daher müssten diese zusätzlichen fünf Parameter alle systematischen Effekte vollständig beseitigen.

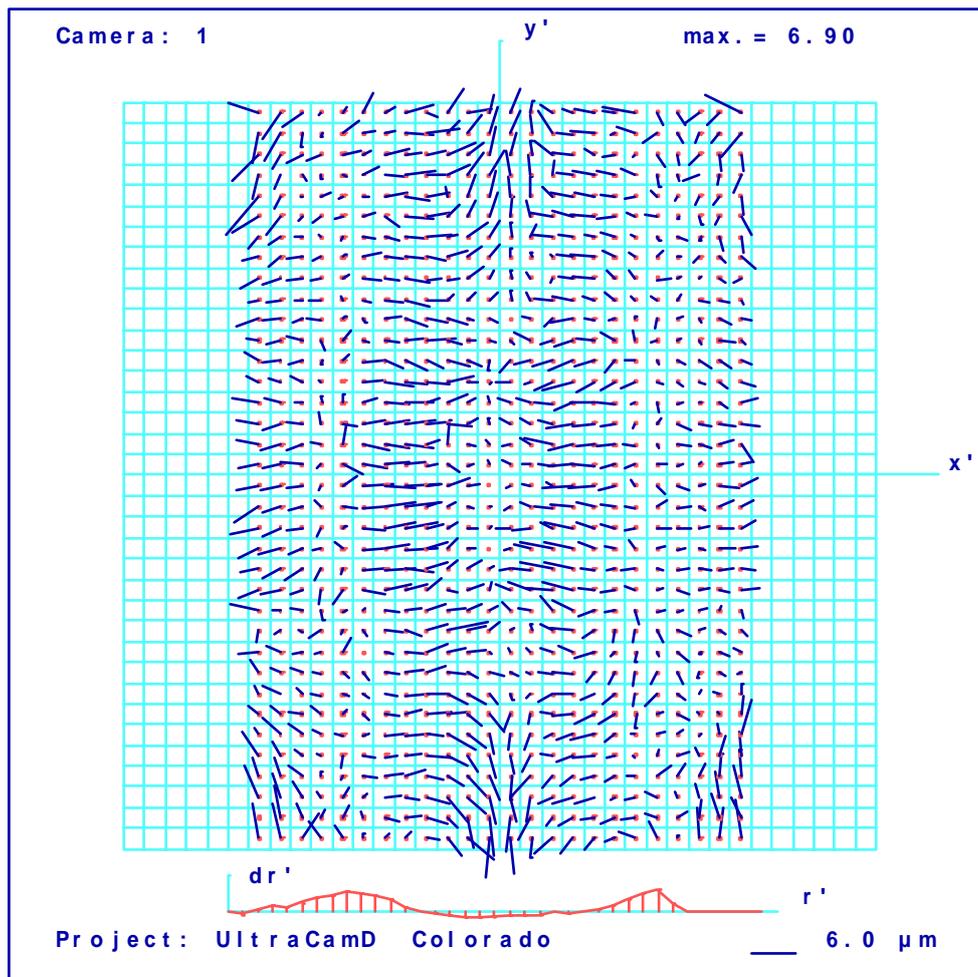


Abb. 4 Systematische Bild-Restfehler im UltraCamD Projekt "Colorado"

3. Praktisch Ergebnisse

Tatsächlich sind diese neuen Parameter in allen untersuchten UltraCamD-Beispielen ausreichend. Nach der Bündelausgleichung mit dieser erweiterten Selbstkalibrierung sind bei allen getesteten UltraCamD-Datensätzen alle systematischen Effekte verschwunden. Weiter ist die Frage von Bedeutung, wie sich die Genauigkeit durch diese neue Selbstkalibrierung verändert. Leider lagen nur für einen einzigen Datensatz "Colorado" unabhängige Vergleichspunkte vor. An diesem Beispiel zeigt sich eine Genauigkeitssteigerung um den Faktor zwei (Tabelle 1). In Tabelle 2 sind die Daten für die Blöcke "Colorado" und "Trussville" zusammengestellt.

Tab. 1: Ergebnisse der Bündelausgleichung im Block "Colorado"				
	σ_0 [μm]	RMS Abweichungen in den Prüfpunkten		
		in X [feet]	in Y [feet]	in Z [feet]
Ohne Kalibrierung	3.0	0.18	0.22	0.29
Neue Kalibrierung	1.7	0.09	0.13	0.14

Tab. 2: Daten der Blöcke "Colorado" und "Trussville"		
Photos	276	1037
Ausgleichungspunkte	2212	12934
Punkte pro Bild	36 – 89, Mittel 53	11 – 53, Mittel 44
Flugstreifen	7 mit je 29 Photos	18
Querstreifen	2	
Überlappung	längs 80%, quer 30%	längs 60%, quer 25%
Passpunkte	20 am Blockrand	36
GPS/IMU Daten		für alle Bilder
Prüfpunkte	81	
Flughöhe	1400 feet	4500 feet
Höhenunterschiede	148 feet	1000 feet

Dieses erfreuliche Ergebnis bestätigt die durch visuelle Beurteilung getroffene Feststellung, dass eine deutliche Verbesserung erreicht werden kann. Abb. 5 zeigt die systematischen Restfehler in den Bildmessungen nach erfolgter Selbstkalibrierung.

