

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



Band 12

2003



Vorträge

23. Wissenschaftlich-Technische
Jahrestagung der DGPF

9. – 11. September 2003
in Bochum



Fachhochschule Bochum
Lennershofer Str. 140
D – 44801 Bochum
www.fh-bochum.de

*Auf dem Weg zu operationellen Prozessketten in
Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation*

ISSN 0942-2870

Eckhardt Seyfert, Hrsg

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



Band 12

2003

Vorträge

23. Wissenschaftlich-Technische
Jahrestagung der DGPF

9. – 11. September 2003
in Bochum

*Auf dem Weg zu
operationellen Prozessketten in
Photogrammetrie, Fernerkundung
und Geoinformation*

ISSN 0942-2870

Eckhardt Seyfert, Hrsg.

ISSN 0942-2870

Publikationen der
Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung
Band 12, 464 S., Potsdam 2003
Hrsg.: Eckhardt Seyfert

© Deutsche Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung
und Geoinformation e.V. (DGPF)
Münster 2003

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: praesident@dgpf.de

Druck :

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

INHALTSVERZEICHNIS

Plenarvorträge

- PLÜMER, L.: Geoinformation – Chancen und Herausforderungen von
Multimedia für die Ausbildung in einem interdisziplinären Studienfach 9
- BÄUMKER, M. ; HAHN, H ; HEIMES, F.-J. & VESTJENS, G.: Ein strenges funktionales
Modell für die direkte Georeferenzierung und modellgestützte Regelung
einer Fernerkundungsplattform 15

Ausbildung

(Leitung: Dipl.-Ing. Helmut Kantelhardt, Dr.-Ing. Jochen Schiewe)

- KONECNY, G.: Studium des Geoinformationswesens in Nordamerika für Deutsche 41
- WIGGENHAGEN, M. & SANTEL, F.: Aktuelle Erfahrungen im Einsatz von E-Learning
und photogrammetrischer Auswertesoftware im Fachbereich „Bauingenieur-
und Vermessungswesen“ 47
- SCHIEWE, J.: eLearning-Angebote in Geoinformatik und Fernerkundung: Mehrwert
oder Mode-Erscheinung? 53

Bildanalyse

Leitung: Dr.-Ing. Andreas Busch)

- DEBITSCH R.: Automatische V/H und Driftberechnung beim Bildflug 61
- HOFMANN, A.D. : Untersuchungen im 1D- und 2D-Parameterraum von Punktwolken
aus Flugzeuglaserscannerdaten 73
- JANOWSKY, R. & GÄHLER, M.: Hierarchisches Klassifikationsverfahren zur
automatisierten Ableitung von Biotoptypen aus HRSC-AX-Scannerdaten 81
- STECKLING, T.; KLÖTZER, H.; SUTHAU, T.; WÄLTER, S.; WANKER, E. & HELLWICH, O.:
Objekterkennung und Modellierung zellulärer Strukturen aus
mikroskopischen Bildern 89
- STRAUB, B.-M.: Automatische Extraktion von Bäumen aus Luftbildern und
Oberflächenmodellen 99

Geoinformationssysteme

(Leitung: Prof. Dr.-Ing. Monika Sester)

LESSING, R.; LIPPOLD, R. & LÜNSMANN, F.: Ansätze zur servergesteuerten Erfassung und Auswertung von GeoObjekten	107
SCHEUGENPFLUG, S.: GIS-Forschung über Waldökosysteme im Nationalpark Bayerischer Wald	115
BRIESE, C. & KRAUS, K.: Laser-Geländemodelle: Zusammenspiel von Filterung und Datenreduktion	125
HATGER, C. & KRAMEIKE, K.: Interpretation und Generalisierung dichter Digitaler Geländemodelle.....	135
SPRECKELS, V.: Einführung fester Transformationsparameter vom ETRS89 zum Gauß-Krüger-Koordinatensystem über NWREF-Punkte zur einheitlichen Führung der Koordinaten und GIS-Datenbestände der Deutschen Steinkohle AG (DSK AG)	145

Internationale Standardisierung

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

NEUMANN, K. & SCHWEBEL, R.: Normentwurf für gescannte Luftbilder	157
WIGGENHAGEN, M. & WISSMANN, U.: Untersuchungen zur Prüfung digitaler photogrammetrischer Produkte nach DIN 18740	163
KRESSE, W.: Internationale Normungsarbeit für Photogrammetrie und Fernerkundung	171

Interpretation von Fernerkundungsdaten

Leitung: Prof. Dr. Cornelia Gläßer)

VOZIKIS, G.; FRASER, C. & JANSA, J.: Alternative Sensor Orientation Models for High Resolution Satellite Imagery	179
MEINEL, G. & NEUBERT, M.: Bildsegmentierer – Ansätze, vergleichende Untersuchungsmethodik und erste Ergebnisse	187
HESE, S. & SCHMULLIUS, C.: A Neural Network Change Detection Approach for Analysis of Afforestation, Reforestration and Deforestation Process in Siberia	195
GRENZDÖRFFER, G.; WESSNER, A. & FRANZ, S.: Kombinierte visuelle und digitale Flächennutzungsklassifizierung der Hansestadt Rostock auf der Grundlage von HRSC-AX Daten	203

BRUNN, A. & FISCHER, C.: Erfassung bergbaubedingter Veränderung von Vegetationsparametern durch Nutzung hyperspektraler Bilddaten	211
MÜTERTHIES, A. & MÜLLENHOFF, O.: Hochwasserschutz mit SAR-Daten: Das Projekt SediSAR (Sedimentbezogene Erkundung des Deichuntergrundes zur Integrativen Stabilitätsanalyse durch Angewandte Geologie und Remote Sensing)	221
BUCERIUS, M. & FUß, R.: Fernerkundung auf Schutz- und Förderflächen – zwei Projekte des Bayerischen Landesamtes für Umweltschutz	229
WEICHEL, H. & LÜNSMANN, F.: Erfahrungen und Ergebnisse bei der Operationalisierung von Prozessschritten für die Verarbeitung von SAR-Daten	239
NOCKER, U.; PILARSKI, M. & V. DORSTEN, P.: Monitoring von Vegetationsstrukturen auf ehemaligen Truppenübungsplätzen mittels multitemporaler Fernerkundungsdaten – Möglichkeiten und Grenzen	247
BOCHOW, M.; GREIWE, A. & EHLERS, M.: Ein Prozessmodell zur Analyse von Hyperspektraldaten in urbanen Gebieten	255
NEIDHARDT, F.: Stereo – GisPlay	265

Nahbereichsphotogrammetrie

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

RAGUSE, K. & WIGGENHAGEN, M.: Beurteilung der Optischen Messkette durch Simulation der Aufnahmeconfiguration	275
BOOCHS, F.; ECKHARDT, S. & FISCHER, B.: Einsatz des Open Source CAD Paketes „Open CASCADE“ für die stereoskopische Objekterfassung aus digitalen Messbildern	285
STAIGER, R. & ETTTEL, M.: Untersuchungen des Laserscanners IMAGER 5003 von Zoller & Fröhlich	293
SUTHAU, T.: Augmented Reality Techniken für den Einsatz in der Leberchirurgie .	301
MÜLLER, C.; HASTEDT, H.; TECKLENBURG, W. & LUHMANN, T.: Erstellung und Analyse von 3D-Oberflächenmodellen zur Beobachtung der Beständigkeit von Fugenmörtel	311
THOMAS, H. & GRENZDÖRFFER, G.: Digitale Nahbereichsphotogrammetrie zur Verformungsmessung an bewehrten mineralischen Oberflächenabdichtungen	319
GLEITSMANN, L. & KAPPAS, M.: DGM-Erstellung und Reliefanalyse aus Schrägluftbildern in Alaska als Grundlage angewandter Klimaforschung ...	329

Fernerkundung in der Geologie

(Leitung: Dr. Hans-Ullrich Wetzel)

WETZEL, H.-U. & FRANZKE, H.J.: Lassen sich über die Fernerkundung weitere Kenntnisse zur seismogenen Zone Bodensee-Stuttgart (9°-Ost) gewinnen?	339
THEILEN-WILLIGE, B.: Structural Interpretation of LANDSAT ETM- and ERS-Radar Satellite Data from Southwest Czech Republic and Northern Austria as Contribution to Seismic Microzonation Studies	349
ZUMSPREKEL, H. & BISCHOFF, L.: Möglichkeiten der Fernerkundung zur Analyse terrestrischer Impaktstrukturen	363
BUDE, S. & PRINZ, T.: Das geostrukturelle Inventar zwischen Arunta Block und Amadeus Basin (Zentralaustralien) : Digitale Fernerkundungsanalysen und Geländebefunde im Kontaktbereich intrakratoner Blöcke	375
SCHÄFER, M. & FISCHER, C.: Auswertung von LANDSAT-7 ETM+ und Aster-Daten zur Erfassung von Temperaturanomalien der Landoberfläche	387
OTT, N.: Visuelle Interpretation versus digitale Klassifizierung: Kontextuelle Methoden in den Geowissenschaften	397
MAIBAUM, N.; RÖHRING, M. & HELMCKE, D.: Geogefahren im Klostertal, Vorarlberg/Österreich - Analyse komplexer geologischer Gefährdung mit Mitteln der Fernerkundung	405

Sensoren und Plattformen

(Leitung: Dr. Rainer Sandau)

CONRADT, M.; SRINIVASAN, T.P. & SAKOWSKI, O.: Geo-Referenzierung der Daten vom Mikrosatelliten BIRD	411
SCHOLTEN, F. & GWINNER, K.: Parallelisierung und Automatisierung bei der Verarbeitung von 3-Zeilen-Scannerdaten	419
JACOBSEN, K.: Auswertung von QuickBird- und IKONOS-Aufnahmen	427
TUNGALAGSAIKHAN, P.; GÜNTHER, K.P.; GESELL, G.; DECH, S.W. & RUPPERT T.: Operational processing of AVHRR data at DFD	435
GEHRKE, S.; WÄHLISCH, M.; LEHMANN, H.; SCHUMACHER, T. & ALBERTZ, J.: Cartography with HRSC on Mars Express – The New Series „Topographic Image Map Mars 1:200,000”	451
Autorenverzeichnis	459

Vorwort

Im vorigen Jahr hat die Mitgliederversammlung der Gesellschaft beschlossen, die in der Satzung schon lange verankerte Bedeutung der Geoinformation auch nach außen hin stärker zu betonen und den Namen zu *Deutsche Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation (DGPF)* zu erweitern. Diese Änderung kommt nun bei unserer Wissenschaftlich-Technischen Jahrestagung 2003 erstmals zum Tragen.

Im übrigen wird diese Veranstaltung die Tradition unserer Tagungen in bewährter Weise fortführen und wieder Gelegenheit zur Vermittlung aktueller Informationen sowie zum vielfältigen Erfahrungsaustausch bieten.

Die Jahrestagung steht unter dem Motto

*Auf dem Weg zu operationellen
Prozessketten in Photogrammetrie,
Fernerkundung und Geoinformation*

Sie wird in Zusammenarbeit mit der Fachhochschule Bochum vom 9. bis 11. September 2003 in deren Räumen stattfinden. Das Programm bietet wieder zwei Plenarveranstaltungen, eine Vielzahl von thematischen Sitzungen, Poster- und Software-Demonstrationen sowie Fachexkursionen. Außerdem wird in diesem Jahr der von der Gesellschaft ausgeschriebene Nachwuchsförderpreis erstmals vergeben.

Zur diesjährigen Tagung wurden insgesamt 70 Beiträge, sei es als Plenarvortrag, Vortrag in einem der Arbeitskreise oder für eine der Poster-Präsentationen angemeldet. In dem Tagungsband liegen davon 48 in gedruckter Form vor.

Wie in den vergangenen Jahren wird der Tagungsband nicht mit Farbabbildungen erscheinen. Diese sind auf der beigelegten CD vorhanden.

Ich möchte mich im Namen des Vorstandes der DGPF bei allen Autoren der eingereichten Beiträge ausdrücklich bedanken. Ohne ihre Mühe wäre das Erscheinen dieser wieder ansprechenden Tagungsbandes nicht möglich gewesen.

Mit der örtlichen Vorbereitung haben sich die Kollegen von der Fachhochschule Bochum und ihre Mitarbeiter große Mühe gegeben. Wir hoffen, dass diese Mühe durch zahlreiche Beteiligung an der Tagung belohnt wird.

Eckhardt Seyfert
Herausgeber

Geoinformation – Chancen und Herausforderungen von Multimedia für die Ausbildung in einem interdisziplinären Studienfach

LUTZ PLÜMER¹

Geoinformation spielt als neues, interdisziplinäres Studienfach in vielen Studiengängen eine wichtige Rolle. Geodäten sind wegen ihres ingenieurmäßigen Hintergrunds für die methodische Durchdringung, Entwicklung und operationale Nutzung von Geoinformationssystemen besonders prädestiniert. Wie viele andere ingenieurwissenschaftliche Studienangebote wird das Vermessungswesen von AbiturientInnen zu wenig nachgefragt. Geoinformation und die durchgängige Nutzung von Multimedia können dazu beitragen, Anziehungskraft und Qualität des Studienangebots zu erhöhen. Das vom BMBF geförderte Verbundprojekt „Geoinformation – Neue Medien für die Einführung eines neuen Querschnittsfaches“ bietet multimediale Unterstützung für die wesentlichen Komponenten eines modernen Curriculums der Geoinformation.

„Geoinformation“ ist einer von mehreren Namen für ein neues Studienfach, das in verschiedenen Studiengängen (Geodäsie, Geographie, Kartographie, Geologie, Informatik, Agrarwissenschaften u.a.) angeboten wird; andere gebräuchliche Namen sind „Geoinformatik“ oder „Geoinformationssysteme“. Das Studienfach ist interdisziplinär, es integriert Inhalte aus der Mathematik, der Informatik, der Geodäsie, der Geographie u.a., fügt eigene Inhalte hinzu und integriert sie zu einem neuen Ganzen, das (hoffentlich) mehr ist als die Summe seiner Teile.

Geoinformation ist methodisch und praktisch aufs engste mit der Photogrammetrie verbunden. Im Vermessungswesen spielt das Studienfach Geoinformation eine besondere Rolle. Ein zukunftsgerichtetes Berufsbild des Geodäten ist ohne gründliches methodisches Wissen von Geoinformation und ohne fundierte operationale Kenntnisse von Geoinformationssystemen undenkbar. Die Entwicklung von innovativen GIS-Anwendungen in fortgeschrittenen Studienphasen (Vertieferprojekt, Diplomarbeit) bietet hervorragende Möglichkeiten, vieles von dem, was in anderen Modulen des Studiums gelernt wurde, methodisch und praktisch zu integrieren. Geoinformation ist hervorragend geeignet, Studierende für die Inhalte unseres Faches zu begeistern und seinen innovativen, zukunftsgerichteten Charakter nachvollziehbar darzustellen.

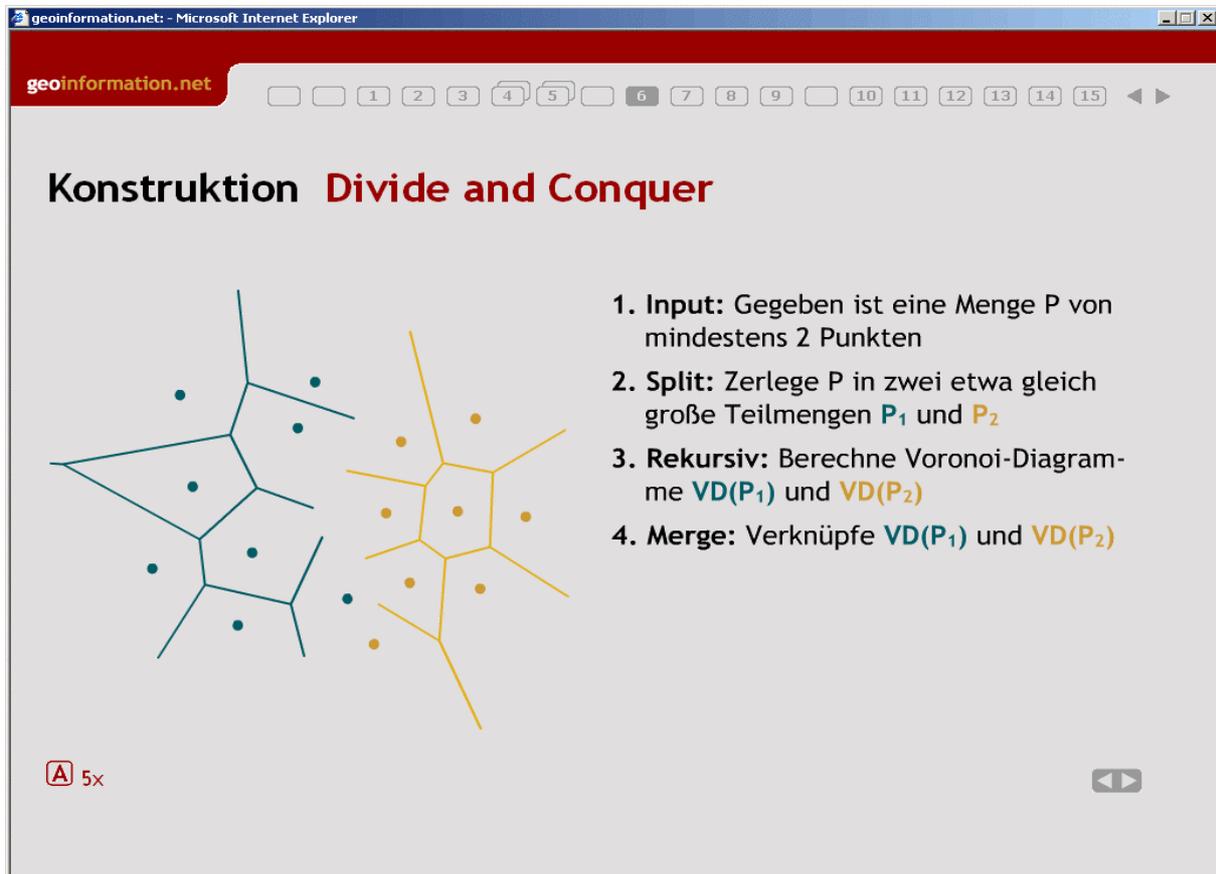
Absolventen des Studiengangs Geodäsie sind für methodische Durchdringung, Entwicklung und Nutzung von Geoinformationssystemen hervorragend ausgebildet. Als Ingenieure stellen sie sich der Aufgabe, die Modelle, die einem GIS zugrundeliegen, und die Verfahren, die in ihm ablaufen, methodisch zu durchdringen und wissenschaftlich zu beherrschen. Das unterscheidet sie von vielen Anwendern. Es geht ihnen auf der anderen Seite nicht um reine Erkenntnisse oder abstrakte Methoden, die unter idealisierten Bedingungen und unrealistischen Annahmen zu Ergebnissen führen, sondern um effektive und effiziente Verfahren, die relevante Probleme lösen. Das unterscheidet sie von vielen reinen Theoretikern. Und es geht ihnen zu guter letzt darum, Verfahren zu entwickeln, die verschiedene Sensoren und Systeme, Modelle und Algorithmen mit klaren, wohldefinierten Schnittstellen integrieren und dabei

¹ Prof. Dr. Lutz Plümer, Institut für Kartographie und Geoinformation an der Universität Bonn, Meckenheimer Allee 172, 53115 Bonn, lutz.pluemer@ikg.uni-bonn.de

nicht nur an fiktiven, sondern auch an realen Daten zu vernünftigen Ergebnissen mit vorher-sagbarer Qualität führen. Das unterscheidet sie von vielen reinen EDV-Spezialisten.

Geodäsie ist nicht der einzige Studiengang, in dem sich Geoinformation vernünftig und erfolgversprechend studieren lässt. Die Universität Bonn wird in Kürze einen viersemestrigen Masterstudiengang GIS anbieten, der auf einem Bachelor (ggf. Vordiplom+) in Geodäsie, Geographie und Informatik aufbaut und nach vier Semestern zu einem Abschluss führt. Ähnliche Überlegungen und Aktivitäten gibt es an mehreren Universitäten und Hochschulen. Wie immer man einen solchen Studiengang anlegt: ohne eine ingenieurmäßige Grundeinstellung und –ausstattung, ohne solide Grundkenntnisse in Mathematik und Informatik lässt sich Geo-information nicht erfolgreich studieren. Hier liegt ein Problem: Ingenieurwissenschaftlich ausgerichtete Studiengänge sind zur Zeit unter Studienanfängern nicht besonders populär, trotz guter Berufsaussichten. Viel zu wenig Abiturienten entscheiden sich für das Studium der Geodäsie. Von denen, die sich für das Studienfach entscheiden, erreichen zu wenige das Ziel. Diejenigen, die das Ziel erreichen, brauchen dafür zu viele Semester.

Dieses Dilemma wird vielfach beklagt. Aus volkswirtschaftlicher Sicht ist eine Lösung unumgänglich. Mehrere Herangehensweisen sind denkbar. Man kann den Schulen den Schwarzen Peter zuschieben. Man kann den abnehmenden Leistungswillen der heutigen Jugend beklagen. Oder das Versagen der politischen Klasse. Aus der Sicht eines Hochschullehrers haben diese Ansätze den Nachteil, dass sie wenig oder keine eigenen Handlungsoptionen eröffnen. Auch auf die Gefahr der Verkürzung hin bietet sich eine ingenieurwissenschaftliche Herangehensweise an, die sich auf die Prozessschritte konzentriert, auf die die Hochschulen direkten Einfluss haben. Ausgangspunkt wäre die These, dass die bislang an den Hochschulen eingesetzten Verfahren zur Ausbildung von Studierenden suboptimal sind. Es geht also um die Optimierung des Verfahrens. Dazu braucht man eine Zielfunktion. Als Ausgangs-



The image shows a screenshot of a presentation slide from a web browser. The browser's address bar shows 'geoinformation.net'. The slide title is 'Konstruktion Divide and Conquer'. On the left, there are two Voronoi diagrams: one in blue and one in yellow. On the right, there is a numbered list of four steps: 1. Input: Gegeben ist eine Menge P von mindestens 2 Punkten; 2. Split: Zerlege P in zwei etwa gleich große Teilmengen P_1 und P_2 ; 3. Rekursiv: Berechne Voronoi-Diagramme $VD(P_1)$ und $VD(P_2)$; 4. Merge: Verknüpfe $VD(P_1)$ und $VD(P_2)$. In the bottom left corner, there is a red 'A' icon and '5x' magnification. In the bottom right corner, there is a double arrow navigation icon.

Abbildung 1: Folie für die Präsenzlehre

punkt für die Definition einer solchen Funktion kann der Begriff der „Prägnanz“ dienen. Er hat in der deutschen Umgangssprache eine klare Semantik: Einen komplexen Sachverhalt mit wenigen, klaren Worten so darstellen, dass der Adressat ihn möglichst schnell und gut begreifen kann. Der französische Kartograph Jacques Bertin hat diesen Begriff in das Zentrum seiner „Graphischen Semiologie“ gestellt und gezeigt, wie man anhand objektiver Kriterien die graphische Repräsentation raumbezogener Sachverhalte in Karten bewerten und vergleichen kann.

Die „Neuen Medien“ bieten wegen der Möglichkeit bewegter Bilder und visueller Animation qualitativ neue Möglichkeiten der graphischen Repräsentation und der visuellen Kommunikation und damit der Prägnanz. Sie erlauben es, Wissen auf mehreren Kanälen (akustisch und optisch, durch das gesprochene Wort, Text, stehende und bewegte Bilder) synchron zu übertragen und damit die Bandbreite unserer informationsverarbeitenden Sensorik mit einem ganz anderen Wirkungsgrad zu nutzen, als dies bei der Beschränkung auf Tafel und Kreide möglich ist.

Die Herausforderung für die Hochschulen liegt darin, die Neuen Medien für ihre Zwecke zu nutzen und zu lernen, wie man sie angemessen und zielführend einsetzt. Die Geoinformation ist hier in einer besonders vorteilhaften Ausgangsposition. Der Raumbezug ist dem Thema GIS inhärent. Modelle und Verfahren der Geoinformatik sind für eine graphische Repräsentation prädestiniert. Die Vermittlung technischer, gestalterischer und kommunikativer Medienkompetenz an die Studierenden ist ein wesentliches Anliegen dieses Studienfachs. Und der Elan dieses jungen Faches ist noch groß genug, Experimente mit ungewissem Ausgang zu wagen und neue Methoden an neuen Inhalten zu erproben.

1. BMBF-Verbundprojekt

Im BMBF - Verbundprojekt „Geoinformation – Neue Medien für die Einführung eines neuen Querschnittsfaches“, das vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (bmb+f) im Rahmen der Initiative „Neue Medien in der Hochschullehre“ von Juli 2001 bis Dezember 2003 gefördert wird, übernehmen acht Hochschullehrer aus dem Bereich der Geowissenschaften die Aufgabe ein gemeinsames Kern-Curriculum für das neue Studienfach Geoinformation zu entwickeln und mediengerecht umzusetzen.

Partner

Partner des BMBF-Verbundprojekts sind:

- Prof. Dr. Plümer, Universität Bonn, Institut für Kartographie und Geoinformation (federführend)
- Prof. Dr. Morgenstern, Universität Bonn, Institut für Kartographie und Geoinformation
- Prof. Dr. Cremers, Universität Bonn, Institut für Informatik III
- Prof. Dr. Schilcher, TU München, Geodätisches Institut, Fachgebiet Geoinformationssysteme
- Prof. Dr. Mandl, Universität München, Institut für Pädagogische Psychologie
- Prof. Dr. Bähr, Universität Karlsruhe, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung
- Prof. Dr. Streit, Universität Münster, Institut für Geoinformatik
- Prof. Dr. Asche, Universität Potsdam, Institut für Geographie

- Prof. Dr. Reinhardt, Universität der Bundeswehr München, Institut für Geoinformati-
on und Landmanagement
- externe Partner:
 - Prof. Henrich, Kunsthochschule für Medien Köln, Professur für Grundlagen
Medialer Gestaltung
 - „Visuelle Kommunikation“, Berlin
 - Atelier 41, Berlin

Lernmodule

Für das Studienfach Geoinformation werden 14 generische Lernmodule entwickelt, die mit Methoden der Animation und Visualisierung und unter Berücksichtigung kartographischer Gestaltungsregeln methodisches Wissen vermitteln und die einen großen Teil des Curriculums der Geoinformation für die verschiedenen Studiengänge abdecken.

The screenshot shows the 'geoinformation.net' website in Microsoft Internet Explorer. The browser address bar shows 'http://131.220.71.171/BMBF/lernmodule/gemeinsam/frameset.htm'. The website has a red header with the logo and navigation links: 'Home | Sitemap | Glossar | Lesezeichen | Hilfe' and 'Suche'. Below the header is a green navigation bar with links: 'Wir über uns | Lernmodule | Projektportal | GeoCafé | Login'. The main content area is divided into several sections:

- Diagramme:** Includes a bar chart and a pie chart. Below them is an aerial photograph labeled 'Luftbild, Schummerung'.
- Wörter der Sprache:** Text explaining that graphical elements and complex signs form cartographic design tools.
- Graphische Gefüge:** Text explaining that combining graphical elements and complex signs for specific object types creates typical graphical structures, forming a graphical structure that determines the overall impression of the map (map type). Below this is a diagram labeled 'Darstellung eines graphischen Gefüges'.
- Visualisierung von GIS-Lehrstoffen:** A sidebar with a list of topics:
 1. Kartographische Zeichentheorie
 2. Kartographie nach Bertin
 3. Graphik und Semantik
 - 3.1 Der hierarchische Aufbau des kartographischen Zeichensystems
 - 3.1.1 Karte
 - 3.1.2 Kartographie
 - 3.1.3 Aufbau des kartographischen Zeichensystems
 - 3.2 Die kartographischen Gestaltungsmittel
 4. Anwendung kartographischer Gestaltungsmittel in thematischen Karten
 5. Kartographische und Modellgeneralisierung

Abb. 2: Internet-Version der Lernmodule

- Einführung für Hörer aller Fachbereiche
- Geobjekte und ihre Modellierung
- Grundlagen und Anwendung von GIS
- Geodaten und Geoinformationen
- Räumliche Bezugssysteme und Basismodelle
- GIS und Fernerkundung

- Algorithmen für GIS
- Geo-Datenbanksysteme
- Visualisierung digitaler kartographischer Modelle
- Kartographie und Neue Medien

Die Lernmodule mit weit mehr als 1.000 Folien bzw. Seiten sollen in mediendidaktischer und gestalterischer Hinsicht Maßstäbe setzen und die Qualität der Lehre nachhaltig verbessern. Sie demonstrieren die Nutzung der Neuen Medien und helfen den Studierenden, sich formale, anspruchsvolle Methoden besser und mit weniger Aufwand anzueignen.

E-Learning und Präsenzlehre

Didaktisch stehen die problembasierte Motivation und die Förderung des aktiven Lernens im Mittelpunkt. Dies wird durch zwei eng aufeinander abgestimmte Versionen der Lernmodule sichergestellt. Eine auf den Vortrag über Beamer optimierte Version unterstützt den Dozenten im Hörsaal, erfüllt aber gleichzeitig alle Voraussetzungen einer Internetanwendung; so werden sowohl Präsenzlehre, als auch Vor- und Nachbereitung anhand des Vorlesungsmaterials gefördert. Zusätzlich gibt es eine zweite, für das Internet optimierte Version. Diese ergänzt und erweitert den Stoff der Vortragsfolien, indem sie in Fliesstexten Sachverhalte aus den Folien darstellt, Zusammenhänge verdeutlicht, Querverbindungen aufzeigt sowie Tests und Übungen zur Verfügung stellt. Beide Versionen sind über das Internet in fest gefügten thematischen Einheiten öffentlich verfügbar.

Dabei erwerben Studierende ein aktive Medienkompetenz auf hohem Niveau; dies lässt sich schon heute an der hohen Qualität von Seminarvorträgen, aber auch anhand der Präzision der Rückmeldungen durch die Evaluation nachweisen.

Fazit

Geoinformation ist Pflicht- und/oder Vertiefungsfach in den klassischen geowissenschaftlichen Studiengängen (Geographie, Geodäsie, Kartographie, Geologie, u.a.), Informatik, raumplanerischen Studiengängen, in den Umweltwissenschaften und an manchen Standorten auch in wirtschafts- und sozialwissenschaftlichen Studiengängen. Der Querschnitt der angebotenen Inhalte reicht von der satellitengestützten Fernerkundung und der Positionierung mit GPS über die rechnergestützte Speicherung und Verarbeitung bis hin zur raumbezogenen Formalisierung, Modellierung und Visualisierung. Die Nachfrage nach qualifizierten GIS-Spezialisten bietet den Absolventen unserer Studiengänge mit ihren großen Studierendenzahlen eine Vielzahl anspruchsvoller und zukunftssträchtiger Arbeitsplätze.

Der Leser ist herzlich eingeladen den Stand des Projekts unter <http://www.geoinformation.net> einzusehen. Die Nutzung an einem anderen Standort ist bei Angabe der Quelle ausdrücklich erwünscht.

Ein strenges funktionales Modell für die direkte Georeferenzierung und modellgestützte Regelung einer Fernerkundungsplattform

Manfred Bäumker¹, Hubert Hahn², Franz-Josef Heimes³, Gerbrand Vestjens⁴

Zusammenfassung: Die direkte Georeferenzierung von photogrammetrisch gewonnenen Daten auf der Basis eines (D)GPS gestützten Inertialsystems gewinnt in den letzten Jahren immer mehr an Bedeutung. Eines der Hauptprobleme stellen dabei die verschiedenen definierten Koordinatensysteme und die systemabhängigen Winkeldefinitionen dar, die in der Photogrammetrie und in der Inertialtechnik benutzt werden. Die mathematischen Grundlagen der strengen direkten Georeferenzierung werden hergeleitet und vorgestellt. Viele Probleme der Georeferenzierung lassen sich vermeiden, wenn in einem Zwischenschritt ein kartesisches tangentiales Koordinatensystem eingeführt wird, bevor der Übergang zu einem UTM- oder Gauss-Krüger-Koordinatensystem als Objektkoordinatensystem erfolgt.

Eine genaue direkte Georeferenzierung erfordert aber auch eine auf die Systemanforderungen ausgerichtete Systemkalibrierung. Es wird die Kalibrationsmethode auf der Basis von Tangentialkoordinaten vorgestellt und auf die photogrammetrische Punktbestimmung mittels der im Fluge ermittelten Elemente der äußeren Orientierung sowie die Berechnung von Orthophotos eingegangen.

Die angeführten Daten wurden mit dem an der FH Bochum zusammen mit externen Partner entwickelten Luftaufnahmesystem LEO (Local Earth Observation) gewonnen. Dieses System besteht aus einem (D)GPS gestützten Inertialsystem, dessen Daten nicht nur zur Georeferenzierung sondern gleichzeitig auch zur Stabilisierung und Regelung der photogrammetrischen Sensoren dienen. Die Stabilisierung und Regelung, die für in niedrigen Höhen unter turbulenten Luftbedingungen fliegende Leichtflugzeuge ausgelegt ist, erfolgt auf der Basis einer mathematischen Modellbildung. Vorgestellt werden neben dem Luftaufnahmesystem auch die Prinzipien der modellgestützten Regelung zur Stabilisierung der Sensorplattform und die Tests am räumlichen servo-pneumatischen Mehrachsenprüfstand der Universität Kassel.

1. Koordinatensysteme und Winkel in der Inertialnavigation

In der Inertialnavigation werden die aktuellen Winkel der Fahrzeughauptachsen (= körperfestes Koordinatensystem, Index b ; x^b = Längsachse, positiv nach vorne; y^b = Querachse, positiv nach rechts; z^b = Hochachse, positiv nach unten) in Bezug auf das Navigationskoordinatensystem (= lokales nord- und lotrichtungorientiertes dreidimensionales Koordinatensystem, Index n ; x^n = Nordachse, y^n = Ostachse, z^n = Vertikalachse) benötigt. Diese Winkel (Eulerwinkel)

¹ Prof. Dr.-Ing. Manfred Bäumker, Fachhochschule Bochum

² Prof. Dr. rer. nat. habil. Hubert Hahn, Universität Kassel

³ Prof. Dr.-Ing. Franz-Josef Heimes, Fachhochschule Bochum

⁴ Ir. Gerbrand Vestjens; GEODELTA, Delft, Niederlande

werden als Kurs-, Roll- und Nickwinkel (abgekürzt: ψ , ϕ , θ) bezeichnet und werden insbesondere bei der Echtzeitnavigation zusätzlich zur Einhaltung vorgegebener Trajektorien (z.B. bei Bildflügen, Schiffsprofilen) benötigt. Die Definitionen der Fahrzeughauptachsen, des Roll-, Nick- und Kurswinkels sowie der positiven Drehrichtungen sind in Abb. 1 veranschaulicht.