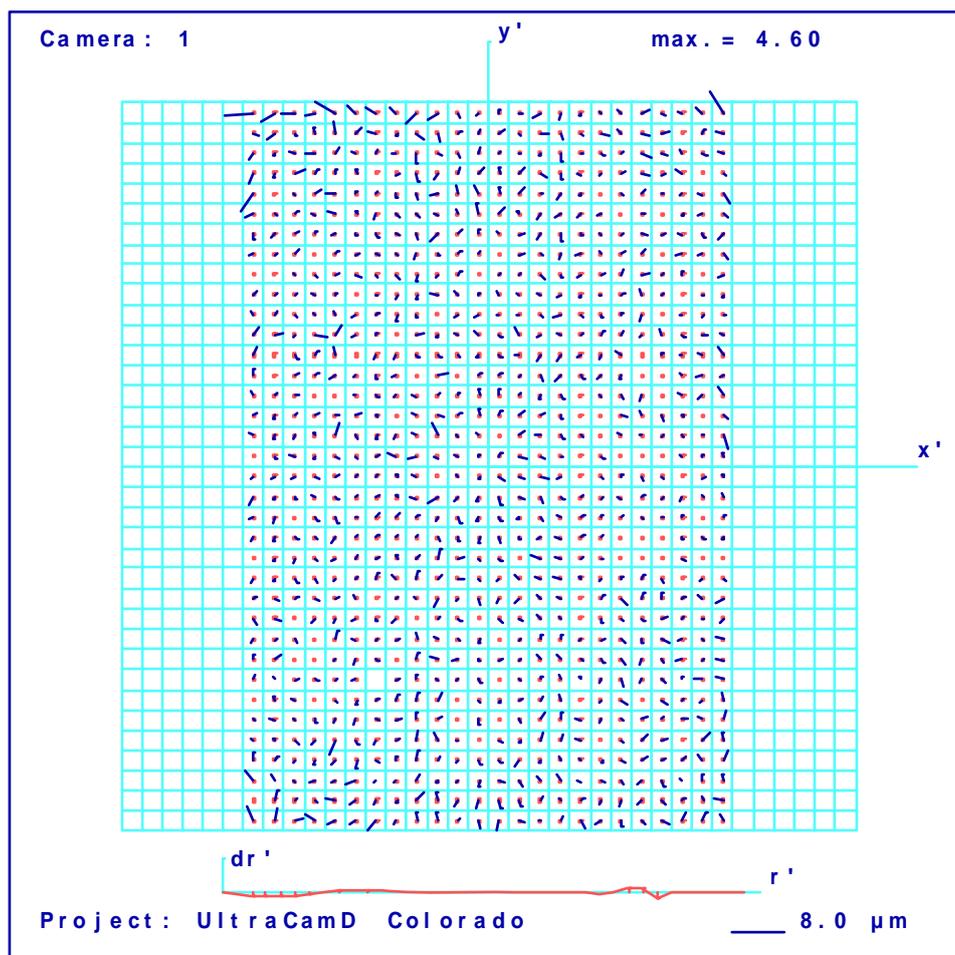


Abb. 5: Systematische Bild-Restfehler nach neuer Selbstkalibrierung

Abb. 6 zeigt den Block in 3D-Darstellung mit Konfidenzellipsoiden. Die grüne Farbe ist für Punkte verwendet, die in wenigstens zwei Flugstreifen gemessen wurde, die Punkte in Magenta sind nur innerhalb eines Streifens gemessen. Die Geometrie dieses Blockes mit der hohen Überdeckung und den Querstreifen ist ausgezeichnet zur Kamerakalibrierung geeignet. Man kann erwarten, dass wirklich alle Effekte aufgedeckt werden. Abb. 7 zeigt die Verteilung von Passpunkten und Prüfpunkten. Die schwarzen Punkte mit den Nummern sind die Passpunkte, die magentafarbigen Punkte mit den Vektoren die Prüfpunkte.

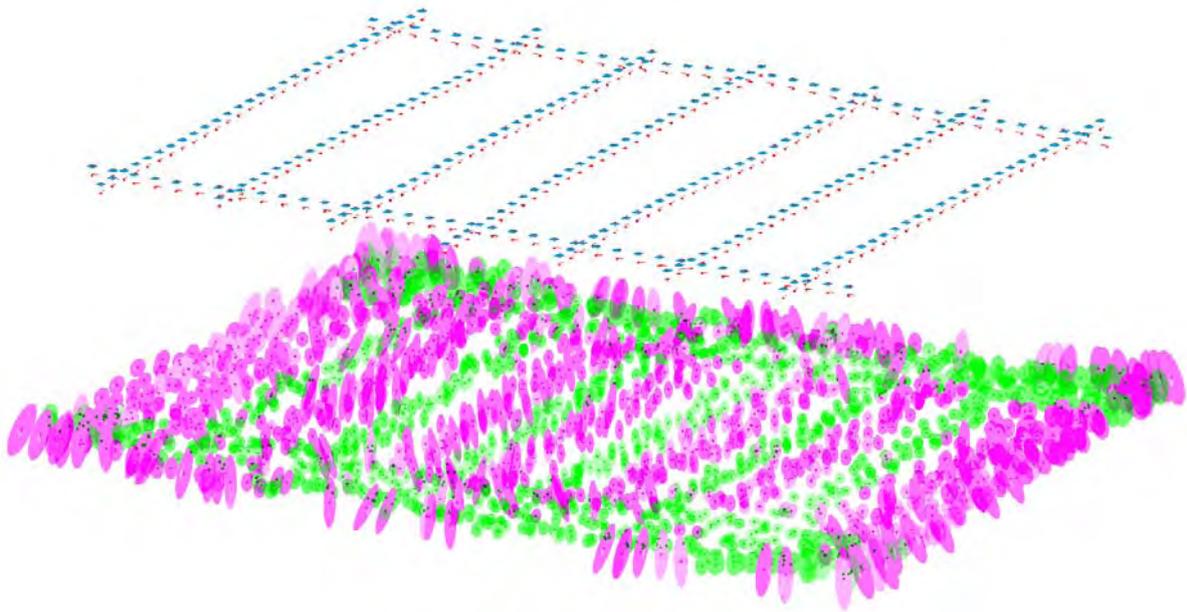


Abb. 6: Block "Colorado" in 3D Darstellung mit Konfidenzellipsoiden

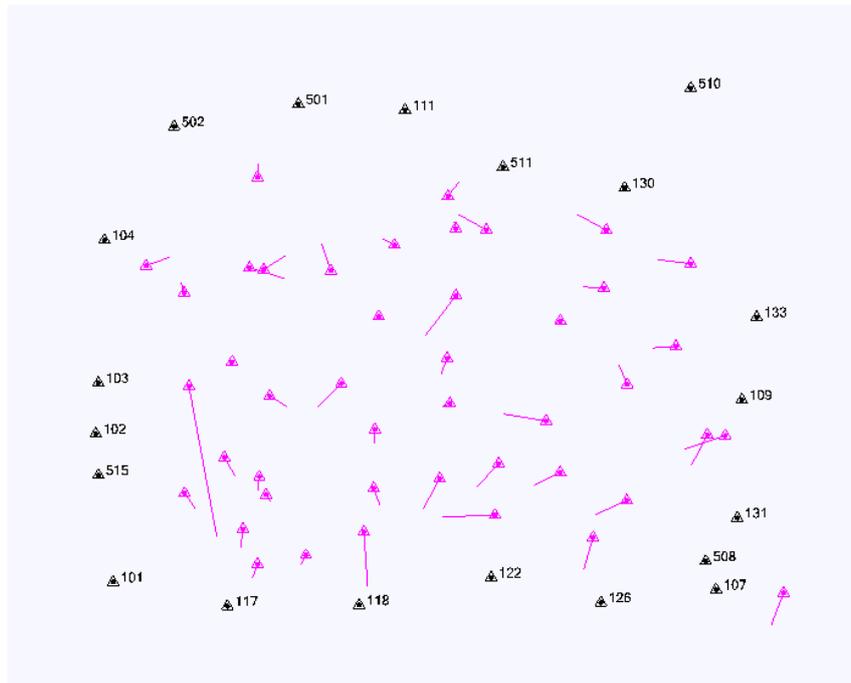


Abb. 7: Passpunkte und Prüfpunkte in Block "Colorado"

Abb. 8 zeigt das Layout vom Block "Trussville". Auch hier verschwanden alle systematischen Effekte. Sigma Null ging von 2.1 auf 1.8 μm zurück. Dabei kamen 42 zusätzliche Parameter zur Anwendung. Die Wirkung dieser Parameter auf die Bildgeometrie ist in Abb. 9 gezeigt. Es gelang nicht, einen Mustersatz von zusätzlichen Parametern zu erstellen, der für alle DMC-Projekte Erfolg brachte. Für die UltraCamD hingegen konnte für alle Projekte ein Mustersatz von nur 35 Parameter benutzt wurden. Dies ist insbesondere deshalb hervorzuheben, weil die UltraCamD neun Sensorflächen hat, die DMC hingegen nur vier.