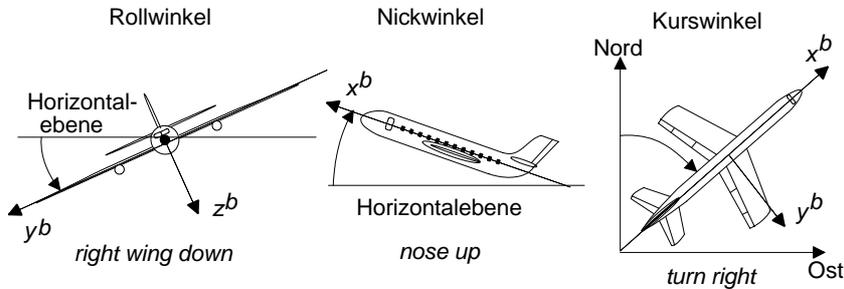


Abb. 1: Definition von Roll-, Nick- und Kurswinkel sowie der Fahrzeughauptachsen

Die Roll-, Nick- und Kurswinkel werden weiterhin benötigt, um im körperfesten Koordinatensystem gemessene Vektoren, wie z.B. Beschleunigungen, in das Navigationskoordinatensystem zu überführen, wozu zunächst aus den drei Drehwinkeln die Transformationsmatrix (Reihenfolge der Drehungen: 1. Rollwinkel ϕ um x-Achse, 2. Nickwinkel θ um y-Achse, 3. Kurswinkel ψ um z-Achse) aufzustellen ist. Diese Transformationsmatrix ergibt sich wie folgt:

$$C_b^n = R_z \psi \cdot R_y \theta \cdot R_x \phi = \begin{bmatrix} \cos \psi & \sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & \sin \phi \\ 0 & \sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix}$$

$$C_b^n = \begin{bmatrix} \cos \psi \cdot \cos \theta & \cos \psi \cdot \sin \theta \cdot \sin \phi & \sin \psi \cdot \cos \phi & \cos \psi \cdot \sin \theta \cdot \cos \phi & \sin \psi \cdot \sin \phi \\ \sin \psi \cdot \cos \theta & \sin \psi \cdot \sin \theta \cdot \sin \phi & \cos \psi \cdot \cos \phi & \sin \psi \cdot \sin \theta \cdot \cos \phi & \cos \psi \cdot \sin \phi \\ \sin \theta & \cos \theta \cdot \sin \phi & & \cos \theta \cdot \cos \phi & \end{bmatrix}$$

Der untere Index bei der Transformationsmatrix bezeichnet hier das Ursprungssystem und der obere Index das Zielsystem. Mittels dieser Transformationsmatrix lassen sich nun beliebige Vektoren (z.B. der Hebelarm der Kamera oder der GPS-Antenne) vom körperfesten Koordinatensystem ins Navigationskoordinatensystem (1) und umgekehrt (2) transformieren:

$$\mathbf{r}^n = C_b^n \cdot \mathbf{r}^b \quad (1) \quad \mathbf{r}^b = C_n^b \cdot \mathbf{r}^n = (C_b^n)^{-1} \cdot \mathbf{r}^n \quad (2)$$

Aus den Einzelelementen C_{ij} (i = Zeile, j = Spalte) der orthogonalen Drehmatrix lassen sich die Kurs- und Lagewinkel (ϕ = Rollwinkel, θ = Nickwinkel, ψ = Kurswinkel) wie folgt wieder zurückgewinnen:

$$\phi = \arctan \frac{C_{32}}{C_{33}} \quad \theta = \arcsin C_{31} \quad \psi = \arctan \frac{C_{21}}{C_{11}}$$

Beim Navigationskoordinatensystem ist zu beachten, dass dieses Koordinatensystem durch die aktuelle Lot- und Nordrichtung definiert ist und sich infolgedessen ständig ändert, wenn

das Fahrzeug eine Geschwindigkeit ungleich null aufweist (s. Abb. 2). Diese Änderung wird auch als Transportrate bezeichnet.

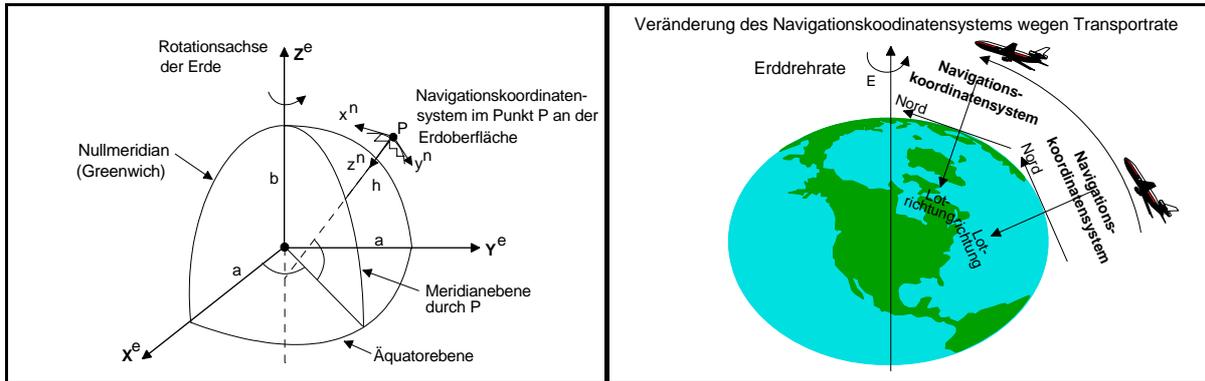


Abb. 2: links: Navigationskoordinatensystem (n-System) und erdfestes Koordinatensystem (e-System), rechts: Änderung des Navigationskoordinatensystems wegen Transportrate

Der Transportratenvektor Ω_{en}^n , der hier für ein nordorientiertes Navigationskoordinatensystem definiert ist, beschreibt die Veränderung des Navigationskoordinatensystems gegenüber einem erdfesten Koordinatensystem und lässt sich aus der Geschwindigkeit des Fahrzeugs und den Hauptkrümmungsradien des Ellipsoids wie folgt berechnen:

$$\Omega_{en}^n \begin{bmatrix} \dot{\lambda} \cdot \cos \varphi \\ \dot{\varphi} \\ \dot{\lambda} \cdot \sin \varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{V_E}{R_E h} \\ \frac{V_N}{R_N h} \\ \frac{V_E \cdot \tan \varphi}{R_E h} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_{enx}^n \\ \omega_{eny}^n \\ \omega_{enz}^n \end{bmatrix}$$

V_N : Nordgeschwindigkeit
 V_E : Ostgeschwindigkeit
 R_N, R_E : Hauptkrümmungsradien (Nord, Ost) des Erdellipsoids
 φ : geographische Breite,
 λ : geographische Länge
 h : ellipsoidische Höhe

Zur Berechnung der Transportrate müssen die geographischen (ellipsoidischen) Koordinaten (zumindest die geographische Breite) bekannt sein. Diese können z.B. aus Gauß-Krüger-Koordinaten oder aus den geozentrischen Koordinaten des erdfesten Koordinatensystems (X, Y, Z) berechnet werden. Da das Navigationskoordinatensystem immer durch die örtliche Lot- und Nordrichtung definiert ist, ändert sich bei Bewegungen des Fahrzeugs nicht nur die Richtung des körperfesten Koordinatensystems gegenüber dem Navigationskoordinatensystem sondern auch infolge der Transportrate die Richtung des Navigationskoordinatensystems gegenüber dem erdfesten geozentrischen Koordinatensystem. Für die Transformation eines Vektors vom erdfesten Koordinatensystem ins Navigationskoordinatensystem und umgekehrt werden zwei Drehmatrizen, die wie folgt zu verwenden sind, benötigt:

$$C_e^n = R_y \varphi \cdot 90^\circ \cdot R_z \lambda \begin{bmatrix} \cos \varphi & 90^\circ & 0 & \sin \varphi & 90^\circ \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ \sin \varphi & 90^\circ & 0 & \cos \varphi & 90^\circ \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \lambda & \sin \lambda & 0 \\ \sin \lambda & \cos \lambda & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \sin \varphi & 0 & \cos \varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ \cos \varphi & 0 & \sin \varphi \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \lambda & \sin \lambda & 0 \\ \sin \lambda & \cos \lambda & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sin \varphi \cdot \cos \lambda & \sin \varphi \cdot \sin \lambda & \cos \varphi \\ \sin \lambda & \cos \lambda & 0 \\ \cos \varphi & \cos \varphi \cdot \sin \lambda & \sin \varphi \end{bmatrix}$$

Die Transformation eines Vektors vom erdfesten Koordinatensystem (e-System) ins Navigationskoordinatensystem (n-System) und umgekehrt wird wie folgt durchgeführt:

$$\mathbf{r}^n = \mathbf{C}_e^n \cdot \mathbf{r}^e \quad (\mathbf{C}_n^e)^T \cdot \mathbf{r}^e$$

e-System → n-System

$$\mathbf{r}^e = \mathbf{C}_n^e \cdot \mathbf{r}^n \quad (\mathbf{C}_e^n)^{-1} \cdot \mathbf{r}^n$$

n-System → e-System

2. Koordinatensysteme und Winkel in der Photogrammetrie

Dem körperfesten Koordinatensystem beim Inertialsystem entspricht das Bildkoordinatensystem in der Photogrammetrie, das durch die Rahmenmarken der Kamera realisiert wird. Ursprung dieses Koordinatensystems ist das Projektionszentrum O, das in z-Richtung um die Kammerkonstante c vom Bildhauptpunkt H' entfernt liegt (s. Abb. 3). An Stelle des Navigationskoordinatensystems tritt hier das terrestrische Objektkoordinatensystem und als Winkel sind hier die beiden Bildneigungswinkel φ , ω (im hier angenommenen Normalfall Längsneigungswinkel φ , Querneigungswinkel ω) und der Verkantungswinkel κ definiert. Der Zusammenhang und die Transformation der Parameter, z.B. für eine direkte Georeferenzierung, hängen von dem gewählten photogrammetrischen Auswertesystem sowie weiteren Randbedingungen ab. Die nachfolgenden Ableitungen beziehen sich auf verschiedene Standardfälle der Aerophotogrammetrie und können für terrestrische Anwendungsfälle sowie für spezielle Auswerteprogramme und Auswertegeräte unterschiedlich sein. Eine Modifikation für das entsprechende Auswertesystem lässt sich an Hand der Herleitungen und der Abbildungen leicht vornehmen. Hierzu müssen die Bildneigungswinkel und der Bildverkantungswinkel sowie die Definition des Bildkoordinatensystems (B-System) und des Objektkoordinatensystems (terrestrisches E-System) bekannt sein.

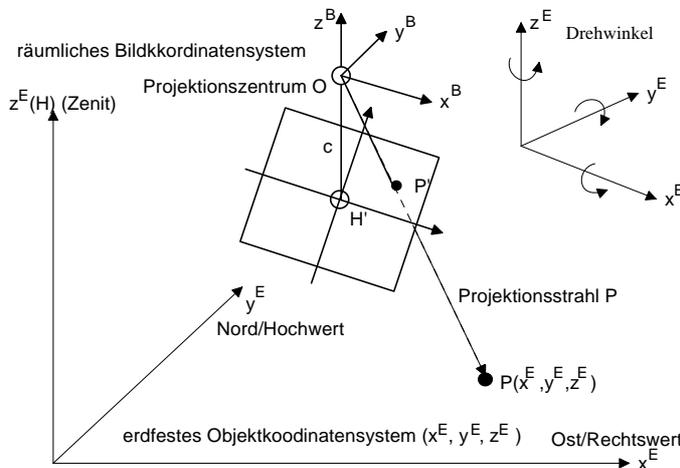


Abb. 3: Definition des Bildkoordinatensystems (B-System), des Objektkoordinatensystems (E-System) und der Orientierungswinkel: Längsneigung φ , Querneigung ω , Verkantung κ

Als Objektkoordinatensystem kommen überwiegend Gauß-Krüger- oder UTM-Koordinatensysteme zum Einsatz, wobei zur Vermeidung eines Linkssystems die x-Achse durch den Rechtswert und die y-Achse durch den Hochwert repräsentiert wird. Bei

Verwendung dieser Koordinatensysteme tritt allerdings die Problematik des nicht einheitlichen Abbildungsmaßstabs und der Meridiankonvergenz als Folge der Abbildung der gekrümmten Erdoberfläche auf. Diese Problematik lässt sich bei Verwendung eines tangentialen kartesischen Koordinatensystems vermeiden.

Sowohl die Definition der Koordinatensysteme als auch die Reihenfolge und Vorzeichen der photogrammetrischen Drehwinkel unterscheiden sich bei den photogrammetrischen Auswertesystemen (vgl. Abb. 4). Nachfolgend werden die Definitionen und notwendigen Transformationen für das Bündelausgleichssystem BLUH (Universität Hannover, JACOBSEN 1996) und das System PATB (Universität Stuttgart, INPHO GmbH 1999), die in der Aerophotogrammetrie zum Einsatz kommen, beschrieben. Weitere Definitionen für unterschiedliche analytische und analoge Auswertesysteme der Aero- und terrestrischen Photogrammetrie fin-

den sich in KRAUS 1997a, b. Eine Anpassung an das jeweilige Auswertesystem lässt sich an Hand der nachfolgend beschriebenen Transformationsmatrizen leicht realisieren.

Bei den Bündelausgleichungssystemen BLUH und PATB sind die Bildneigungswinkel (φ , ω) sowie der Verkantungswinkel (κ) wie folgt zur Bildung der orthogonalen Transformationsmatrix einzusetzen:

$$C_{E_{BLUH}}^B = R_z \kappa \cdot R_x \omega \cdot R_y \varphi = \begin{bmatrix} \cos \kappa & \sin \kappa & 0 \\ \sin \kappa & \cos \kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega & \sin \omega \\ 0 & \sin \omega & \cos \omega \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \varphi & 0 & \sin \varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \varphi & 0 & \cos \varphi \end{bmatrix}$$

$$C_{E_{PATB}}^B = R_x \omega \cdot R_y \varphi \cdot R_z \kappa = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega & \sin \omega \\ 0 & \sin \omega & \cos \omega \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \varphi & 0 & \sin \varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \varphi & 0 & \cos \varphi \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \kappa & \sin \kappa & 0 \\ \sin \kappa & \cos \kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$C_{E_{BLUH}}^B = \begin{bmatrix} \cos \kappa \cdot \cos \varphi & \sin \kappa \cdot \sin \omega \cdot \sin \varphi & \sin \kappa \cdot \cos \omega & \cos \kappa \cdot \sin \varphi & \sin \kappa \cdot \sin \omega \cdot \cos \varphi \\ \sin \kappa \cdot \cos \varphi & \cos \kappa \cdot \sin \omega \cdot \sin \varphi & \cos \kappa \cdot \cos \omega & \sin \kappa \cdot \sin \varphi & \cos \kappa \cdot \sin \omega \cdot \cos \varphi \\ \cos \omega \cdot \sin \varphi & \sin \omega & \cos \omega \cdot \cos \varphi \end{bmatrix}$$

$$C_{E_{PATB}}^B = \begin{bmatrix} \cos \varphi \cdot \cos \kappa & \cos \varphi \cdot \sin \kappa & \sin \varphi \\ \cos \omega \cdot \sin \kappa & \sin \omega \cdot \sin \varphi \cdot \sin \kappa & \sin \omega \cdot \cos \varphi \\ \sin \omega \cdot \sin \kappa & \cos \omega \cdot \sin \varphi \cdot \sin \kappa & \cos \omega \cdot \cos \varphi \end{bmatrix}$$

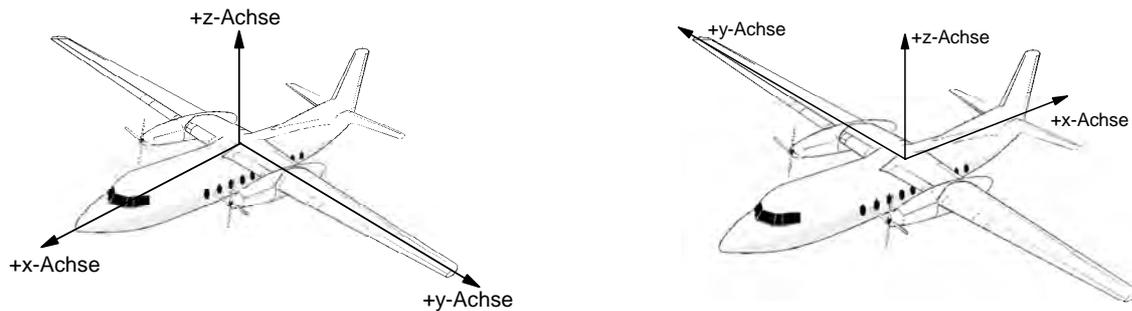


Abb. 4: Definition des Bildkoordinatensystems für BLUH (links) und für PATB (rechts)

Nach Aufstellung der entsprechenden Transformationsmatrix lässt sich nun ein Vektor vom Objektkoordinatensystem (E-System) ins Bildkoordinatensystem (B-System) und umgekehrt transformieren:

$$\mathbf{r}^B = C_E^B \cdot \mathbf{r}^E \quad (\mathbf{C}_E^B)^T \cdot \mathbf{r}^E \quad \mathbf{r}^E = C_B^E \cdot \mathbf{r}^B \quad (\mathbf{C}_B^E)^{-1} \cdot \mathbf{r}^B$$

E-System \rightarrow B-System B-System \rightarrow E-System

Bei bekannter C_E^B -Transformationsmatrix lassen sich wieder die einzelnen Drehwinkel wie folgt aus den Einzelelementen C_{ij} zurückgewinnen (φ = Längsneigungswinkel, ω = Querneigungswinkel, κ = Verkantungswinkel):

System BLUH: $\varphi = \arctan \frac{C_{31}}{C_{33}} \quad \omega = \arcsin C_{32} \quad \arctan \frac{C_{32}}{\sqrt{C_{12}^2 + C_{22}^2}}$
 $\chi = \arctan \frac{C_{12}}{C_{22}}$

System PATB: $\varphi = \arcsin C_{13} \quad \arctan \frac{C_{13}}{\sqrt{C_{23}^2 + C_{33}^2}} \quad \omega = \arctan \frac{C_{23}}{C_{33}}$
 $\chi = \arctan \frac{C_{12}}{C_{11}}$

Entsprechend diesen beiden Beispielen für BLUH und PATB sind für andere Auswertesysteme und Auswertegeräte die Drehmatrizen und Bildneigungs- und Bildverkantungswinkel aufzustellen. Ohne diese Kenntnisse ist eine Überführung der mittels eines Inertialsystems gemessenen Kurs- und Lagewinkel zur direkten Georeferenzierung nicht möglich.