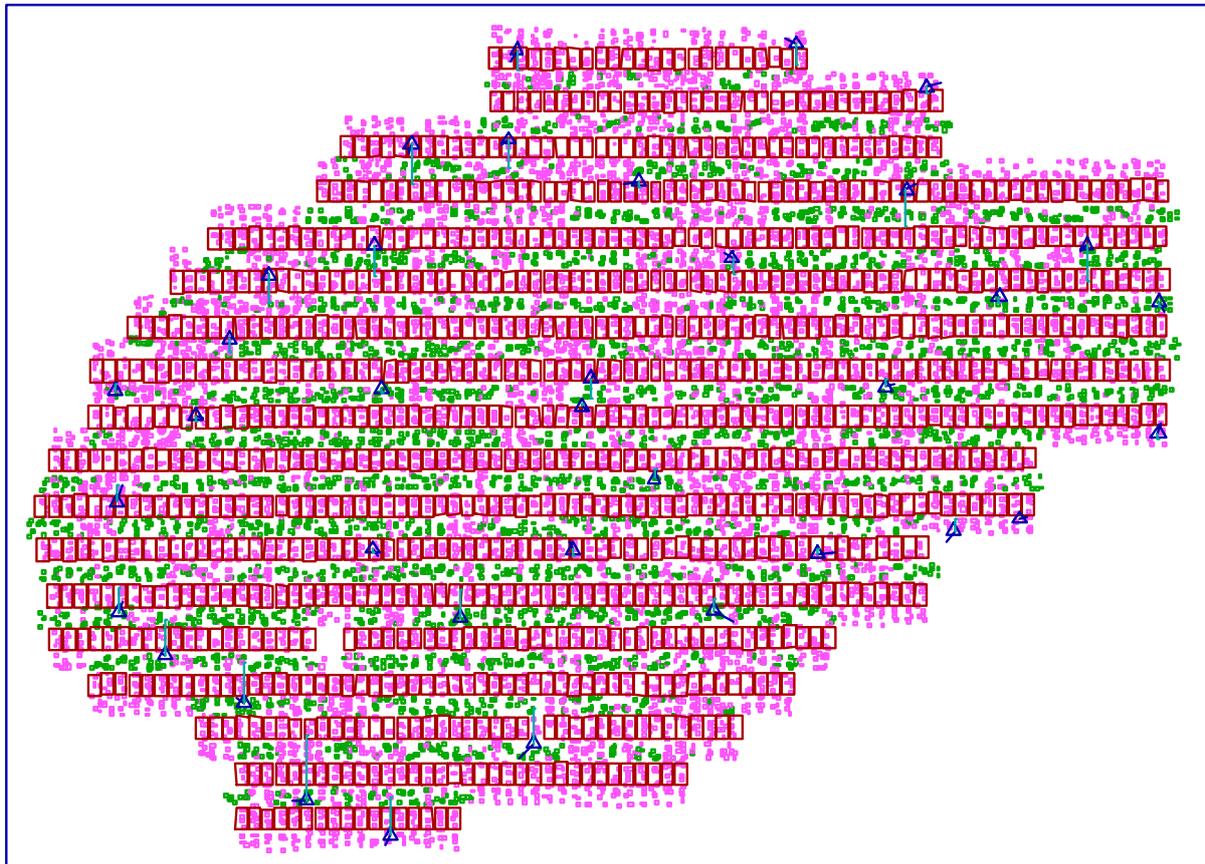


Abb. 8: Layout Block "Trussville"

Wie bereits oben ist die grüne Farbe ist für Punkte verwendet, die in wenigstens zwei Flugstreifen gemessen wurde, die Punkte in Magenta sind nur innerhalb eines Streifens gemessen. Die Footprints der Bilder (rot) sind zur besseren Übersicht auf 1/3 ihrer tatsächlichen Größe reduziert. Die Passpunkte sind in blau dargestellt.

4. Schlussfolgerungen und Ausblick

Diese kleine Untersuchung zeigt, dass bei digitalen Luftbildkameras Restfehler der Kalibrierung vorhanden sind. Sie können mit BINGO aufgedeckt und auch eliminiert werden. Um nun die gewonnenen Korrekturen in digitale Auswertesysteme einfließen zu lassen, sind prinzipiell zwei unterschiedliche Wege möglich:

- Die Korrekturen werden in Form einer Look-Up Tabelle eingespeist und bei allen weiteren Operationen berücksichtigt.

- Die Korrekturen werden als Verbesserungen der Kalibrierwerte der Bildgeometrie in die Software integriert, die die Bilder aus den einzelnen Teilbildern zusammensetzt. Das Resampling für das aktuelle Projekt ist dann zu wiederholen. Da man davon ausgeht, dass die Geometrie über einen gewissen Zeitraum stabil bleibt, ist eine solche Vorgehensweise durchaus sinnvoll. Bei einem Projekt wurden mit diesem Prinzip bereits positive Erfahrungen gesammelt.

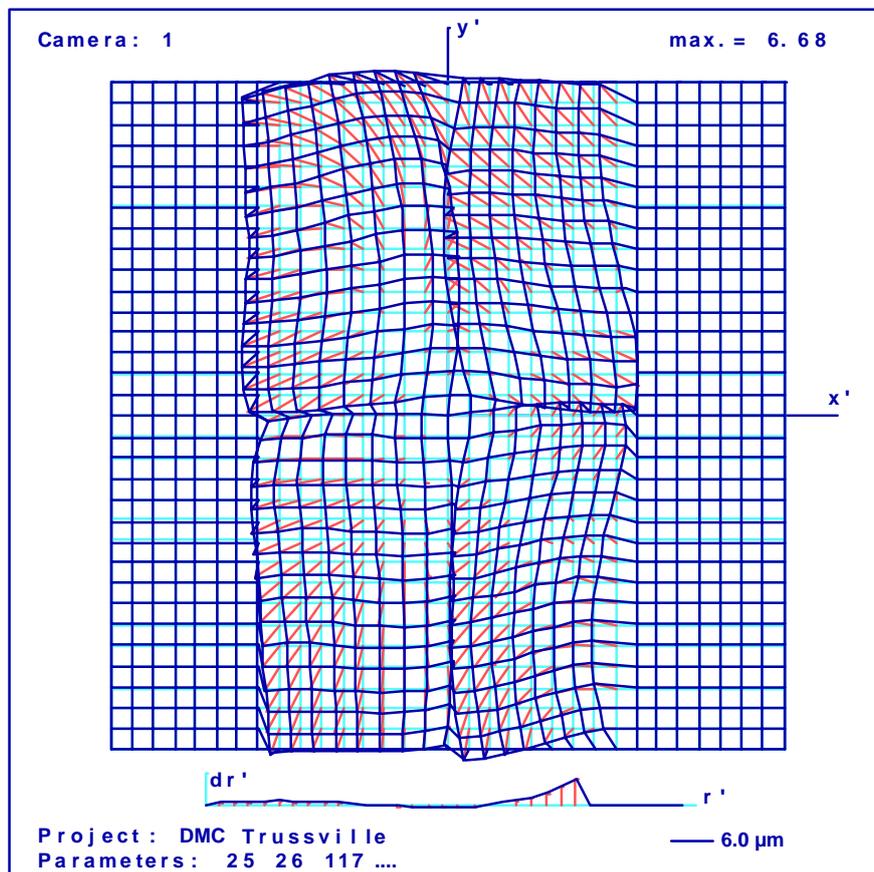


Abb. 9: Korrekturmuster zur Bildgeometrie im Block "Trussville"

An dieser Stelle erlaube ich mir darauf hinzuweisen, dass nicht nur digitale Luftbildkameras auf ihre korrekte Geometrie zu überprüfen sind. Bei Luftbildscannern namhafter Firmen wurde zum Teil auch erheblicher Kalibrierbedarf festgestellt. Leider lassen sich die Fehler der Scanner nicht auf einfache Weise durch zusätzliche Parameter eliminieren.

5. Literatur

Literatur zu den beiden beispielhaft benutzten Kameras ist in den letzten Jahren so reichlich veröffentlicht worden, dass hier lediglich auf eine Quelle hingewiesen werden soll, in der nachzulesen ist, dass die UltraCamD regelmäßig mit BINGO kalibriert wird.

KRÖPFL, K., KRUCK, E. & GRUBER, M., 2004: Geometric calibration of the digital large format aerial camera UltraCamD, ISPRS Symposium Istanbul Comm. I, WG I/2.

Autorenverzeichnis

ABBT-BRAUN, G.: siehe WEIDNER, U., LEMP, D., VOSKAMP, M., ABBT-BRAUN, G., BÄHR, H.-P. & FRIMMEL, F.H.: Anwendung von Fernerkundungsmethoden zur Schadstoffbilanzierung in urbanen Gebieten	169
ABEBE, B.: siehe KURZ, T., GLOAGUEN, R., EBINGER, C., CASEY, M. & ABEBE, B.: Deformation distribution and type in the Main Ethiopian Rift (MER); a remote sensing study	387
BACKES, M. & PLÜMER, L.: Präzise Erfassung und Kartierung von Unkräutern mit GIS	109
BÄHR, H.-P.: siehe WEIDNER, U., LEMP, D., VOSKAMP, M., ABBT-BRAUN, G., BÄHR, H.-P. & FRIMMEL, F.H.: Anwendung von Fernerkundungsmethoden zur Schadstoffbilanzierung in urbanen Gebieten	169
BALLATO, P., MARCANO, G., WETZEL, H.-U., MUTTI, M., HAGEN, M. & BETZLER, C.: Remote surface mapping of synrift deposits in North Sardinia, Italy	425
BÄßLER, M.: siehe MAAS, H.-G., DIETRICH, R., SCHWALBE, E. BÄßLER, M. & WESTFELD, P.: Photogrammetrische Bestimmung räumlich-zeitlich aufgelöster Bewegungsfelder am Jakobshavn Isbræ	301
BAUMANN, F., BRIEß, K. & KAYAL, H.: Drei-Achsen-stabilisierte Picosatelliten- plattform für Fernerkundungsaufgaben	461
BELLMANN, A. & HELLWICH, O.: Sensor and Data Fusion Contest: Comparision of Visual Analysis between SAR- and Optical Sensors	217
BETZLER, C.: siehe BALLATO, P., MARCANO, G., WETZEL, H.-U., MUTTI, M., HAGEN, M. & BETZLER, C.: Remote surface mapping of synrift deposits in North Sardinia, Italy	425
BLASCHKE, T.: siehe MÖLLER, M. & BLASCHKE, T.: Urbanes Grün – Erfassung, Analyse und Bewertung aus Fernerkundungsdaten	249
BOHMANN, G.: siehe EHLERS, M., MICHEL, U., BOHMANN, G. & TOMOWSKI, D.: Entscheidungs-basierte Datenfusion von multisensoralen Fernerkundungs- daten zur Erkennung von Siedlungsgebieten	209
BÖHME, B., STEINBRUCH, F., GLOAGUEN, R., MERKEL, B. & HEILMEIER, H.: Geocology of the Lake Urema / Central Mazambique	125
BÖTTCHER, K.: siehe FUCHS, H.-J., FRICKE, U., MAGDON, P., PADBERG, D., SIEWERT, M. & BÖTTCHER, K.: Untersuchungen zur Eignung der digitalen Luftbildkamera Vexcel UltraCamD für forstliche und landschaftsökologische Anwendungen	233
BRIEß, K.: siehe BAUMANN, F., BRIEß, K. & KAYAL, H.: Drei-Achsen-stabilisierte Picosatellitenplattform für Fernerkundungsaufgaben	461
BRUNN, A., SCHÄFER, M. & FISCHER, C.: Untersuchungen zur Aktualisierung topographischer Datenbestände durch multitemporale Auswertungen von IKONOS-Daten	179
BURGER, H.: siehe MUNIER, K., BURGER, H. & LEVENHAGEN, J.: Fernerkundungs- und GIS-Applikationen zur Datenpräsentation und -analyse im SFB 267 , Deformationsprozesse in den Anden'	417
BUSCH, W.: siehe MATEJKA, H., BUSCH, W., GORCZYK, J., MAUERSBERGER, F., NICKEL, S., RIEKEBERG, T. & VOSEN, P.: Metadatenkonzepte zur Unterstützung der GIS-Bearbeitung im Monitoring bergbaulicher Umweltauswirkungen	65
BUSCHMANN, A. & KLEINN, C.: Fernerkundungsgestützte Habitateignungs- modellierung für den Rotmilan mit Hilfe eines empirischen Ansatzes	225

CASEY, M.: siehe KURZ, T., GLOAGUEN, R., EBINGER, C., CASEY, M. & ABEBE, B.: Deformation distribution and type in the Main Ethiopian Rift (MER); a remote sensing study	387
COENRADIE, B.: siehe KLEINSCHMIT, B. & COENRADIE, B.: Kartierung von Trockenheitsfolgeschäden mit hochauflösenden Satellitenbilddaten	189
DENCHEVA, V. & KRAUS, K.: Genauigkeitsparameter der digitalen Photogrammetrie	47
DENZLER, J.: siehe TRUMMER, M., SÜßE, H., DENZLER, J. & DITRICH, F.: Metrische 3-D-Vermessung einer Straßenszene mit Spezialwissen unter minimaler Interaktion – Erweiterte monokulare Rekonstruktion	39
DIETRICH, R.: siehe MAAS, H.-G., DIETRICH, R., SCHWALBE, E. BÄBLER, M. & WESTFELD, P.: Photogrammetrische Bestimmung räumlich-zeitlich aufgelöster Bewegungsfelder am Jakobshavn Isbræ	301
DITRICH, F.: siehe TRUMMER, M., SÜßE, H., DENZLER, J. & DITRICH, F.: Metrische 3-D-Vermessung einer Straßenszene mit Spezialwissen unter minimaler Interaktion – Erweiterte monokulare Rekonstruktion	39
DÖRSTEL, C. & SCHWEBEL, R.: Qualitätsstandards für photogrammetrische Produkte und deren Umsetzung	149
EBINGER, C.: siehe KURZ, T., GLOAGUEN, R., EBINGER, C., CASEY, M. & ABEBE, B.: Deformation distribution and type in the Main Ethiopian Rift (MER); a remote sensing study	387
ECKARDT, A., WALTER, I. & SCHUSTER, R.: Neue Generation einer 360° Panoramakamera	439
EHLERS, M., MICHEL, U., BOHMANN, G. & TOMOWSKI, D.: Entscheidungsbasierte Datenfusion von multisensoralen Fernerkundungsdaten zur Erkennung von Siedlungsgebieten	209
EXNER, T.: siehe KLEINN, C., KUNTH, S., EXNER, T. & SCHEIBLER, U.: Erfassung von Veränderungen der Gehölzstrukturen (1979-1999) im Offenland- bereich der Stadt Göttingen mittels Luftbildern und Felderhebungen	243
FISCHER, C.: siehe BRUNN, A., SCHÄFER, M. & FISCHER, C.: Untersuchungen zur Aktualisierung topographischer Datenbestände durch multitemporale Auswertungen von IKONOS-Daten	179
FISLER, A. & WEISENSEE, M.: Geoanalyse von Schwermetalluntersuchungen in einem Versuchsfeld zur Beurteilung von in-situ Sanierungsmethoden ..	101
FÖRSTNER, W.: siehe LÄBE, T. & FÖRSTNER, W.: Erfahrungen mit einem neuen vollautomatischen Verfahren zur Orientierung digitaler Bilder	271
FRICKE, U.: siehe FUCHS, H.-J., FRICKE, U., MAGDON, P., PADBERG, D., SIEWERT, M. & BÖTTCHER, K.: Untersuchungen zur Eignung der digitalen Luftbildkamera Vexcel UltraCamD für forstliche und landschafts- ökologische Anwendungen	233
FRIMMEL, F.H.: siehe WEIDNER, U., LEMP, D., VOSKAMP, M., ABBT-BRAUN, G., BÄHR, H.-P. & FRIMMEL, F.H.: Anwendung von Fernerkundungsmethoden zur Schadstoffbilanzierung in urbanen Gebieten	169
FUCHS, H.-J., FRICKE, U., MAGDON, P., PADBERG, D., SIEWERT, M. & BÖTTCHER, K.: Untersuchungen zur Eignung der digitalen Luftbildkamera Vexcel UltraCamD für forstliche und landschaftsökologische Anwendungen	233
GIESE, B.: siehe GWINNER, K., SCHOLTEN, F., SPIEGEL, M., SCHMIDT, R., GIESE, B., OBERST, J., JAUMANN, R. & NEUKUM, G.: Hochauflösende Digitale Geländemodelle der Marsoberfläche auf der Grundlage von Mars Express HRSC Daten	447
GLOAGUEN, R.: siehe BÖHME, B., STEINBRUCH, F., GLOAGUEN, R., MERKEL, B. &	