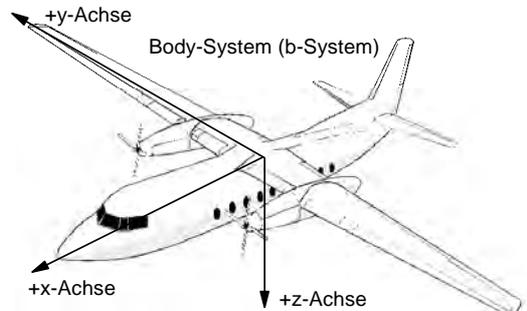
3. Transformation der Lage- und Kurswinkel für die direkte Georeferenzierung

In den beiden Kapiteln zuvor wurden die in der Navigation und in der Photogrammetrie verwendeten Winkel, Koordinatensysteme und Transformationsmatrizen erläutert. Für die Überführung der mit einem Inertialsystem ermittelten Winkel in der Photogrammetrie verwendeten Winkel sind nun die Unterschiede hinsichtlich der verwendeten Koordinatensysteme und Winkel zu berücksichtigen. Kern der nachfolgenden Herleitung ist dabei, dass die o.a. Transformationsmatrizen dazu dienen, einen Koordinatenvektor von einem Koordinatensystem in ein anderes Koordinatensystem zu überführen, z.B. die Transformation eines Vektors vom Objektkoordinatensystem (E-System) ins Bildkoordinatensystem (B-System). Dieses gelingt mittels folgender Transformation:

$$\mathbf{r}^B = \mathbf{C}_E^B \cdot \mathbf{r}^E$$

Dabei ist zu berücksichtigen, dass das in der Photogrammetrie verwendete E-System ($x =$ Ostwert (Rechtswert), $y =$ Nordwert (Hochwert), $z =$ Höhe), i.d.R. ein Gauß-Krüger-Koordinatensystem oder ein tangentiales Koordinatensystem ist, dessen Nullpunkt in die Mitte des Auswertgebietes gelegt wird. Die Lotrichtung dieser Ebene bzw. der Projektionsebene des Gauß-Krüger-Koordinatensystems kann durch die geographischen Koordinaten (φ_0, λ_0) des Gebietsmittelpunktes angenähert werden. Neben der Wahl des Objektkoordinatensystems ist außerdem zu berücksichtigen, ob bei dem photogrammetrischen Auswertesystem eine Korrektur wegen Erdkrümmung und Meridiankonvergenz eingestellt wurde.

Abb. 5: Definition des körperfesten Body-Systems für ein Strapdown-Inertialsystem



Die Lage des Bildkoordinatensystems (B-System, vgl. Abb. 4) ist in der Photogrammetrie nicht einheitlich definiert und muss hinsichtlich der Lage des in der Navigation verwendeten körperfesten Koordinatensystems (Body-System, b-System, s. Abb. 5) korrigiert werden. Dieses kann mit einer Transformationsmatrix \mathbf{T}_b^B erreicht werden, die hier exemplarisch für die o.a. Auswertesysteme präsentiert wird, wobei hier zunächst angenommen wird, dass im Flugzeug die Achsen des körperfesten Koordinatensystems (b-System) parallel zu den Achsen des Kamerasystems (B-System) ausgerichtet sind.

Transformationsmatrix für BLUH bzw. PATB: $\mathbf{T}_{b_{BLUH}}^B = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ $\mathbf{T}_{b_{PATB}}^B = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$

Mit Hilfe dieser Transformationsmatrizen lässt sich ein Vektor vom körperfesten Koordinatensystem (b-System) ins jeweilige Bildkoordinatensystem und zurück transformieren:

$$\mathbf{r}^B = \mathbf{T}_b^B \cdot \mathbf{r}^b$$

Bodysystem \rightarrow Bildkoordinatensystem

$$\mathbf{r}^b = \mathbf{T}_B^b \cdot \mathbf{r}^B = (\mathbf{T}_b^B)^T \cdot \mathbf{r}^B$$

Bildkoordinatensystem \rightarrow Bodysystem

Weiterhin sind die unterschiedlichen Ausrichtungen des Navigationskoordinatensystems (n-System, x = Nord, y = Ost, z = vertikal (positiv nach unten)) und des Objektkoordinatensystems (E-System, x = Ost, y = Nord, z = Höhe) zu berücksichtigen. Hierzu wird eine weitere Transformationsmatrix eingeführt. Mittels dieser Transformationsmatrix lassen sich Transformationen zwischen dem Navigationskoordinatensystem (n-System) und dem Objektkoordinatensystem (E-System) wie folgt ausführen:

$$\mathbf{T}_n^E \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \mathbf{r}^E = \mathbf{T}_n^E \cdot \mathbf{r}^n \quad \mathbf{r}^n = \mathbf{T}_E^n \cdot \mathbf{r}^E = (\mathbf{T}_n^E)^T \cdot \mathbf{r}^E$$

n-System \rightarrow E-System E-System \rightarrow n-System

Dieses gilt nur für den Fall, dass eine Tangentialebene als Objektkoordinatensystem verwendet wird. Für den Fall, dass z.B. ein Gauß-Krüger- oder UTM-Koordinatensystem verwendet wird, müssen entweder zusätzlich die Erdkrümmung und Meridiankonvergenz korrigiert werden, oder es ist eine weitere Transformation anzuwenden:

$$\mathbf{C}_n^{n'} \begin{bmatrix} 1 & e_v & e_e \\ e_v & 1 & e_n \\ e_e & e_n & 1 \end{bmatrix} \quad \begin{matrix} e_n & \lambda_i & \lambda_0 \cdot \cos \varphi \\ e_e & \varphi_i & \varphi_0 \\ e_v & \lambda_i & \lambda_0^{GK} \cdot \sin \varphi \end{matrix} \quad \lambda_0^{GK} : \text{Nullmeridian des Gauß-Krüger-Koordinatensystems}$$

Zur direkten Georeferenzierung muss nun mittels der Daten des Inertialsystems eine äquivalente Transformationsmatrix zur Überführung der Bilddaten (B-System) in das Objektkoordinatensystem (E-System) aufgestellt werden (Transformationsmatrix \mathbf{C}_E^B oder deren Inverse $\mathbf{C}_B^E = (\mathbf{C}_E^B)^{-1} = (\mathbf{C}_E^B)^T$).

Durch die hier angewandte Indizierung der Matrizen und Vektoren lassen sich die nachfolgenden Transformationen leicht nachvollziehen. Für die eigentliche Transformation sind zunächst folgende Transformationsmatrizen, für die neben den mit dem Inertialsystem gemessenen Winkeln auch die geographischen Koordinaten des Gebietsmittelpunktes, des Projektionszentrums und der Nullmeridian des Gauß-Krüger-Koordinatensystems bekannt sein müssen, aufzustellen:

$$\mathbf{C}_b^{n_i} \quad f \phi_i, \theta_i, \psi_i \quad \mathbf{C}_e^{n_0} \quad f \varphi_0, \lambda_0, \quad \mathbf{C}_e^{n_i} \quad f \varphi_i, \lambda_i, \quad \mathbf{C}_{n_0}^{n_i} \quad f \varphi_i, \lambda_i, \varphi_0, \lambda_0, \lambda_0^{GK}$$

Folgende fünf Transformationen sind nun für jeden Aufnahmeort i durchzuführen:

1. b-System \rightarrow e-System: $\mathbf{C}_b^e = \mathbf{C}_e^{n_i T} \cdot \mathbf{C}_b^{n_i}$
2. b-System \rightarrow n₀-System: $\mathbf{C}_b^{n_0} = \mathbf{C}_e^{n_0} \cdot \mathbf{C}_b^e$
3. b-System \rightarrow n'-System: $\mathbf{C}_b^{n'} = \mathbf{C}_{n_0}^{n'} \cdot \mathbf{C}_b^{n_0}$
4. n'-System \rightarrow B-System: $\mathbf{T}_n^B = \mathbf{T}_b^B \cdot \mathbf{C}_b^{n' T}$
5. E-System \rightarrow B-System $\mathbf{C}_E^B = \mathbf{T}_n^B \cdot \mathbf{T}_n^E T$

Sukzessives Einsetzen ergibt schließlich folgende Transformationsmatrix:

$$\mathbf{C}_E^B = \mathbf{T}_b^B \cdot (\mathbf{C}_{n_0}^{n'} \cdot \mathbf{C}_e^{n_0} \cdot \mathbf{C}_e^{n_i T} \cdot \mathbf{C}_b^{n_i})^T \cdot (\mathbf{T}_n^E)^T$$

Aus den Elementen dieser Transformationsmatrix lassen sich nun wie o.a. die Bildneigungs- und Verkantungswinkel φ , ω , κ berechnen, wobei das zugrunde liegende Auswertesystem zu berücksichtigen ist.

4. Bestimmung der Misalignments zwischen INS und Kamera

Für hochgenaue Anwendungen sollte das Inertialsystem direkt auf oder an der Kamera installiert werden, wobei die Hauptachsen parallel zueinander auszurichten sind. Auch bei sorgfältigster Installation werden die Achsen nach der Installation nicht exakt parallel zueinander ausgerichtet sein. Diese kleinen Nichtparallelitäten werden als Misalignments, die als kleine Verdrehwinkel um die drei Achsen des körperfesten Koordinatensystems interpretiert werden können, bezeichnet (vgl. Abb. 6).

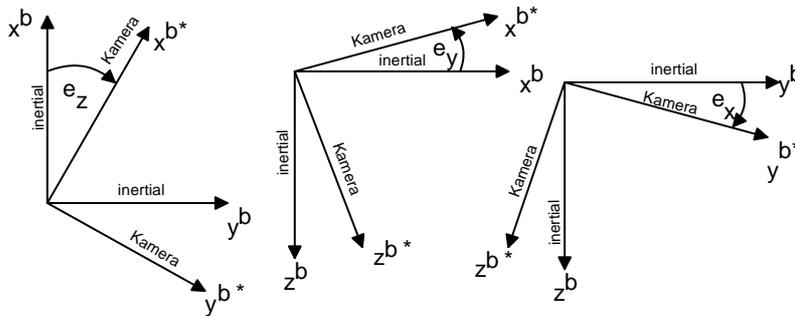


Abb. 6: Misalignments e_x, e_y, e_z

Dieses hat zur Folge, dass die Transformationsmatrix, die aus den Kurs- und Lagewinkeln berechnet wird, vorab um diese kleinen

Verdrehungswinkel in das Achssystem der Kamera korrigiert werden muss. Da es sich hier um kleine Verdrehungswinkel handelt, genügt die Aufstellung einer differentiellen Drehmatrix. Mit Hilfe dieser Drehmatrix wird nun ein körperfestes Koordinatensystem b^* -System realisiert, dessen Achsen exakt parallel zu den Achsen der Kamera verlaufen. Mittels dieser Misalignmentmatrix wird nun die Transformationsmatrix $C_{b^*}^n$ gebildet, die nun für die weiteren Berechnungen an Stelle der originalen C_b^n -Matrix zu verwenden ist.

$$C_{b^*}^n = C_b^n \cdot T_b^{b^*} \quad \text{mit der differentiellen Drehmatrix } T_b^{b^*} = \begin{bmatrix} 1 & e_z & e_y \\ e_z & 1 & e_x \\ e_y & e_x & 1 \end{bmatrix}$$

Die zusätzliche Berücksichtigung dieser Misalignmentmatrix führt zu folgender Transformationsmatrix:

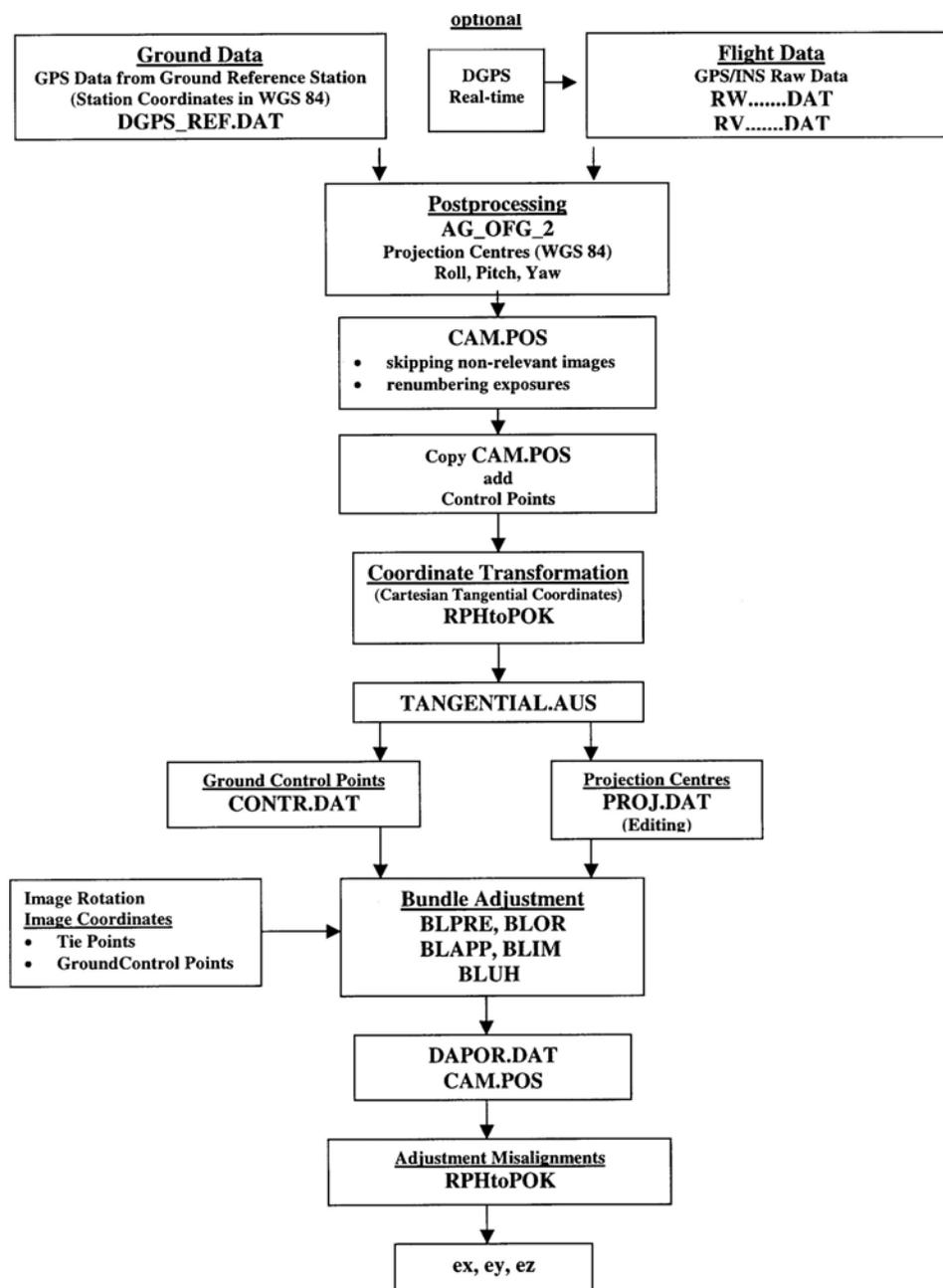
$$C_E^B = T_b^B \cdot (C_{n_0}^{n'} \cdot C_e^{n_0} \cdot C_e^{n_i} \cdot T \cdot C_b^{n_i} \cdot (T_b^{b^*})^T)^T \cdot (T_n^E)^T$$

Die Problematik, die sich hier stellt, ist weniger diese zusätzliche Transformation, sondern vielmehr die Bestimmung der in die Matrix eingehenden kleinen Drehwinkel e_x, e_y, e_z , da i.d.R. weder beim Inertialsystem noch bei der Kamera, deren Achsen durch die Rahmenmarken und die Filmebene realisiert werden, die Koordinatenachsen für eine Ausmessung der kleinen Differenzwinkel gut zugänglich sind.

Hier bietet sich eine *On-the-job*-Kalibration des gesamten Systems an. Dabei werden Kamera und Inertialsystem als komplette Messeinheit zur Aufnahme eines Passpunktfeldes verwendet und die Bilddaten anschließend einer Bündelblockausgleichung ohne Verwendung der Inertialdaten unterzogen. Die hierbei für jedes Photo ermittelten Bildneigungs- und -verkantungswinkel dienen nun zusammen mit den für jedes Photo ermittelten Kurs- und Lagewinkeln als Referenzwerte zur Bestimmung der drei Differenzwinkel der Misalignmentmatrix. Bei Verwendung der Winkel aus einer Bündelblockausgleichung ist zu beachten, dass bei relativ kleinen Kameraöffnungswinkeln hohe Korrelationen zwischen den Lagekoordinaten der Projektionszentren und den Bildneigungswinkeln auftreten. Hier können verbesserte Bildneigungswinkel ermittelt werden, wenn die Koordinaten der Projektionszentren als „gemessene Unbekannte“ in die Bündelblockausgleichung eingeführt werden. Für jedes Photo müssen dann folgende Daten vorliegen:

- vom Inertialsystem gemessene Winkel: ϕ, θ, ψ
- Bildneigungs- und -verkantungswinkel der Bündelblockausgleichung: φ, ω, χ
- geographische Koordinaten der Projektionszentren: φ, λ, h , die z.B. aus den Gauß-Krüger-Koordinaten (Rechtswert, Hochwert) oder den geozentrischen Koordinaten X, Y, Z berechnet werden können.