HEILMEIER, H.: Geoecology of the Lake Urema / Central Mazambique	125
GLOAGUEN, R.: siehe GOERNER, A., JOLIE, E., & GLOAGUEN, R.: Tectonic induced growth of Lake Beseka (Main Ethiopian Rift)	117
GLOAGUEN, R.: siehe KURZ, T., GLOAGUEN, R., EBINGER, C., CASEY, M. & ABEBE, B.: Deformation distribution and type in the Main Ethiopian Rift (MER); a remote sensing study	387
GLOAGUEN, R.: siehe MÜLLER, F., GLOAGUEN, R., HILDNER, E., SCHMINCKE, H.-U. & SUMITA, M.: Volcano-tectonic evolution of the Miocene Montaña Horgazales complex, SW-Gran Canaria: GIS & remote sensing analysis ..	399
GLOAGUEN, R.: siehe TWARZ, C., GLOAGUEN, R. & RATSCHBACHER, L.: Active tectonics of the Pamirs: Inferences from remote sensing analysis of stream profiles and geomorphology	377
GODDING, R.: Integration aktueller Kerasensoren in optischen Messsystemen .	255
GOERNER, A., JOLIE, E., & GLOAGUEN, R.: Tectonic induced growth of Lake Beseka (Main Ethiopian Rift)	117
GORCZYK, J.: siehe MATEJKA, H., BUSCH, W., GORCZYK, J., MAUERSBERGER, F., NICKEL, S., RIEKEBERG, T. & VOSEN, P.: Metadatenkonzepte zur Unterstützung der GIS-Bearbeitung im Monitoring bergbaulicher Umweltauswirkungen	65
GRENDUS, B.: Fernstudienmaterialien Geoinformatik (FerGI) – Erfahrungen, Erkenntnisse und Ausblick	33
GUDMUNDSSON, Á.: siehe MÜNZER, U., SCHARRER, K. & GUDMUNDSSON, Á.: Near Real Time Überwachung des subglazialen Grímsvötn-Vulkanausbruchs Nov. 2004 auf Island mit ENVISAT-ASAR Daten	351
GWINNER, K., SCHOLTEN, F., SPIEGEL, M., SCHMIDT, R., GIESE, B., OBERST, J., JAUMANN, R. & NEUKUM, G.: Hochauflösende Digitale Geländemodelle der Marsoberfläche auf der Grundlage von Mars Express HRSC Daten ...	447
HAGEN, M.: siehe BALLATO, P., MARCANO, G., WETZEL, H.-U., MUTTI, M., HAGEN, M. & BETZLER, C.: Remote surface mapping of synrift deposits in North Sardinia, Italy	425
HALLE, W.: siehe OERTEL, D., HALLE, W., LORENZ, E., SKRBK, W., VENUS, H., WALTER, I., ZHUKOV, B. & WOOSTER, M.: BIRD – Wegbereiter für das zukünftige IR Element der ESA	453
HASTEDT, H., LUHMANN, T. & TECKLENBURG, W.: Simulationsbasiertes Systemdesign für die optische Messtechnik nach VDI/VDE 2634	319
HEILMEIER, H.: siehe BÖHME, B., STEINBRUCH, F., GLOAGUEN, R., MERKEL, B. & HEILMEIER, H.: Geoecology of the Lake Urema / Central Mazambique	125
HELLER, J. & PAKZAD, K.: Automatische auflösungsabhängige Anpassung variabler Straßenmodelle	57
HELLWICH, O.: siehe BELLMANN, A. & HELLWICH, O.: Sensor and Data Fusion Contest: Comparison of Visual Analysis between SAR- and Optical Sensors	217
HERING, A.: siehe MEINEL, G. & HERING, A.: Inwertsetzung von Geobasisdaten für Fachanwendungen am Beispiel der Bodenversiegelungserhebung auf Grundlage des ATKIS Basis-DLM	83
HEROLD, M.: siehe NEUMANN, K., HEROLD, M. & SCHMULLIUS, C.: GOFC-GOLD und Initiativen zur Harmonisierung und Validierung von Landbedeckungsdatensätzen	75
HESE, S. & SCHMULLIUS, C.: Object Oriented Deforestation Mapping in Siberia – Results from the SIBERIA-II Project	199
HILDNER, E.: siehe MÜLLER, F., GLOAGUEN, R., HILDNER, E., SCHMINCKE, H.-U.	