Die direkte Georeferenzierung wird hier auf der Basis eines strengen funktionalen Modells durchgeführt. Daher wird in konsequenter Weise als Objektkoordinatensystem ein räumliches kartesisches Tangentialkoordinatensystem eingeführt. Der Vorteil dieses Koordinatensystems im Gegensatz zu einem Gauß-Krüger- oder UTM-Koordinatensystem ist, dass hier keine Abbildungsverzerrungen sowie ein vom Abstand des Hauptmeridians und der Höhe abhängiger Maßstabsfaktor wirkt. Das Flussdiagramm (Tafel 1) Ablauf der Berechnungen zur Kalibration der Misalignments.



Tafel 1: Ablauf der Berechnungen zur Kalibration der Misalignments

Die folgende Tabelle zeigt die Ergebnisse eines Kalibrationsfluges (INS Litef LLN G1, Echtzeit DGPS mit Leica System 500, RASANT-Korrekturdaten mittels UKW Empfänger, Kamera Rollei 6006, Bildmaßstab 1:1000, $f = 51$ mm, ein Flugstreifen, 10 Bilder, Flugplatz Meinerzhagen, 14 Passpunkte)

```

Adjustment of misalignments for tangent system
1 -0.2252 -0.5878 0.1459 1.3050 2.9811 -165.4435 0.8736 3.5321 234.3723
2 -0.2073 -0.6107 0.1669 0.2847 1.0800 -167.5157 -0.1959 1.6117 232.2887
3 -0.1652 -0.6447 0.1913 0.5735 0.7217 -170.1544 0.0165 1.2081 229.6246
4 -0.0274 -0.6379 0.1761 1.2079 0.8395 -169.4247 0.5927 1.1930 230.3699
5 -0.2247 -0.7173 0.1606 2.3929 3.2003 -167.8629 1.8142 3.8034 231.9268
6 -0.2204 -0.6131 0.1681 3.3342 3.9632 -164.6348 2.8827 4.5298 235.1483
7 -0.1153 -0.7529 0.1414 0.7533 1.9958 -165.9934 0.0973 2.5311 233.8262
8 -0.1751 -0.6855 0.1999 -1.3534 3.0136 -169.0932 -1.9381 3.5400 230.6546
9 -0.2056 -0.8081 0.1579 -0.8019 3.4410 -172.1683 -1.5209 4.0269 227.6141
10 -0.1724 -0.8387 0.1108 -1.1481 3.6856 -174.4502 -1.9334 4.2249 225.3779
10 data for adjustment processed
mean ex, ey, ez: -0.1738 -0.6897 0.1619
residuals after adjustment..
1 -0.2252 -0.5878 0.1459 0.7478 3.5423 -165.6496 0.8736 3.5321 234.3723 0.1258 -0.0102 0.0219
2 -0.2073 -0.6107 0.1669 -0.2898 1.6228 -167.7053 -0.1959 1.6117 232.2887 0.0939 -0.0112 -0.0060
3 -0.1652 -0.6447 0.1913 -0.0229 1.2402 -170.3411 0.0165 1.2081 229.6246 0.0394 -0.0321 -0.0343
4 -0.0274 -0.6379 0.1761 0.6174 1.3648 -169.6123 0.5927 1.1930 230.3699 -0.0248 -0.1719 -0.0178
5 -0.2247 -0.7173 0.1606 1.8147 3.7400 -168.0719 1.8142 3.8034 231.9268 -0.0004 0.0634 -0.0013
6 -0.2204 -0.6131 0.1681 2.7837 4.5315 -164.8490 2.8827 4.5298 235.1483 0.0990 -0.0016 -0.0027
7 -0.1153 -0.7529 0.1414 0.1917 2.5522 -166.1909 0.0973 2.5311 233.8262 -0.0943 -0.0211 0.0171
8 -0.1751 -0.6855 0.1999 -1.9419 3.5420 -169.3010 -1.9381 3.5400 230.6546 0.0038 -0.0020 -0.0444
9 -0.2056 -0.8081 0.1579 -1.4155 3.9404 -172.3814 -1.5209 4.0269 227.6141 -0.1054 0.0865 -0.0045
10 -0.1724 -0.8387 0.1108 -1.7793 4.1627 -174.6666 -1.9334 4.2249 225.3779 -0.1540 0.0622 0.0446
Stdv(Omega, Phi, Kappa): 0.06828 0.08965 0.02508

```

Tabelle 1: Ergebnisse eines Kalibrationsfluges

5. Direkte Georeferenzierung – unter Einbeziehung von Tangentialkoordinaten

5.1 Photogrammetrische Punktbestimmung

Tafel 2 zeigt den Ablauf der Berechnungen zur photogrammetrischen Punktbestimmung. Auch hier wird konsequent der Weg beschriftet über kartesische Tangentialkoordinaten.

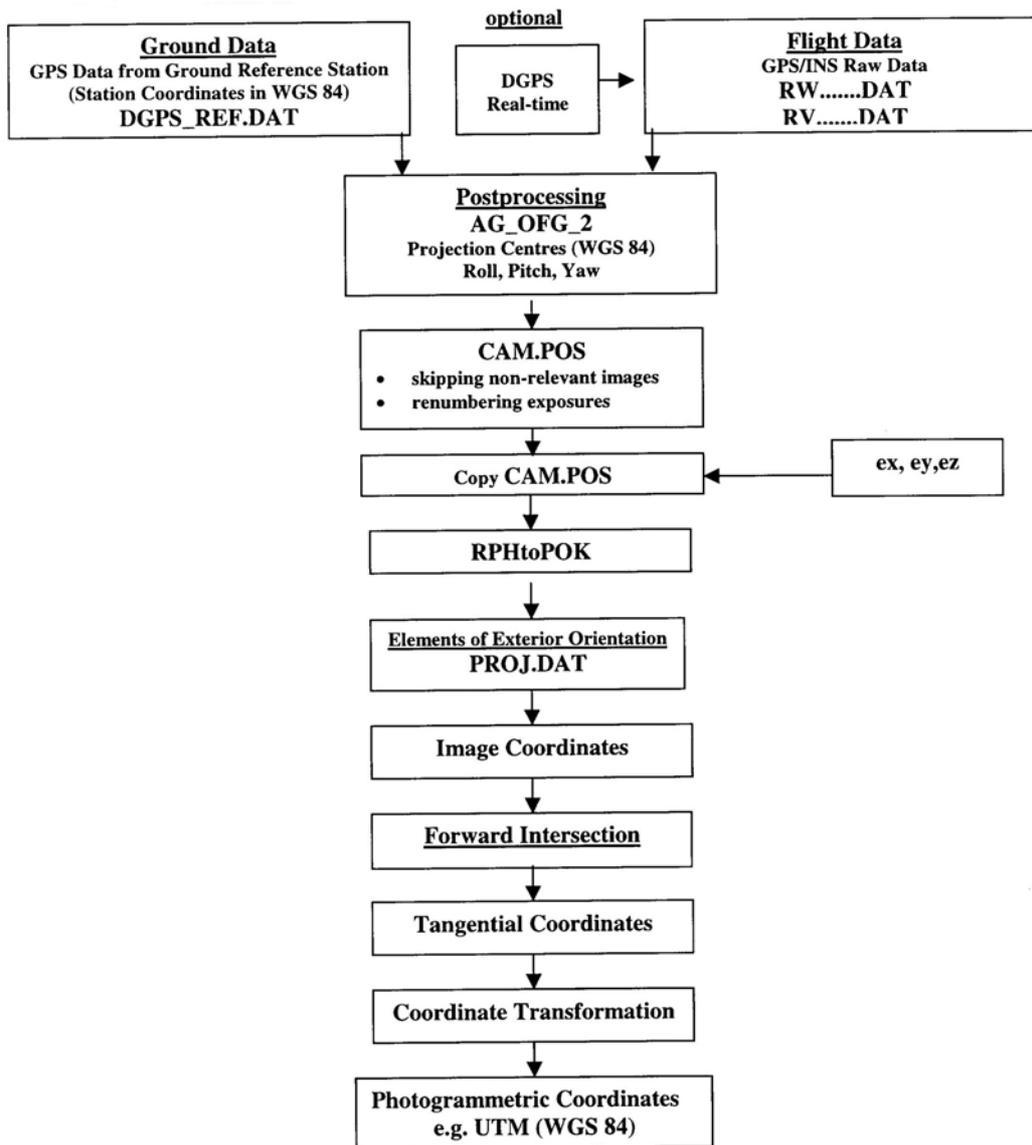
5.2 Digitale Orthophotos

Es sei angenommen, dass das DHM photogrammetrisch bestimmt wurde in Tangentialkoordinaten; das Orthophoto soll in „Landeskoordinaten“ berechnet werden. Der Rechenablauf bis zum Resampling ist aus Abbildung 7 ersichtlich.

Für den Fall, dass ein DHM gegeben ist im „Landeskoordinatensystem“ sind die Berechnungen ähnlich.

5.3 Koordinatentransformation

In Kooperation mit der Firma GEODELTA, Delft, Niederlande, wird z.Z. die Software entwickelt zur strengen Georeferenzierung unter Einbeziehung von Tangentialkoordinaten. Die zugrundeliegenden Koordinatentransformationen werden in diesem Kapitel erläutert.



Tafel 2: Berechnungsablauf zur photogrammetrischen Punktbestimmung

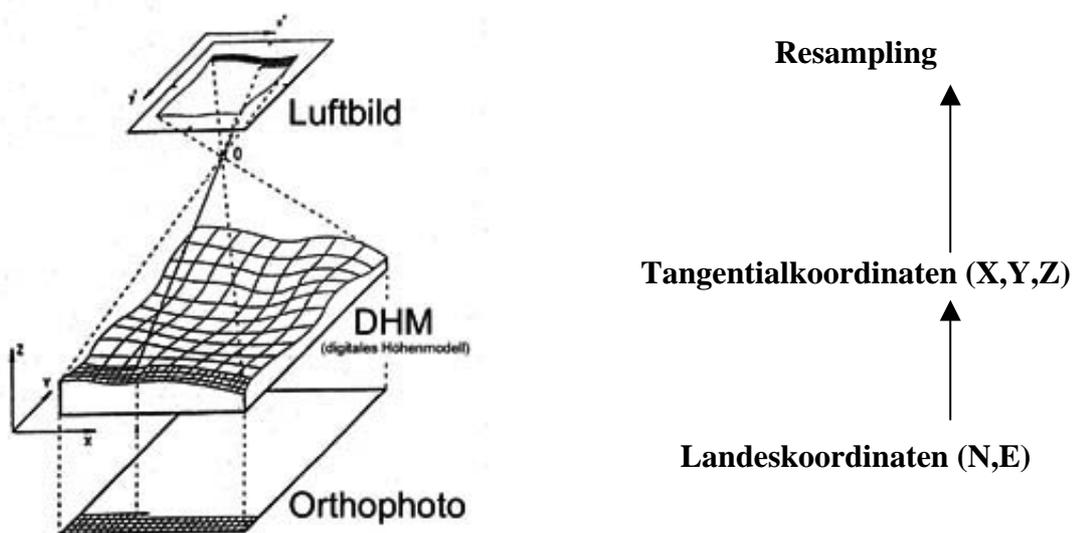


Abb.7: Prinzip Berechnung Orthophoto

Als Objektkoordinatensystem wird für die Auswertung ein Tangentialkoordinatensystem vorgeschlagen. I.d.R. liegen jedoch Gauß-Krüger- oder UTM-Koordinaten vor. Diese Koordinaten müssen daher zunächst in ein Tangentialkoordinatensystem transformiert werden, wobei als Nullpunkt P_0 ein Punkt in der Mitte des Auswertgebietes gelegt werden sollte. In diesem Punkt wird dann ein lokales Koordinatensystem als tangenciales Koordinatensystem wie folgt definiert:

- x-lokal: Nordrichtung
- y-lokal: Ostrichtung
- z-lokal: positiv zum Nadir

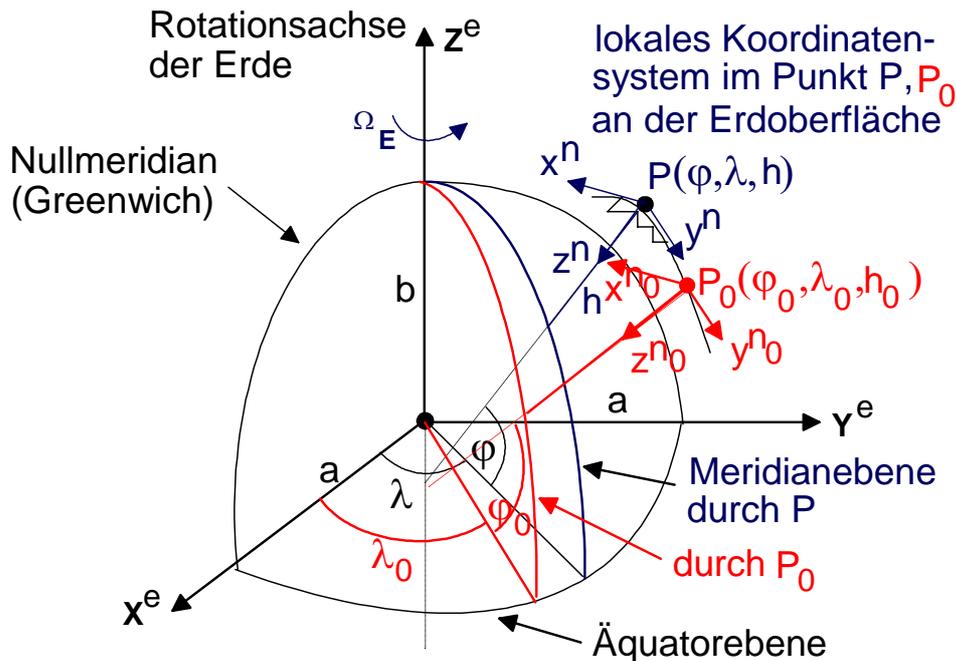


Abb. 8: Erdfestes Koordinatensystem (e-System), Navigationskoordinatensystem (n-System) und Tangentialkoordinatensystem (n_0 -System)

Gauß-Krüger-Koordinaten bzw. UTM-Koordinaten beziehen sich auf ein vorzugebendes Ellipsoid (bestanschließend wie z.B. Bessel oder global wie z.B. WGS84) und sind eine Abbildung der ellipsoidischen Koordinaten (geographische Breite und Länge), wobei für die UTM-Koordinaten ein 6° -breites Streifensystem mit einem Mittelmeridian eingeführt wird. Die Transformation zwischen den ellipsoidischen Koordinaten und den UTM-Koordinaten (bzw. Gauß-Krüger-Koordinaten) erfolgt mittels Reihenentwicklungen und wird hier nicht weiter erläutert.

Die Verknüpfung der o.a. unterschiedlichen lokalen Koordinatensysteme sowie der UTM-Koordinaten erfolgt über das globale erdfeste Koordinatensystem, deren Achsen wie folgt definiert sind:

- X^e -Achse: Achse in der Äquatorebene und durch den Meridian durch Greenwich
- Z^e -Achse: Rotationsachse der Erde
- Y^e -Achse: Achse in der Äquatorebene und senkrecht zu den beiden anderen Achsen; Orientierung nach Osten (Rechtssystem!)

Der Ursprung dieses Koordinatensystems fällt in die Nähe des Erdschwerpunktes. Folgende Transformationen werden benötigt:

- UTM - ellipsoidisch
- ellipsoidisch - geozentrisch
- geozentrisch - lokal (tangential)

Ausgangspunkt der Transformationen sind die UTM-Koordinaten, die zunächst in ellipsoidische Koordinaten zu transformieren sind. In der Mitte des Messgebietes wird nun ein Nullpunkt, der den Ursprung des tangentialen Koordinatensystems definiert, festgelegt, wobei die ellipsoidische Höhe dieses Punktes mit 0 oder einen anderen beliebigen Wert eingeführt werden kann:

$$\text{Ursprung: } P_0 : \varphi_0, \lambda_0, h_0 \quad 0 \text{ m}$$

Die ellipsoidischen Koordinaten dieses Nullpunktes sowie der anderen Punkte, deren ellipsoidische Höhen ggfls. ebenfalls mit null einzuführen sind, werden anschließend in dreidimensionale geozentrische Koordinaten transformiert:

$$\begin{array}{l} X \\ Y \\ Z \end{array} = \begin{array}{l} R_N \cdot h \cdot \cos \varphi \cdot \cos \lambda \\ R_N \cdot h \cdot \cos \varphi \cdot \sin \lambda \\ [1 - e^2 \cdot R_N \cdot h] \cdot \sin \varphi \end{array} \quad \text{mit} \quad \begin{array}{l} e^2 = \frac{2 \cdot f \cdot f^2}{a^2} \\ R_N = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \cdot \sin^2 \varphi}} \end{array}$$

e : 1. numerische Exzentrizität des Ellipsoids

R_N : breitenabhängiger Querkrümmungsradius des Ellipsoids

Für die Transformation der geozentrischen Koordinaten in ein lokales Koordinatensystem wird eine Matrix benötigt, die die Achsen des geozentrischen Koordinatensystems in die Richtungen des lokalen Koordinatensystems dreht. Dieses gelingt durch folgende zwei sukzessive Drehungen:

1. Drehung um $90^\circ + \varphi$ um die Y-Achse
2. Drehung um λ um die neue Z-Achse

$$C_e^{L*} = R_y \varphi 90^\circ \cdot R_z \lambda \begin{bmatrix} \cos \varphi & 90^\circ & 0 & \sin \varphi & 90^\circ \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ \sin \varphi & 90^\circ & 0 & \cos \varphi & 90^\circ \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \lambda & \sin \lambda & 0 \\ \sin \lambda & \cos \lambda & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \sin \varphi & 0 & \cos \varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ \cos \varphi & 0 & \sin \varphi \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \lambda & \sin \lambda & 0 \\ \sin \lambda & \cos \lambda & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \varphi \cdot \cos \lambda & \sin \varphi \cdot \sin \lambda & \cos \varphi \\ \sin \lambda & \cos \lambda & 0 \\ \cos \varphi \cdot \cos \lambda & \cos \varphi \cdot \sin \lambda & \sin \varphi \end{bmatrix}$$

Dabei ist zu berücksichtigen, dass es sich bei beiden Systemen um ein Rechtssystem handelt. Die Überführung in das gesuchte Linkssystem (x, y, H) ergibt sich durch eine einfache Vorzeichenumkehr bei der z-Komponente:

$$C_e^L = \begin{bmatrix} \sin \varphi \cdot \cos \lambda & \sin \varphi \cdot \sin \lambda & \cos \varphi \\ \sin \lambda & \cos \lambda & 0 \\ \cos \varphi \cdot \cos \lambda & \cos \varphi \cdot \sin \lambda & \sin \varphi \end{bmatrix}$$

Die Transformation von geozentrischen Koordinaten in ein lokales nordorientiertes Koordinatensystem erfolgt nun in folgende Schritte:

a) Festlegung eines Nullpunktes P_0 in Form von geozentrischen Koordinaten oder geographischen Koordinaten, die dann zuvor in geographische oder geozentrische Koordinaten zu überführen sind:

$$\text{Nullpunkt: } P_0: \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} \xrightarrow{\text{Transformation}} \begin{bmatrix} \varphi_0 \\ \lambda_0 \\ h_0 \end{bmatrix} \text{ oder } \begin{bmatrix} \varphi_0 \\ \lambda_0 \\ h_0 \end{bmatrix} \xrightarrow{\text{Transformation}} \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix}$$

b) Aufstellung der Transformationsmatrix für den Nullpunkt:

$$C_e^L \begin{bmatrix} \sin \varphi_0 \cdot \cos \lambda_0 & \sin \varphi_0 \cdot \sin \lambda_0 & \cos \varphi_0 \\ \sin \lambda_0 & \cos \lambda_0 & 0 \\ \cos \varphi_0 \cdot \cos \lambda_0 & \cos \varphi_0 \cdot \sin \lambda_0 & \sin \varphi_0 \end{bmatrix}$$

c) Transformation der geozentrischen Koordinaten der anderen Punkte P_i in das lokale Koordinatensystem:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ H \end{bmatrix}_i C_e^L \cdot \left(\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_i \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ H_0 \end{bmatrix}$$

Um negative Koordinaten zu vermeiden, kann zusätzlich ein Koordinatenoffset in Form von x_0, y_0, H_0 eingeführt werden.

Die Koordinaten x, y, H entsprechen dann den Koordinaten des tangentialen Koordinatensystems, das in dem Punkt P_0 gelagert ist.

6. Direkte Georeferenzierung mit dem Luftaufnahmesystem LEO

6.1 Systemkomponenten

Das System besteht aus den folgenden Komponenten (siehe Abbildungen 9 und 10):

- GPS Empfänger Leica MX 9400 (Einfrequenz) bzw. Leica System 500 (Zweifrequenz)
- FOG INS (Fibre Optical Gyros Inertial Navigation System), Litef LLN-G1
- Stabilisierte Plattform
- Survey Flight Management System

6.2 Bestimmung der Elemente der äußeren Orientierung im Flug

Die Bestimmung der exakten Koordinaten der Projektionszentren ist kritischer als die Bestimmung der Bildlagewinkel mittels INS. Die mittels (D)GPS gestützter Inertialnavigation erreichbaren Genauigkeiten in den Lagewinkeln sind bekannt. Standardabweichungen für die Roll- und Nickwinkel betragen etwa $0,002^\circ$ und für den Kurswinkel $0,005^\circ$.

Bei der Bestimmung der Koordinaten der Projektionszentren muss unterschieden werden zwischen den Methoden, welche basieren auf der Messung der GPS Trägerphasen mittels GPS Zweifrequenzempfängern und den Pseudorange basierten direkten Lösungen.

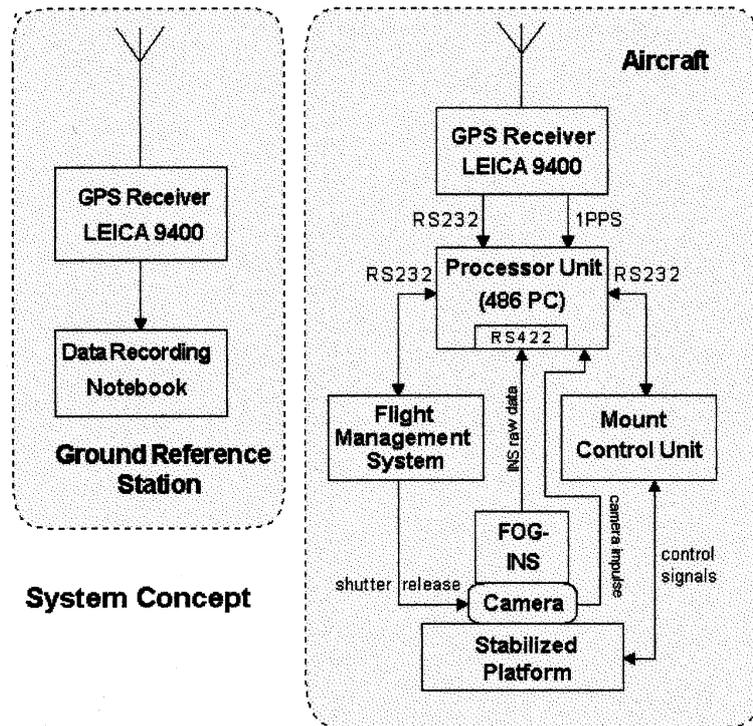


Abb. 9: Aufbau des hybriden Luftaufnahmesystems LEO

Die folgende Abbildung zeigt die stabilisierte Plattform – ohne Kamera und mit Kamera plus INS.



Abb. 10: Stabilisierte Sensorplattform: spielfreie Dreipunktaufhängung (Kardangelenk plus 2 Kugelgelenkstäbe), drei hochdynamische Servomotore. Das INS Trägheitssystem) ist mit der digitalen Kamera Kodak DCS 460 CIR (2000 x 3000 Pixel) fest verbunden und dient als Sensor zur Stabilisierung und zur Messung der Restwinkel.

Zu der genaueren ersten Methode gibt es inzwischen vielfältige Erfahrungen. Die Genauigkeiten liegen deutlich unter einem Dezimeter. Nachteilig ist die relativ geringe Distanz (max. 30 km), welche eingehalten werden muss zwischen Rover und Referenzstation; auch sind die Kosten für geodätische Zweifrequenzempfänger deutlich höher als für Einfrequenzempfänger, welche ausreichend sind für die Pseudorange-Lösungen.

Für das Luftaufnahmesystem LEO wurde bisher den Einfrequenzempfängern der Vorzug gegeben.

Das System LEO zur direkten Georeferenzierung basiert auf einem GPS-gestützten Inertialsystem. Die vom GPS-System gelieferten Positionen (geographische Breite und Länge, Höhe) und Geschwindigkeiten (Nord, Ost, vertikal) werden als Beobachtungen in einem 16-Zustands-Kalmanfilter verarbeitet und sind daher entscheidend für die Genauigkeit der integrierten Position, die zur Georeferenzierung dient. Für diese Zwecke können grundsätzlich sowohl einfache Einfrequenz- als auch RTK-fähige Zweifrequenzempfänger mit eigener Referenzstation oder anderen Korrekturdatendiensten, wie z.B. die SAPOS-Dienste, eingesetzt werden. Für diese Zwecke wurden in der Vergangenheit der LEICA-Einfrequenzempfänger 9400 (als Referenz und Rover) und das LEICA System 500 zusammen mit dem ALF- bzw. UKW-Korrekturdatendienst eingesetzt.

Mit dem Leica Empfänger MX9400 mit eigener Referenzstation wurden Lagegenauigkeiten von 0,3 m bis 0,5 m (je nach DOP Werten) erreicht.

Mit dem Leica System 500 DGPS mit UKW-Korrekturdatendienst (RASANT) wurden Lagegenauigkeiten von 0,5 m bis 0,7 m (je nach DOP Werten) erzielt.

Um die Genauigkeit zukünftig weiter zu steigern bei gleichzeitiger Unabhängigkeit von lokalen Referenzstationen, wurde auch der neue OmniSTAR High Performance Service hinsichtlich seiner Eignung getestet. Der benutzte Empfänger OmniSTAR 8300 HP ist ein integrierter L1/L2 GPS Empfänger mit OmniSTAR L-Band Korrekturdatenempfänger. Die Korrekturdaten werden via Kommunikationssatellit empfangen und sind abgeleitet aus dem OmniSTAR-eigenen Netz von Referenzstationen, s. Abb. 11.

Das System wurde zunächst statisch auf einem im System ETRS-89 koordinierten Festpunkt getestet. Untersucht wurden dabei die Genauigkeiten des konventionellen differentiellen GPS (DGPS) und der Trägerphasenmessung, die auf einer Float-Lösung der Mehrdeutigkeiten basiert. Die Ergebnisse sind in den Tabellen 2 und 3 aufgeführt. Dabei zeigt sich eine signifikante systematische Abweichung (Richtigkeit) in allen drei Koordinatenachsen. Bei der DGPS-Lösung liegt diese Abweichung deutlich über 1 m (und muss noch weiter untersucht werden). Bei der Trägerphasenlösung (Float-Lösung) ist diese Abweichung in der Lage $-0,24$ m und $-0,18$ m und entspricht damit genau dem Unterschied der beiden Koordinatensysteme ETRS-89 (Bochum) und ITRF (OmniSTAR), welches die Kontinentalverschiebung seit 1989 berücksichtigt. Die Standardabweichungen entsprechen den Spezifikationen von OmniSTAR



Abb.11: Omnistar Referenzstationen, Europa

Sollwert (Soll)			Status	Mittelwert (Ist)		
Breite	Länge	Höhe		Breite	Länge	Höhe
51,44783653	7,271527556	199,673	DGPS	51,44784422	7,27155536	199,385
			Amb. float sol.	51,44783873	7,27153015	199,867

Tabelle 2: Soll-Position und Ist-Positionen der Testmessungen

Status	Standardabweichung [m]			Richtigkeit (Soll – Ist) [m]		
	δ_{AN}	δ_{AE}	δ_{AH}	ΔN	ΔE	ΔH
DGPS	0,33	0,37	0,55	-0,86	-1,93	0,29
Amb. float sol.	0,14	0,17	0,29	-0,24	-0,18	-0,19

Tabelle 3: Genauigkeiten der statischen Messungen

7. Regelung der flugzeuggetragenen Fernerkundungsplattform ¹

7.1 Stabilisierung der Plattform und Kamera

Die Kamera wird in Leichtflugzeugen und Hubschraubern eingebaut, die in niedrigen Höhen fliegen und turbulenten Luftbewegungen ausgesetzt sind HEIMES et al. (1994), BÄUMKER et al. (1997), BÄUMKER et al. (2000). Die dadurch vom Flugzeug auf die Plattform übertragenen starken Störkräfte und Störmomente sind durch eine sorgfältig ausgelegte Regelung der Plattform schnell und genau zu kompensieren oder auszuregulieren. Pauschal gilt die Regel, dass eine Regelung um so wirksamer funktioniert, je mehr Informationen sie über den zu regelnden Prozess und dessen Betriebsbedingungen im Regelalgorithmus berücksichtigt. Besonders präzise Informationen über den zu regelnden Prozess (die Regelstrecke) erhält die Regelung, indem der Regelalgorithmus

- (i) laufend durch Sensoren Informationen über den aktuellen Systemzustand und den erzielten Regelungserfolg erhält,
- (ii) wesentliche Elemente des Regelstreckenmodells beinhaltet,
- (iii) laufend Informationen über die Störungen berücksichtigt, und
- (iv) beim Entwurf der Reglerstruktur Kenntnisse und Abschätzungen über den Grad der Ungenauigkeit des Streckenmodells, der Messsignale und der Störungen berücksichtigt werden.

Die Berücksichtigung dieser Prozesskenntnisse führt zu Regelungen, die für den obigen Aspekt

- (i) Multisensorregelung, für den Gesichtspunkt
- (ii) modellbasierte Regelung, für den Aspekt
- (iii) Regelung mit Störgrößenkompensation, und für den Aspekt
- (iv) robuste Regelung genannt werden.

7.2 Untersuchte Regelungskonzepte

Aufgrund der bei der Plattformregelung verfügbaren

- Informationen über die Messungen an den Antrieben und durch das INS (Multisensor-konzept),
- Informationen über die Geometrie des Systems Flugzeug-Plattform, die Trägheitseigenschaften der Plattform sowie die Parameter der Antriebe (modellbasiertes Regelungskonzept),
- Informationen über die Plattformstörungen durch das Flugzeug mittels Messungen und Modellrechnungen (Störgrößenkompensation)
- sowie Informationen in Form von Abschätzungen über die Ungenauigkeiten der Antriebsmodelle (robuste Regelung)

wurde den Regelkreisuntersuchungen als Basis eine

modellbasierte Multisensorregelung mit nichtlinearem Kompensationsregler, Störgrößenkompensation und übergeordneter robuster Regelung

¹ Diese Arbeiten wurden im Rahmen des Forschungsprojektes "Bestimmung der Orientierungsparameter und modellgestützte Regelung einer flugzeuggetragenen Fernerkundungsplattform" unter HA-1666/8-1,8-2 und BA-2144/1-1,1-2 durch die DFG (Deutsche Forschungsgemeinschaft, Bonn) unterstützt.

zugrunde gelegt. Aus diesen sehr aufwendigen Regelalgorithmen wurden schrittweise vereinfachte Regelkonzepte und Regelalgorithmen abgeleitet, die als kostengünstigere, allerdings auch weniger wirksame alternative Regelkonzepte zur Verfügung stehen. Die Wirksamkeit und der Aufwand der Regelkonzepte wurden in Rechnersimulationen und Laborexperimenten unter Verwendung von in Flugversuchen ermittelten Daten als Störgrößen erprobt.

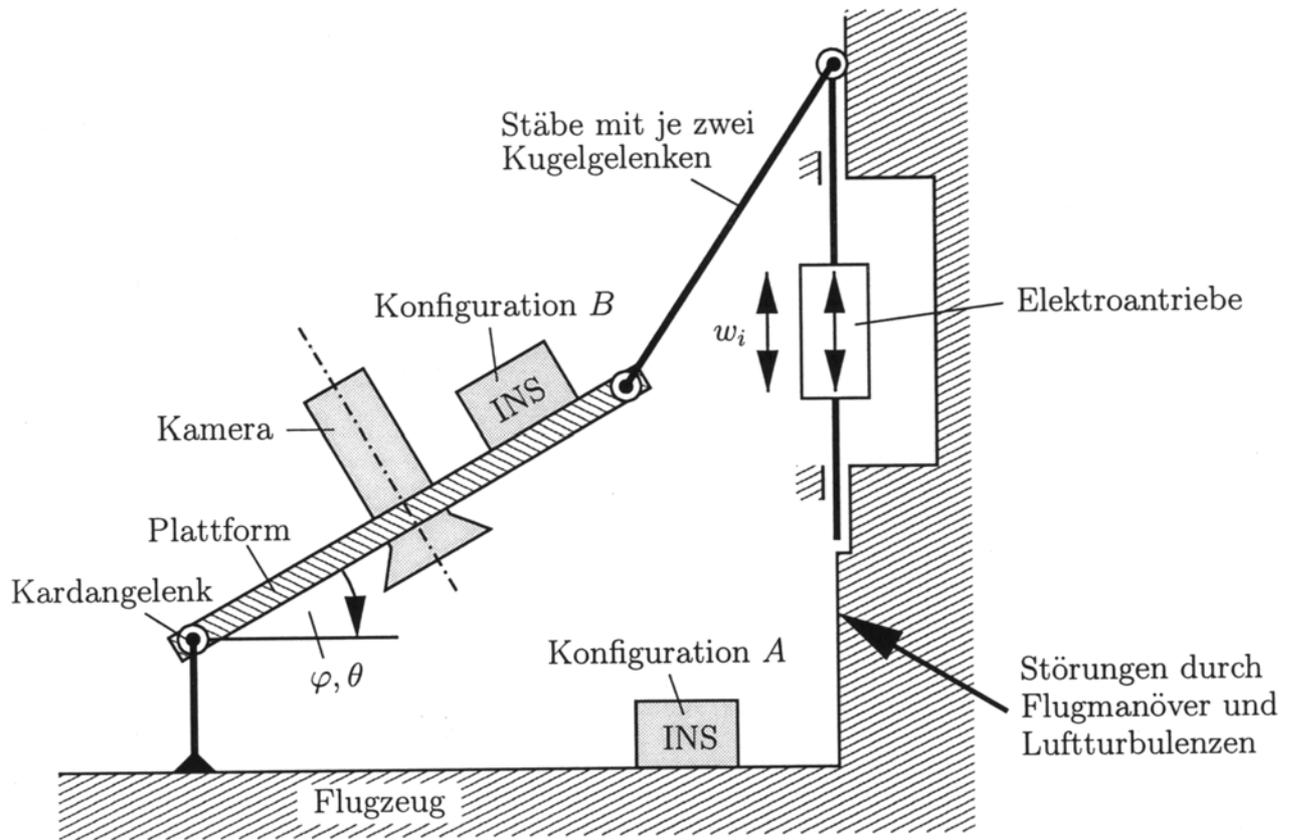
7.3 Theoretisches Regelstreckenmodell

Die Rechnersimulationen, Regelalgorithmen und Identifikationsalgorithmen zur experimentellen Ermittlung unbekannter Modellparameter bauen auf folgenden mathematischen Basismodellen des Systems Flugzeug - Plattform - Antriebe als Regelstreckenmodell auf (siehe Bild 12a): 12 kinematische Differentialgleichungen (DGLs) der räumlichen Bewegungskinetik von Flugzeug und Plattform, 12 DGLs der Kinetik von Flugzeug und Plattform, 4 algebraische Gleichungen (AGLs) zur Modellierung der durch die kardanische Aufhängung der Plattform im Flugzeug erzeugten Zwangskräfte und Zwangsmomente auf die Plattform, 2 AGLs zur Modellierung der Antriebskinematik infolge der Kugelgelenkstäbe an den Antrieben und 2 formale DGLs je zweiter Ordnung zur Modellierung der beiden Elektroantriebe. Bei fester Positionierung des INS im Flugzeug (siehe Bild 12a, Konfiguration A), stehen die 6 Freiheitsgrade, (Winkel-) Geschwindigkeiten und (Winkel-) Beschleunigungen des Flugzeugs als Messgrößen zur Verfügung. Bei einer Montage des INS auf der Plattform (siehe Bild 12a, Konfiguration B) stehen die 6 Freiheitsgrade, Geschwindigkeiten und Beschleunigungen der Plattform als Messgrößen zur Verfügung. In jedem der beiden Fälle werden diese Informationen als 6 weitere AGLs ins Modell eingebaut, die sich als 6 aktive Zwangsbedingungen interpretieren lassen. Die obigen Modellgleichungen in AGL- und DGL-Form lassen sich zu einem Gesamtmodell von 28 DGLs und 10 AGLs als DAGL-Modell (Differential-algebraisches Gleichungssystem) der Regelstrecke zusammenfassen. Sie beinhalten ferner eine Krafttransformationsmatrix, die aus den 2 AGLs der beiden Gelenkstäbe gewonnen wird. Dieses DAGL-Modell (HAHN, 2003) dient als Basismodell für ein Rechnersimulationsmodell der Regelstrecke sowie als Grundlage für Identifikationsalgorithmen zur Ermittlung der Modellparameter und als Basis für Reglerentwürfe.