& SUMITA, M.: Volcano-tectonic evolution of the Miocene Montaña Horgazales complex, SW-Gran Canaria: GIS & remote sensing analysis ..	399
HÖDL, T.: siehe WIGGENHAGEN, M. & HÖDL, T.: Werkzeuge zur Erstellung interaktiver Lerninhalte	19
HOFMANN, O.: Kalibrierung und Georeferenzierung photogrammetrischer Aufnahmen	433
HOHM, M.: Erzeugung simulierter Bilddaten für die photogrammetrische Blockausgleichung am Beispiel von JBlock-Builder (JBB)	139
JACOBSEN, K.: Vergleich der Orientierungsverfahren für Weltraumaufnahmen ...	467
JANTOS, R.: siehe TECKLENBURG, W., JANTOS, R. & LUHMANN, T.: Untersuchungen zur Nutzung von Bildclustern für die 2D/3D-Auswertung von fast ebenen Aufnahmesituationen aus erhöhten Aufnahmestandpunkten	293
JAUMANN, R.: siehe GWINNER, K., SCHOLTEN, F., SPIEGEL, M., SCHMIDT, R., GIESE, B., OBERST, J., JAUMANN, R. & NEUKUM, G.: Hochauflösende Digitale Geländemodelle der Marsoberfläche auf der Grundlage von Mars Express HRSC Daten	447
JOLIE, E.: siehe GOERNER, A., JOLIE, E., & GLOAGUEN, R.: Tectonic induced growth of Lake Beseka (Main Ethiopian Rift)	117
KAYAL, H.: siehe BAUMANN, F., BRIEB, K. & KAYAL, H.: Drei-Achsen-stabilisierte Picosatellitenplattform für Fernerkundungsaufgaben	461
KERSTEN, T.P., STERNBERG, H. & STIEMER, E.: Terrestrisches 3D-Laserscanning im Hamburger Rathaus – Mensi GS100 und IMAGER 5003 im Vergleich ..	309
KLEINN, C., KUNTH, S., EXNER, T. & SCHEIBLER, U.: Erfassung von Veränderungen der Gehölzstrukturen (1979-1999) im Offenlandbereich der Stadt Göttingen mittels Luftbildern und Felderhebungen	243
KLEINN, C.: siehe BUSCHMANN, A. & KLEINN, C.: Fernerkundungsgestützte Habitateignungsmodellierung für den Rotmilan mit Hilfe eines empirischen Ansatzes	225
KLEINSCHMIT, B. & COENRADIE, B.: Kartierung von Trockenheitsfolgeschäden mit hochauflösenden Satellitenbilddaten	189
KNUTH, S.: siehe KLEINN, C., KUNTH, S., EXNER, T. & SCHEIBLER, U.: Erfassung von Veränderungen der Gehölzstrukturen (1979-1999) im Offenlandbereich der Stadt Göttingen mittels Luftbildern und Felderhebungen	243
KRAUS, K.: siehe DENCHEVA, V. & KRAUS, K.: Genauigkeitsparameter der digitalen Photogrammetrie	47
KRELLENBERG, K.: Vergleich pixel- und objektorientierter Methoden zur Analyse städtischer Grünanlagen	161
KRESSE, W.: Neues von ISO/TC 211 und vom Open Geospatial Consortium ...	155
KRUCK, E.: Simultankalibrierung digitaler Luftbildkameras	475
KURZ, T., GLOAGUEN, R., EBINGER, C., CASEY, M. & ABEBE, B.: Deformation distribution and type in the Main Ethiopian Rift (MER); a remote sensing study	387
LÄBE, T. & FÖRSTNER, W.: Erfahrungen mit einem neuen vollautomatischen Verfahren zur Orientierung digitaler Bilder	271
LEMP, D.: siehe WEIDNER, U., LEMP, D., VOSKAMP, M., ABBT-BRAUN, G., BÄHR, H.-P. & FRIMMEL, F.H.: Anwendung von Fernerkundungsmethoden zur Schadstoffbilanzierung in urbanen Gebieten	169
LEVENHAGEN, J.: siehe MUNIER, K., BURGER, H. & LEVENHAGEN, J.: Fernerkundungs- und GIS-Applikationen zur Datenpräsentation und -analyse im SFB 267 , Deformationsprozesse in den Anden'	417
LORENZ, E.: siehe OERTEL, D., HALLE, W., LORENZ, E., SKRBK, W., VENUS, H.,	

WALTER, I., ZHUKOV, B. & WOOSTER, M.: BIRD – Wegbereiter für das zukünftige IR Element der ESA	453
LUHMANN, T.: siehe HASTEDT, H., LUHMANN, T. & TECKLENBURG, W.: Simulationsbasiertes Systemdesign für die optische Messtechnik nach VDI/VDE 2634	319
LUHMANN, T.: siehe TECKLENBURG, W., JANTOS, R. & LUHMANN, T.: Untersuchungen zur Nutzung von Bildclustern für die 2D/3D-Auswertung von fast ebenen Aufnahmesituationen aus erhöhten Aufnahmestandpunkten .	293
MAAS, H.-G., DIETRICH, R., SCHWALBE, E., BÄßLER, M. & WESTFELD, P.: Photogrammetrische Bestimmung räumlich-zeitlich aufgelöster Bewegungsfelder am Jakobshavn Isbræ	301
MAGDON, P.: siehe FUCHS, H.-J., FRICKE, U., MAGDON, P., PADBERG, D., SIEWERT, M. & BÖTTCHER, K.: Untersuchungen zur Eignung der digitalen Luftbildkamera Vexcel UltraCamD für forstliche und landschaftsökologische Anwendungen	233
MARCANO, G.: siehe BALLATO, P., MARCANO, G., WETZEL, H.-U., MUTTI, M., HAGEN, M. & BETZLER, C.: Remote surface mapping of synrift deposits in North Sardinia, Italy	425
MARTIENßEN, T.: Ein Beitrag zur Georeferenzierung der mit Laserscannern erzeugten Punktwolken	335
MATEJKA, H., BUSCH, W., GORCZYK, J., MAUERSBERGER, F., NICKEL, S., RIEKEBERG, T. & VOSEN, P.: Metadatenkonzepte zur Unterstützung der GIS-Bearbeitung im Monitoring bergbaulicher Umweltauswirkungen	65
MAUERSBERGER, F.: siehe MATEJKA, H., BUSCH, W., GORCZYK, J., MAUERSBERGER, F., NICKEL, S., RIEKEBERG, T. & VOSEN, P.: Metadatenkonzepte zur Unterstützung der GIS-Bearbeitung im Monitoring bergbaulicher Umweltauswirkungen	65
MEINEL, G. & HERING, A.: Inwertsetzung von Geobasisdaten für Fachanwendungen am Beispiel der Bodenversiegelungserhebung auf Grundlage des ATKIS Basis-DLM	83
MERKEL, B.: siehe BÖHME, B., STEINBRUCH, F., GLOAGUEN, R., MERKEL, B. & HEILMEIER, H.: Geocology of the Lake Urema / Central Mazambique	125
MICHAJLJOW, W.: siehe WETZEL, H.-U., REIGBER, A., RICHTER, A. & MICHAJLJOW, W.: Gletschermonitoring und Gletscherseebrüche am Inyltschik (Zentraler Tienshan) – Interpretation mit optischen und Radarsatelliten	341
MICHEL, U.: siehe EHLERS, M., MICHEL, U., BOHMANN, G. & TOMOWSKI, D.: Entscheidungsbasierte Datenfusion von multisensoralen Fernerkundungsdaten zur Erkennung von Siedlungsgebieten	209
MÖLLER, M. & BLASCHKE, T.: Urbanes Grün – Erfassung, Analyse und Bewertung aus Fernerkundungsdaten	249
MÜLLER, F., GLOAGUEN, R., HILDNER, E., SCHMINCKE, H.-U. & SUMITA, M.: Volcano-tectonic evolution of the Miocene Montaña Horgazales complex, SW-Gran Canaria: GIS & remote sensing analysis	399
MULSOW, C.: Realisierung eines aktiven bildbasierten Messsystems zur Messung auf bewegten spiegelnden Oberflächen	285
MUNIER, K., BURGER, H. & LEVENHAGEN, J.: Fernerkundungs- und GIS-Applikationen zur Datenpräsentation und -analyse im SFB 267 , Deformationsprozesse in den Anden'	417
MÜNZER, U., SCHARRER, K. & GUDMUNDSSON, Á.: Near Real Time Überwachung des subglazialen Grímsvötn-Vulkanausbruchs Nov. 2004 auf Island	