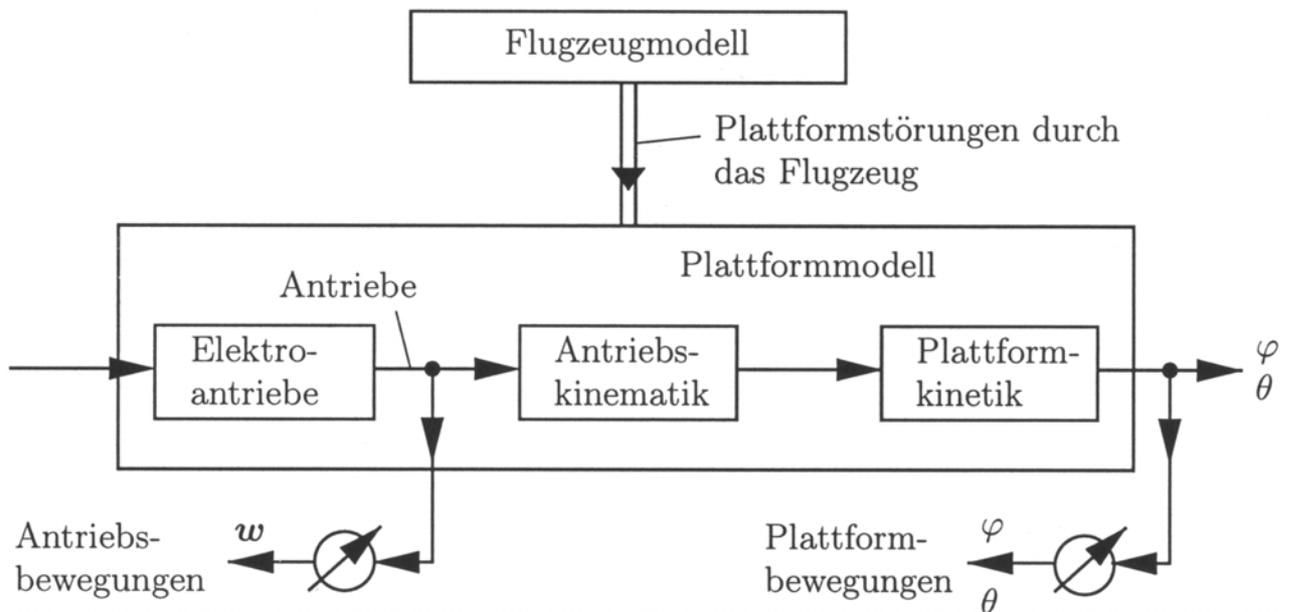
Nach Elimination von 10 Freiheitsgraden des Systems Flugzeug-Plattform mit Hilfe der 6 aktiven und 4 kinematischen Zwangsbedingungen und deren Zeitableitungen erhält man ein System von 4 DGLs (2 kinetische, 2 kinematische DGLs) in zwei Rotationsfreiheitsgraden des Systems Plattform-Flugzeug sowie 2 DGLs zweiter Ordnung für die beiden Antriebe (siehe Anhang A.1 und [4]). Die 6 aktiven Zwangsbedingungen liefern darüber hinaus ein Störgrößenmodell, das die unerwünschten Störkräfte und Momente des Flugzeugs infolge von Luftturbulenzen und Flugmanövern auf die Plattform beschreibt (vgl. das Blockschaltbild des Regelstreckenmodells aus Bild 12b). Dieses Modell wurde als Basismodell für Rechnersimulationen verwendet. Es ist besonders gut geeignet für die Ableitung modellbasierter symbolischer Regelalgorithmen nach erprobten regelungstheoretischen Methoden und Verfahren.

7.4 Untersuchte Regelalgorithmen

Aus dem obigen Regelstreckenmodell wurden Regelalgorithmen unterschiedlicher Komplexität abgeleitet. Diese Regelalgorithmen wurden in Rechnersimulationen und Laborexperimenten erprobt und bewertet. Die dabei gewonnenen Regelalgorithmen sind i.A. um so komplexer und wirksamer, je mehr der im Streckenmodell enthaltenen Informationen sie berücksichtigen. Aus einer langen Liste untersuchter und erprobter Regelalgorithmen werden die folgenden kurz skizziert (KLIER et al. 2001; HAHN & KLIER, 2003):



(a) Prinzipieller Aufbau des Systems Flugzeug-Plattform-Antriebe



(b) Stark vergrößertes Blockschaltbild des Regelstreckenmodells

Abb.: 12: Schematische Darstellung des Systems Flugzeug-Plattform-Kamera-Antriebe

7.4.1 Primitivregelung

Die einfachste Regelung der Plattform besteht darin, die Auslenkungen (ω_i , $i = 1, 2$) der elektrischen Aktoren zu messen und diese Signale nach Maßgabe des Blockschaltbildes von Bild 13 in ein dynamisches Entkopplungsnetzwerk zurückzuführen. Der Ansatz der Entkopplungscharakteristiken wird näherungsweise in Laborexperimenten ermittelt und über Tabellenauswertungen im Regelkreis berücksichtigt. Das dynamische Verhalten der Antriebsregler wird ebenfalls empirisch ermittelt. Dies geschieht ausgehend von der Annahme, dass die Entkopplungscharakteristiken die Antriebskanäle in dem anvisierten Aussteuerungsbereich hinreichend gut entkoppeln und dass jeder Antriebskanal, bedingt durch die Lastrückwirkung des zugehörigen Freiheitsgrades der Plattform und die Eigendynamik des Antriebsmodells, in erster Näherung als ein Einzelkanal mit 4 Polstellen beschreibbar ist, die durch den zugehörigen Regler in den gewünschten Bereich der komplexen Ebene platziert werden. Diese Lösung ist eine Lösung minimalen Aufwands (an verwendeter Modellinformation und anfallenden Realisierungskosten) und natürlich auch eine Regelung sehr begrenzter Güte und Verwendungsbreite. In diesem Regelkonzept werden die Messsignale des INS weder zur Regelung noch zur Störgrößenkompensation verwendet. Es werden ferner keinerlei detaillierte Informationen über die Teilmodelle (Antriebe, Kinetik und Kinematik) genutzt.

7.4.2 Multisensorregelung mit linearem oder nichtlinearem kinematischen Entkopplungsfilter

Dieses Regelungskonzept macht Gebrauch von folgenden Informationen über die Strecke:

- (i) Den Messungen der Flugzeuglagewinkel und deren beiden ersten Zeitableitungen
- (ii) durch das INS (Lösungsvariante A nach Bild 3),
- (ii) den Messungen der Antriebsauslenkungen (ω_1, ω_2), und
- (iii) den Modellgleichungen der linearen/nichtlinearen Antriebskinematik.

Im Blockschaltbild des Bildes 14 (Variante A) sind die Reglerblöcke (I, II, III) der aus diesen Informationen gewonnenen Regelalgorithmen eingezeichnet: Der Block I enthält die beiden unabhängigen Regler der Einzelantriebe. Der Reglerblock II enthält die Modellgleichungen der indirekten Antriebskinematik als nichtlineares kinematisches Entkopplungsfilter. Die zugehörigen nichtlinearen Filtergleichungen sind dem Anhang A.2 zu entnehmen. Aus den gewünschten Orientierungen η_{2d} der Plattform und den Messgrößen der Flugzeugorientierung η_{1m} berechnet dieser Algorithmus die gewünschten Auslenkungen ω_d der Antriebe in analytischer Form. Im Block III, der durch Messsignale der Flugzeugbewegungen η_{1m} und der Antriebsauslenkungen angesteuert wird, werden die Gleichungen der Antriebskinematik numerisch nach den Plattformorientierungswinkeln η aufgelöst.

Diese Regelung nutzt nicht die Modellinformationen über die Störgrößen auf die Plattform und die Informationen über die Kinetik der Flugzeug-Plattformkinetik.

7.4.3 Computed-Torque-Regelung mit linearem Polvorgaberegler, Störgrößenkompensation und unterlagerter Antriebsregelung

Dieses Regelungskonzept nutzt die vollständige Information der Sensoren und der Streckenmechanik (Kinematik und Kinetik des System Plattform-Kamera) in Form eines nichtlinearen sogenannten Computed-Torque-Reglers (CTR) unter Verwendung eines zusätzlichen unterlagerten linearen Antriebsreglers und eines linearen Polvorgabereglers mit linearem Vorfilter.

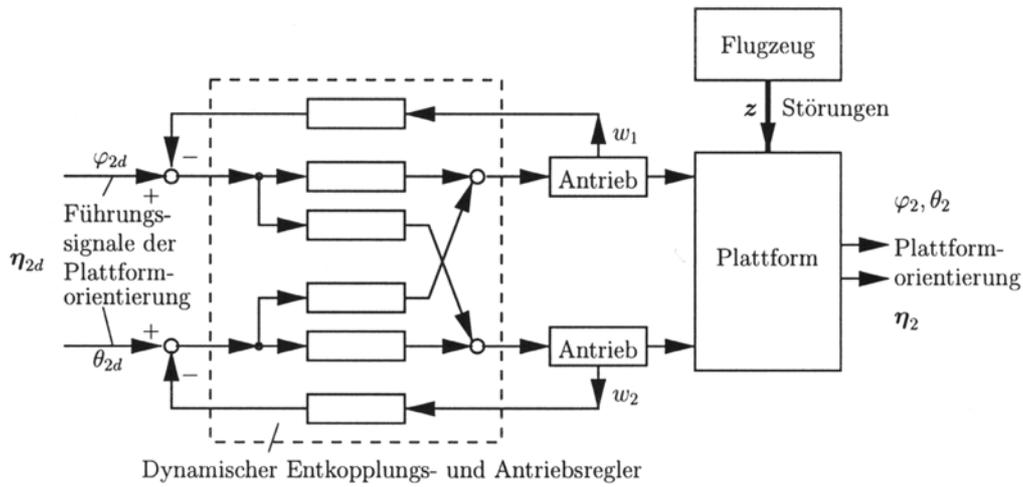


Bild 13: Blockschaltbild der Primitivregelung

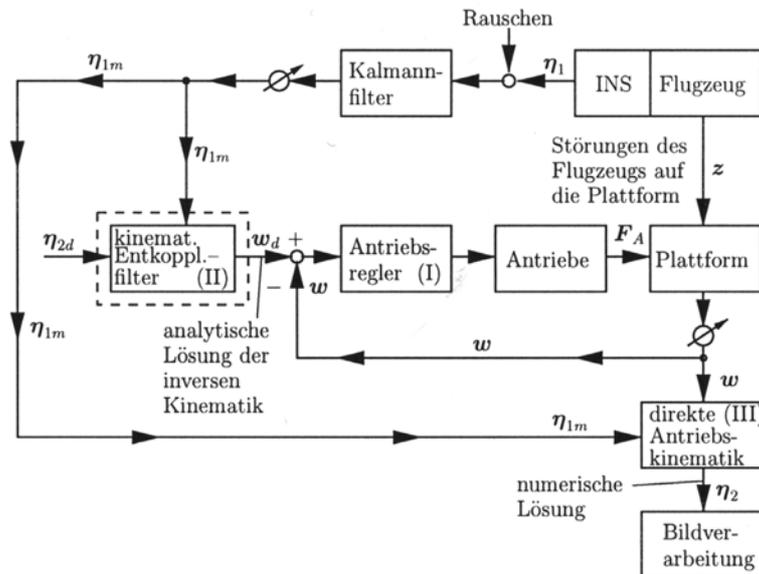


Bild 14: Regelkreisvariante A mit Multisensorregler

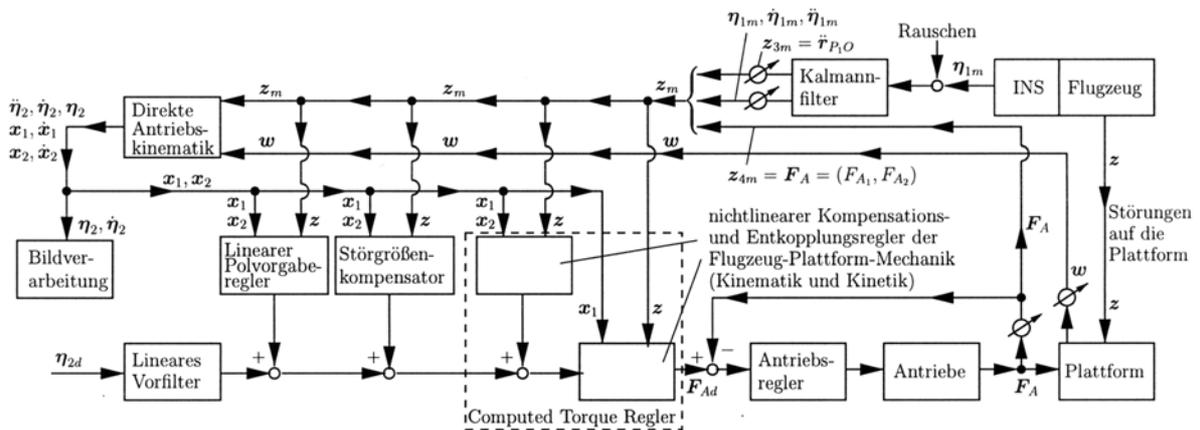


Bild 15: Regelkreis mit Computed-Torque-Regler und Antriebsreglern (Variante A)

Die Antriebe werden (jeder für sich) so geregelt, dass ihr Übertragungsverhalten im betrachteten Frequenzbereich nahezu ideal ist. Basierend auf dieser Voraussetzung kompensiert der CT-Regler die kinematischen und kinetischen Verkopplungen der Übertragungskanäle der Plattform (nichtlinearer Entkopplungsregler), die nichtlinearen Einflüsse der restlichen Übertragungskanäle und die Einflüsse der Störungen vom Flugzeug auf die Plattform (vgl. Bild 15). Dem resultierenden (von außen als nahezu linear erscheinenden) System wird durch den linearen Polvorgaberegler mit Vorfilter das endgültige gewünschte Übertragungsverhalten aufgeprägt. Die effiziente Nutzung der verfügbaren Informationen über die vom Flugzeug auf die Plattform übertragenen Störungen im Rahmen einer Störgrößenkompensation ist hier nur für hinreichend schnelle Antriebe vertretbar. Die Informationen über die Struktur der Antriebsmodelle werden hier nur teilweise genutzt.

7.4.4 Ein-Ausgangslinearisierender Regler mit Störgrößenkompensation und linearem Polvorgaberegler

Dieser Regler nutzt die gesamte Information aller Sensoren (INS und Antriebssensoren) sowie aller Modellgleichungen (Antriebe, Kinematik, Kinetik, Störungen). Das Gesamtsystem Plattform-Kamera-Antriebe wird über einen globalen nichtlinearen Kompensationsregler entkoppelt. Dabei werden zusätzlich die Nichtlinearitäten der Einzelkanäle kompensiert. Die Störungen des Flugzeugs auf die Plattform werden über eine nichtlineare Störgrößenkompensation entschärft. Das daraus resultierende System verhält sich vom Eingang und Ausgang her betrachtet hinreichend linear, so dass es zusätzlich mit konventionellen linearen Reglern (z.B. einem linearen Polvorgaberegler mit Vorfilter) geregelt wird. Eine separate unterlagerte Antriebsregelung ist bei dieser Regelung nicht erforderlich.