mit ENVISAT-ASAR Daten	351
MUTTI, M.: siehe BALLATO, P., MARCANO, G., WETZEL, H.-U., MUTTI, M., HAGEN, M. & BETZLER, C.: Remote surface mapping of synrift deposits in North Sardinia, Italy	425
NEUKUM, G.: siehe GWINNER, K., SCHOLTEN, F., SPIEGEL, M., SCHMIDT, R., GIESE, B., OBERST, J., JAUMANN, R. & NEUKUM, G.: Hochauflösende Digitale Geländemodelle der Marsoberfläche auf der Grundlage von Mars Express HRSC Daten	447
NEUMANN, K., HEROLD, M. & SCHMULLIUS, C.: GOFC-GOLD und Initiativen zur Harmonisierung und Validierung von Landbedeckungsdatensätzen	75
NICKEL, S.: siehe MATEJKA, H., BUSCH, W., GORCZYK, J., MAUERSBERGER, F., NICKEL, S., RIEKEBERG, T. & VOSEN, P.: Metadatenkonzepte zur Unterstützung der GIS-Bearbeitung im Monitoring bergbaulicher Umweltauswirkungen	65
OBERST, J.: siehe GWINNER, K., SCHOLTEN, F., SPIEGEL, M., SCHMIDT, R., GIESE, B., OBERST, J., JAUMANN, R. & NEUKUM, G.: Hochauflösende Digitale Geländemodelle der Marsoberfläche auf der Grundlage von Mars Express HRSC Daten	447
OERTEL, D., HALLE, W., LORENZ, E., SKRBK, W., VENUS, H., WALTER, I., ZHUKOV, B. & WOOSTER, M.: BIRD – Wegbereiter für das zukünftige IR Element der ESA	453
OLDANI, A.: siehe RIEKE-ZAPP, D., OLDANI, A. & PEIPE, J.: Eine neue, hochauflösende Mittelformatkamera für die digitale Nahbereichs- photogrammetrie	263
PADBERG, D.: siehe FUCHS, H.-J., FRICKE, U., MAGDON, P., PADBERG, D., SIEWERT, M. & BÖTTCHER, K.: Untersuchungen zur Eignung der digitalen Luftbildkamera Vexcel UltraCamD für forstliche und landschaftsökologische Anwendungen	233
PAKZAD, K.: siehe HELLER, J. & PAKZAD, K.: Automatische auflösungs- abhängige Anpassung variabler Straßenmodelle	57
PEIPE, J.: siehe PRZYBILLA, H.-J. & PEIPE, J.: Vergleich digitaler Aufnahmesysteme am Beispiel der Formkontrolle industrieller Bauteile	327
PEIPE, J.: siehe RIEKE-ZAPP, D., OLDANI, A. & PEIPE, J.: Eine neue, hochauflösende Mittelformatkamera für die digitale Nahbereichs- photogrammetrie	263
PLÜMER, L.: siehe BACKES, M. & PLÜMER, L.: Präzise Erfassung und Kartierung von Unkräutern mit GIS	109
PLÜMER, L.: siehe SCHMITTWILKEN, J. & PLÜMER, L.: Dokumentation und Publikation geobotanischer Fachinformationen durch Kopplung von GIS und Content Management Systemen	93
PRINZ, T.: siehe ROTH, J. & PRINZ, T.: Laguna Beach – Einsatzmöglichkeiten digitaler Höhenmodelle aus Fernerkundungsdaten für die geologische Interpretation zeitabhängiger tektonomorphologischer Oberflächenformen .	407
PRZYBILLA, H.-J. & PEIPE, J.: Vergleich digitaler Aufnahmesysteme am Beispiel der Formkontrolle industrieller Bauteile	327
RATSCHBACHER, L.: siehe TWARZ, C., GLOAGUEN, R. & RATSCHBACHER, L.: Active tectonics of the Pamirs: Inferences from remote sensing analysis of stream profiles and geomorphology	377
REIGBER, A.: siehe WETZEL, H.-U., REIGBER, A., RICHTER, A. & MICHAJLJOW, W.: Gletschermonitoring und Gletscherseebrüche am Inyltschik (Zentraler Tianshan) – Interpretation mit optischen und Radarsatelliten	341

RICHTER, A.: siehe WETZEL, H.-U., REIGBER, A., RICHTER, A. & MICHAJLJOW, W.: Gletschermonitoring und Gletscherseebrüche am Inyltschik (Zentraler Tienshan) – Interpretation mit optischen und Radarsatelliten	341
RIEKENBERG, T.: siehe MATEJKA, H., BUSCH, W., GORCZYK, J., MAUERSBERGER, F., NICKEL, S., RIEKEBERG, T. & VOSEN, P.: Metadatenkonzepte zur Unterstützung der GIS-Bearbeitung im Monitoring bergbaulicher Umweltauswirkungen	65
RIEKE-ZAPP, D., OLDANI, A. & PEIPE, J.: Eine neue, hochauflösende Mittelformatkamera für die digitale Nahbereichsphotogrammetrie	263
ROLAND, M.: siehe WOLF, B.-M. & ROLAND, M.: Aktive Konturen für die automatische Messung von natürlichen Punkten bei industriellen Anwendungen	279
ROTH, J. & PRINZ, T.: Laguna Beach – Einsatzmöglichkeiten digitaler Höhenmodelle aus Fernerkundungsdaten für die geologische Interpretation zeitabhängiger tektonomorphologischer Oberflächenformen	407
SCHÄFER, M.: siehe BRUNN, A., SCHÄFER, M. & FISCHER, C.: Untersuchungen zur Aktualisierung topographischer Datenbestände durch multitemporale Auswertungen von IKONOS-Daten	179
SCHARRER, K.: siehe MÜNZER, U., SCHARRER, K. & GUDMUNDSSON, Á.: Near Real Time Überwachung des subglazialen Grímsvötn-Vulkanausbruchs Nov. 2004 auf Island mit ENVISAT-ASAR Daten	351
SCHEIBLER, U.: siehe KLEINN, C., KUNTH, S., EXNER, T. & SCHEIBLER, U.: Erfassung von Veränderungen der Gehölzstrukturen (1979-1999) im Offenlandbereich der Stadt Göttingen mittels Luftbildern und Felderhebungen	243
SCHIEWE, J.: Kritische Bestandsaufnahme zur Einführung gestufter Studiengänge im Bereich GIS und Geodäsie	11
SCHMIDT, R.: siehe GWINNER, K., SCHOLTEN, F., SPIEGEL, M., SCHMIDT, R., GIESE, B., OBERST, J., JAUMANN, R. & NEUKUM, G.: Hochauflösende Digitale Geländemodelle der Marsoberfläche auf der Grundlage von Mars Express HRSC Daten	447
SCHMINCKE, H.-U.: siehe MÜLLER, F., GLOAGUEN, R., HILDNER, E., SCHMINCKE, H.-U. & SUMITA, M.: Volcano-tectonic evolution of the Miocene Montaña Horgazales complex, SW-Gran Canaria: GIS & remote sensing analysis	399
SCHMITTWILKEN, J. & PLÜMER, L.: Dokumentation und Publikation geobotanischer Fachinformationen durch Kopplung von GIS und Content Management Systemen	93
SCHMULLIUS, C.: siehe HESE, S. & SCHMULLIUS, C.: Object Oriented Deforestation Mapping in Siberia – Results from the SIBERIA-II Project ...	199
SCHMULLIUS, C.: siehe NEUMANN, K., HEROLD, M. & SCHMULLIUS, C.: GOFC-GOLD und Initiativen zur Harmonisierung und Validierung von Landbedeckungsdatensätzen	75
SCHOLTEN, F.: siehe GWINNER, K., SCHOLTEN, F., SPIEGEL, M., SCHMIDT, R., GIESE, B., OBERST, J., JAUMANN, R. & NEUKUM, G.: Hochauflösende Digitale Geländemodelle der Marsoberfläche auf der Grundlage von Mars Express HRSC Daten	447
SCHUSTER, R.: siehe ECKARDT, A., WALTER, I. & SCHUSTER, R.: Neue Generation einer 360° Panoramakamera	439
SCHWALBE, E.: siehe MAAS, H.-G., DIETRICH, R., SCHWALBE, E. BÄßLER, M. & WESTFELD, P.: Photogrammetrische Bestimmung räumlich-zeitlich	

aufgelöster Bewegungsfelder am Jakobshavn Isbræ	301
SCHWEBEL, R.: siehe DÖRSTEL, C. & SCHWEBEL, R.: Qualitätsstandards für photogrammetrische Produkte und deren Umsetzung	149
SIEWERT, M.: siehe FUCHS, H.-J., FRICKE, U., MAGDON, P., PADBERG, D., SIEWERT, M. & BÖTTCHER, K.: Untersuchungen zur Eignung der digitalen Luftbildkamera Vexcel UltraCamD für forstliche und landschaftsökologische Anwendungen	233
SKRBK, W.: siehe OERTEL, D., HALLE, W., LORENZ, E., SKRBK, W., VENUS, H., WALTER, I., ZHUKOV, B. & WOOSTER, M.: BIRD – Wegbereiter für das zukünftige IR Element der ESA	453
SPIEGEL, M.: siehe GWINNER, K., SCHOLTEN, F., SPIEGEL, M., SCHMIDT, R., GIESE, B., OBERST, J., JAUMANN, R. & NEUKUM, G.: Hochauflösende Digitale Geländemodelle der Marsoberfläche auf der Grundlage von Mars Express HRSC Daten	447
STEINBERG, H.: siehe KERSTEN, T.P., STERNBERG, H. & STIEMER, E.: Terrestrisches 3D-Laserscanning im Hamburger Rathaus – Mensi GS100 und IMAGER 5003 im Vergleich	309
STEINBRUCH, F.: siehe BÖHME, B., STEINBRUCH, F., GLOAGUEN, R., MERKEL, B. & HEILMEIER, H.: Geocology of the Lake Urema / Central Mazambique	125
STIEMER, E.: siehe KERSTEN, T.P., STERNBERG, H. & STIEMER, E.: Terrestrisches 3D-Laserscanning im Hamburger Rathaus – Mensi GS100 und IMAGER 5003 im Vergleich	309
SUMITA, M.: siehe MÜLLER, F., GLOAGUEN, R., HILDNER, E., SCHMINCKE, H.-U. & SUMITA, M.: Volcano-tectonic evolution of the Miocene Montaña Horgazales complex, SW-Gran Canaria: GIS & remote sensing analysis ...	399
SÜßE, H.: siehe TRUMMER, M., SÜßE, H., DENZLER, J. & DITRICH, F.: Metrische 3-D-Vermessung einer Straßenszene mit Spezialwissen unter minimaler Interaktion – Erweiterte monokulare Rekonstruktion	39
TECKLENBURG, W., JANTOS, R. & LUHMANN, T.: Untersuchungen zur Nutzung von Bildclustern für die 2D/3D-Auswertung von fast ebenen Aufnahme- situationen aus erhöhten Aufnahmestandpunkten	293
TECKLENBURG, W.: siehe HASTEDT, H., LUHMANN, T. & TECKLENBURG, W.: Simulationsbasiertes Systemdesign für die optische Messtechnik nach VDI/VDE 2634	319
THEILEN-WILLIGE, B.: Remote Sensing and GIS Contribution to Tsunami Risk Detection	363
TOMOWSKI, D.: siehe EHLERS, M., MICHEL, U., BOHMANN, G. & TOMOWSKI, D.: Entscheidungs-basierte Datenfusion von multisensoralen Fernerkundungs- daten zur Erkennung von Siedlungsgebieten	209
TRUMMER, M., SÜßE, H., DENZLER, J. & DITRICH, F.: Metrische 3-D-Vermessung einer Straßenszene mit Spezialwissen unter minimaler Interaktion – Erweiterte monokulare Rekonstruktion	39
TWARZ, C., GLOAGUEN, R. & RATSCHBACHER, L.: Active tectonics of the Pamirs: Inferences from remote sensing analysis of stream profiles and geomorphology	377
VENUS, H.: siehe OERTEL, D., HALLE, W., LORENZ, E., SKRBK, W., VENUS, H., WALTER, I., ZHUKOV, B. & WOOSTER, M.: BIRD – Wegbereiter für das zukünftige IR Element der ESA	453
VOSEN, P.: siehe MATEJKA, H., BUSCH, W., GORCZYK, J., MAUERSBERGER, F., NICKEL, S., RIEKEBERG, T. & VOSEN, P.: Metadatenkonzepte zur Unterstützung der GIS-Bearbeitung im Monitoring bergbaulicher	

Umweltauswirkungen	65
VOSKAMP, M.: siehe WEIDNER, U., LEMP, D., VOSKAMP, M., ABBT-BRAUN, G., BÄHR, H.-P. & FRIMMEL, F.H.: Anwendung von Fernerkundungsmethoden zur Schadstoffbilanzierung in urbanen Gebieten	169
WÄLDER, O.: Wie viel Mathematik braucht ein Ingenieur?	27
WALTER, I.: siehe ECKARDT, A., WALTER, I. & SCHUSTER, R.: Neue Generation einer 360° Panoramakamera	439
WALTER, I.: siehe OERTEL, D., HALLE, W., LORENZ, E., SKRBK, W., VENUS, H., WALTER, I., ZHUKOV, B. & WOOSTER, M.: BIRD – Wegbereiter für das zukünftige IR Element der ESA	453
WEIDNER, U., LEMP, D., VOSKAMP, M., ABBT-BRAUN, G., BÄHR, H.-P. & FRIMMEL, F.H.: Anwendung von Fernerkundungsmethoden zur Schadstoffbilanzierung in urbanen Gebieten	169
WEISENSEE, M.: siehe FISLER, A. & WEISENSEE, M.: Geoanalyse von Schwermetalluntersuchungen in einem Versuchsfeld zur Beurteilung von in-situ Sanierungsmethoden	101
WESTFELD, P.: siehe MAAS, H.-G., DIETRICH, R., SCHWALBE, E. BÄBLER, M. & WESTFELD, P.: Photogrammetrische Bestimmung räumlich-zeitlich aufgelöster Bewegungsfelder am Jakobshavn Isbræ	301
WETZEL, H.-U., REIGBER, A., RICHTER, A. & MICHAJLJOW, W.: Gletscher- monitoring und Gletscherseebrüche am Inyltschik (Zentraler Tienshan) – Interpretation mit optischen und Radarsatelliten	341
WETZEL, H.-U.: siehe BALLATO, P., MARCANO, G., WETZEL, H.-U., MUTTI, M., HAGEN, M. & BETZLER, C.: Remote surface mapping of synrift deposits in North Sardinia, Italy	425
WIGGENHAGEN, M. & HÖDL, T.: Werkzeuge zur Erstellung interaktiver Lerninhalte .	19
WOLF, B.-M. & ROLAND, M.: Aktive Konturen für die automatische Messung von natürlichen Punkten bei industriellen Anwendungen	279
WOOSTER, M.: siehe OERTEL, D., HALLE, W., LORENZ, E., SKRBK, W., VENUS, H., WALTER, I., ZHUKOV, B. & WOOSTER, M.: BIRD – Wegbereiter für das zukünftige IR Element der ESA	453
ZHUKOV, B.: siehe OERTEL, D., HALLE, W., LORENZ, E., SKRBK, W., VENUS, H., WALTER, I., ZHUKOV, B. & WOOSTER, M.: BIRD – Wegbereiter für das zukünftige IR Element der ESA	453