Bild 16: Kameraplattform auf Prüfstand montiert

Bemerkung (Robuste Zusatzregelung): Sind a priori quantifizierbare Kenntnisse über die Ungenauigkeiten oder Vereinfachungen der Modellgleichungen, fehlerhafte Modelldaten oder Schwankungen in den externen Störungen bekannt, so lässt sich häufig durch Einbau einer zusätzlichen robusten Regelung (z.B. realisiert als Sliding-Mode-Regelung) die Funktionstätigkeit des System trotz dieser Informationsdefizite garantieren. Diese Regelung wurde in Rechnersimulationen erfolgreich untersucht.

8. Ergebnisse und Ausblick

Die Qualität dieser Regelungskonzepte wurde in Rechnersimulationen und Laborexperimenten getestet. In beiden Fällen wurden die Experimente mit Führungssignalen durchgeführt, die in Flugversuchen ermittelt wurden. Die Laborexperimente wurden so durchgeführt, dass die Plattform auf einem Mehrachsenprüftisch als Flugsimulator aufgebaut wurde (vgl. Bild 16). Diese Ergebnisse, die in weiteren Arbeiten publiziert werden, zeigen, dass die komplizierten Regelalgorithmen (Computed-Torque-Regler und I/O-Linearisierungsregler) wesentlich bessere Resultate erzielen als die einfachen Regelalgorithmen. Diese Verbesserungen werden aber dadurch erkauft, dass die komplexen Regelalgorithmen einen wesentlich größeren Aufwand an Modellbildungsarbeit, Identifikationsarbeit, Implementierungsarbeit und Hardware-Elektronik benötigten als die einfachen Regler. In einem weiteren Schritt werden die komplexen Regler in Flugversuchen erprobt.

Literaturverzeichnis

- BÄUMKER, M.; BRECHTKEN, R.; HEIMES, F.-J. & RICHTER, T., 1997: Practical Experiences with a High-Precision Stabilized Camera Platform Based on INS/(D)GPS. In Proceedings of the First North American Symposium on Small Format Aerial Photography.
- BÄUMKER, M. & HEIMES, F.-J., 2001: New Calibration and Computing Method for Direct Georeferencing of Image and Scanner Data Using the Position and Angular Data of an Hybrid Inertial Navigation System. In Proceedings of the OEEPE Workshop "Integrated Sensor Orientation", University Hannover.
- BÄUMKER, M.; HEIMES, F.-J.; HAHN, H.; KLIER, W.; BRECHTKEN, R. & RICHTER, T., 2000: Mathematical Modeling, Computer Simulation, Control and Applications of a Stabilized Platform of an Airborne Sensor. In Proceedings of the 19th International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS) Congress, Amsterdam, The Netherlands.
- HAHN, H., 2003: Rigid Body Dynamics of Mechanisms, Vol. II Application to Planar and Spatial Mechanisms. Springer, Berlin, Heidelberg, New York, Barcelona, Hong Kong, London, Milan, Paris, Tokyo, 2003. To appear in July 2003.
- HAHN, H. & KLIER, W., 2003: On the Role of Kinematic Relations in Mechatronic Systems - An Application from Aerial Photogrammetry. In Mechatronics, Vol. 13, pp. 353-375.
- HAHN, H., 2002: Rigid Body Dynamics of Mechanisms, Vol. I Theoretical Basis. Springer, Berlin, Heidelberg, New York, Barcelona, Hong Kong, London, Milan, Paris, Tokyo.
- HEIMES, F.-J.; BÄUMKER, M.; BRECHTKEN, R. & RICHTER, T., 1994: Photogrammetric Data Acquisition from Light Aircraft on the Basis of the High performance Camera Context RTS III. In Proceedings of the GIM Conference, Vol. 8, pp. 50-53.
- JACOBSEN, K., 1996: User Manual Programm System BLUH. Institute for Photogrammetry and Engineering Surveys, University Hannover.
- KLIER, W.; GROSSHEIM, R. & HAHN, H., 2001: Modellbildung und nichtlineare Regelung einer stabilisierten Plattform in einem Flugzeug. In Automatisierungstechnik im Spannungsfeld neuer Technologien, VDI-Berichte 1608, pp. 295-302. VDI Verlag, Baden-Baden, Germany.
- KRAUS, K., 1997a: Photogrammetrie, Band 1: Grundlagen und Standardverfahren. 6. Aufl., Dümmlers Verlag, ISBN: 3-427-78646-3.
- KRAUS, K., 1997b: Photogrammetrie, Vol. 2: Advanced Methods and Applications. 4th ed., Dümmlers Verlag, ISBN: 3-427-78694-3.

A Anhang

A.1 Modellgleichungen in DGL-Form

Nach Elimination der abhängigen Variablen und der Lagrange'schen Multiplikatoren erhält man folgende vier DGLs der kinematischen und kinetischen Modellgleichungen der Regelstreckenmechanik (siehe [7]):

(A.1a)

$$\begin{aligned}
 \dot{\mathbf{p}}_{\text{ind}} &= \mathbf{T}_{\text{ind}}(\mathbf{p}_{\text{ind}}, \mathbf{p}_{1m}(t)) \cdot \mathbf{v}_{\text{ind}}, \\
 \mathbf{M}_{\text{ind}}(\mathbf{p}_{\text{ind}}, \mathbf{p}_{1m}(t)) \cdot \dot{\mathbf{v}}_{\text{ind}} &= \mathbf{f}_{\text{ind}}(\mathbf{p}_{\text{ind}}, \mathbf{v}_{\text{ind}}, \mathbf{p}_{1m}(t), \mathbf{v}_{1m}(t), \dot{\mathbf{v}}_{1m}(t)) \\
 &\quad + \mathbf{q}_{G_{\text{ind}}}(\mathbf{p}_{\text{ind}}, \mathbf{v}_{\text{ind}}, \mathbf{p}_{1m}(t), \mathbf{v}_{1m}(t)) \\
 &= \mathbf{q}_{\text{ind}}(\mathbf{p}_{\text{ind}}, \mathbf{v}_{\text{ind}}, \mathbf{p}_{1m}(t), \mathbf{v}_{1m}(t), \dot{\mathbf{v}}_{1m}(t))
 \end{aligned} \tag{A.1b}$$

mit der Massenmatrix

$$\begin{aligned}
 \mathbf{M}_{\text{ind}}(\mathbf{p}_{\text{ind}}, \mathbf{p}_{1m}(t)) &= \\
 \mathbf{J}_v^T(\mathbf{p}_{\text{ind}}, \mathbf{p}_{1m}(t)) \cdot \mathbf{M}(\mathbf{h}(\mathbf{p}_{\text{ind}}, \mathbf{p}_{1m}(t))) \cdot \mathbf{J}_v(\mathbf{p}_{\text{ind}}, \mathbf{p}_{1m}(t)) &= \\
 \mathbf{P}_r^T(x, y) \cdot \mathbf{A}^{L_2R}(\mathbf{p}_{\text{ind}}, \boldsymbol{\eta}_{1m}(t)) \cdot \mathbf{H}_2^T(\mathbf{p}_{\text{ind}}) \cdot \mathbf{P}_r(x, y) \\
 \cdot \left\{ \left[-\frac{\partial}{\partial \mathbf{p}_{\text{ind}}} \left(\mathbf{A}^{RL_2}(\mathbf{p}_{\text{ind}}, \boldsymbol{\eta}_{1m}(t)) \cdot \mathbf{r}_{QP_2}^{L_2} \right) \right]^T \cdot m_2 \cdot \mathbf{I}_3 \right. \\
 + \left[\frac{\partial}{\partial \mathbf{p}_{\text{ind}}} \left(\boldsymbol{\eta}_2(\mathbf{p}_{\text{ind}}, \boldsymbol{\eta}_{1m}(t)) \right) \right]^T \cdot \mathbf{H}_2^{-T}(\mathbf{p}_{\text{ind}}) \cdot \mathbf{A}^{RL_2}(\mathbf{p}_{\text{ind}}, \boldsymbol{\eta}_{1m}(t)) \cdot m_2 \cdot \tilde{\mathbf{r}}_{C_2P_2}^{L_2} \\
 \cdot \mathbf{A}^{L_2R}(\mathbf{p}_{\text{ind}}, \boldsymbol{\eta}_{1m}(t)) \left. \right\} \cdot \left[-\frac{\partial}{\partial \mathbf{p}_{\text{ind}}} \left(\mathbf{A}^{RL_2}(\mathbf{p}_{\text{ind}}, \boldsymbol{\eta}_{1m}(t)) \cdot \mathbf{r}_{QP_2}^{L_2} \right) \right] \cdot \mathbf{P}_r^T(x, y) \\
 \cdot \mathbf{H}_2(\mathbf{p}_{\text{ind}}) \cdot \mathbf{A}^{RL_2}(\mathbf{p}_{\text{ind}}, \boldsymbol{\eta}_{1m}(t)) \cdot \mathbf{P}_r(x, y) + \mathbf{P}_r^T(x, y) \cdot \mathbf{A}^{L_2R}(\mathbf{p}_{\text{ind}}, \boldsymbol{\eta}_{1m}(t)) \\
 \cdot \mathbf{H}_2^T(\mathbf{p}_{\text{ind}}) \cdot \mathbf{P}_r(x, y) \cdot \left\{ - \left[-\frac{\partial}{\partial \mathbf{p}_{\text{ind}}} \left(\mathbf{A}^{RL_2}(\mathbf{p}_{\text{ind}}, \boldsymbol{\eta}_{1m}(t)) \cdot \mathbf{r}_{QP_2}^{L_2} \right) \right]^T \cdot m_2 \right. \\
 \cdot \mathbf{A}^{RL_2}(\mathbf{p}_{\text{ind}}, \boldsymbol{\eta}_{1m}(t)) \cdot \tilde{\mathbf{r}}_{C_2P_2}^{L_2} + \left[\frac{\partial}{\partial \mathbf{p}_{\text{ind}}} \left(\boldsymbol{\eta}_2(\mathbf{p}_{\text{ind}}, \boldsymbol{\eta}_{1m}(t)) \right) \right]^T \cdot \mathbf{H}_2^{-T}(\mathbf{p}_{\text{ind}}) \\
 \cdot \mathbf{A}^{RL_2}(\mathbf{p}_{\text{ind}}, \boldsymbol{\eta}_{1m}(t)) \cdot \left(\mathbf{J}_{C_2}^{L_2} + m_2 \cdot \left[\left(\mathbf{r}_{C_2P_2}^{L_2} \right)^T \cdot \mathbf{r}_{C_2P_2}^{L_2} \cdot \mathbf{I}_3 - \mathbf{r}_{C_2P_2}^{L_2} \right. \right. \\
 \left. \left. \cdot \left(\mathbf{r}_{C_2P_2}^{L_2} \right)^T \right] \right) \left. \right\} \cdot \mathbf{A}^{L_2R}(\mathbf{p}_{\text{ind}}, \boldsymbol{\eta}_{1m}(t)) \cdot \mathbf{H}_2^{-1}(\mathbf{p}_{\text{ind}}) \cdot \left[\frac{\partial}{\partial \mathbf{p}_{\text{ind}}} \left(\boldsymbol{\eta}_2(\mathbf{p}_{\text{ind}}, \boldsymbol{\eta}_{1m}(t)) \right) \right] \\
 \cdot \mathbf{P}_r^T(x, y) \cdot \mathbf{H}_2(\mathbf{p}_{\text{ind}}) \cdot \mathbf{A}^{RL_2}(\mathbf{p}_{\text{ind}}, \boldsymbol{\eta}_{1m}(t)) \cdot \mathbf{P}_r(x, y) \in \mathbb{R}^{2,2},
 \end{aligned} \tag{A.1c}$$

und den Kräften und Momenten

$$\begin{aligned}
 \mathbf{q}_{G_{\text{ind}}}(\mathbf{p}_{\text{ind}}, \mathbf{v}_{\text{ind}}, \mathbf{p}_{1m}(t), \mathbf{v}_{1m}(t)) &= \mathbf{J}_v^T(\mathbf{p}_{\text{ind}}, \mathbf{p}_{1m}(t)) \\
 \cdot \mathbf{q}_G(\mathbf{h}(\mathbf{p}_{\text{ind}}), \mathbf{J}_v(\mathbf{p}_{\text{ind}}) \cdot \mathbf{v}_{\text{ind}}) &= -\mathbf{P}_r^T(x, y) \cdot \mathbf{A}^{L_2R}(\mathbf{p}_{\text{ind}}, \boldsymbol{\eta}_{1m}(t)) \cdot \mathbf{H}_2^T(\mathbf{p}_{\text{ind}}) \\
 \cdot \mathbf{P}_r(x, y) \cdot \left\{ \left[-\frac{\partial}{\partial \mathbf{p}_{\text{ind}}} \left(\mathbf{A}^{RL_2}(\mathbf{p}_{\text{ind}}, \boldsymbol{\eta}_{1m}(t)) \cdot \mathbf{r}_{QP_2}^{L_2} \right) \right]^T \cdot m_2 \cdot \mathbf{A}^{RL_2}(\mathbf{p}_{\text{ind}}, \boldsymbol{\eta}_{1m}(t)) \right. \\
 \cdot \tilde{\boldsymbol{\omega}}_{L_2R}^{L_2}(\mathbf{p}_{\text{ind}}, \mathbf{v}_{\text{ind}}, \mathbf{p}_{1m}(t), \mathbf{v}_{1m}(t)) \cdot \tilde{\boldsymbol{\omega}}_{L_2R}^{L_2}(\mathbf{p}_{\text{ind}}, \mathbf{v}_{\text{ind}}, \mathbf{p}_{1m}(t), \mathbf{v}_{1m}(t)) \cdot \mathbf{r}_{C_2P_2}^{L_2}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \left[\frac{\partial}{\partial \mathbf{p}_{\text{ind}}} \left(\boldsymbol{\eta}_2(\mathbf{p}_{\text{ind}}, \boldsymbol{\eta}_{1m}(t)) \right) \right]^T \cdot \mathbf{H}_2^{-T}(\mathbf{p}_{\text{ind}}) \cdot \mathbf{A}^{RL_2}(\mathbf{p}_{\text{ind}}, \boldsymbol{\eta}_{1m}(t)) \\
& \cdot \tilde{\boldsymbol{\omega}}_{L_2R}^{L_2}(\mathbf{p}_{\text{ind}}, \mathbf{v}_{\text{ind}}, \mathbf{p}_{1m}(t), \mathbf{v}_{1m}(t)) \cdot \left(\mathbf{J}_{C_2}^{L_2} + m_2 \cdot \left[\left(\mathbf{r}_{C_2P_2}^{L_2} \right)^T \cdot \mathbf{r}_{C_2P_2}^{L_2} \cdot \mathbf{I}_3 - \mathbf{r}_{C_2P_2}^{L_2} \right. \right. \\
& \left. \left. \cdot \left(\mathbf{r}_{C_2P_2}^{L_2} \right)^T \right] \right) \cdot \boldsymbol{\omega}_{L_2R}^{L_2}(\mathbf{p}_{\text{ind}}, \mathbf{v}_{\text{ind}}, \mathbf{p}_{1m}(t), \mathbf{v}_{1m}(t)) \left. \right\} \in \mathbb{R}^2.
\end{aligned}$$

(A.1d)

Studium des Geoinformationswesens in Nordamerika für Deutsche

Gottfried Konecny¹

Zusammenfassung: Das Interesse deutscher Studenten an einem Studienaufenthalt des Vermessungs- und Geoinformationswesens ist groß. Im Beitrag werden zunächst die Unterschiede der universitären Ausbildung zwischen Deutschland und Nordamerika charakterisiert. Dann wird dargestellt, wo und wie man Geoinformationswesen in Nordamerika studieren kann. Dabei ist die Studienfinanzierung ein zentrales Thema. Nach einer Darstellung der Studienbedingungen in Nordamerika werden die Vorteile eines Studienaufenthaltes in Nordamerikahervorgehoben.

1. Möglichkeiten des Studienaufenthaltes in Nordamerika

In den Siebzigerjahren hat es einmal eine inoffizielle Klassifizierung von Promotionsabsolventen in Deutschland gegeben: den Dr. Ing. (oder rer.nat.) und den Dr. i. A. g. (sprich: in Amerika gewesen!)

Diese „Klassifizierung“ ist seit den jüngsten Ereignissen sicher vergessen bei uns. Allerdings ist das Studium in Nordamerika für deutsche Studenten nach wie vor attraktiv.

Zunächst soll auf die Unterschiede der beiden Ausbildungssysteme Nordamerika- Europa hingewiesen werden: Nordamerika bietet in 12 Jahren bis zum „Highschool- Diplom“ eine klassenlose Ausbildungsmöglichkeit. Die Lehrerschaft der Primary School und der Highschool versucht die Schüler so gut es eben geht akademisch zu motivieren. Natürlich gibt es Unterschiede zwischen den einzelnen Schulen, die aber bestimmt werden durch die Wohnlage der Schulen und deren Milieu. Wer mit besseren Noten aufwarten kann, und wer eine renommierte Highschool besucht hat wird bei der Bewerbung an einer Universität (dem College) keine Schwierigkeit haben nach einer Bewerbung als Student aufgenommen zu werden. Oftmals bestimmt eine Aufnahmeprüfung über die Zulassung.

Einmal in „Grade 13“, dem ersten College- Jahr aufgenommen, beginnt der Wettstreit ums Überleben in der Uni- Szene. Es gibt laufend Tests und mehrere Prüfungen während des akademischen Jahres in jedem Fach. Wer diese Prüfungen am Ende des Jahres nicht besteht, kann nicht ins nächste Jahr aufgenommen werden und muss im Falle einer Wiederholung das Studium an der Studienuniversität aufgeben. Vielleicht kann er dann an ein „Cow - College“ überwechseln, wo die Anforderungen nicht so hoch sind. Allerdings ist das im Bereich des Geoinformationswesens kaum möglich, da es nur wenige Institutionen gibt.

¹ Emeritus Prof. Dr. mult. Gottfried Konecny, Institut für Photogrammetrie und Geoinformation, Universität Hannover, Nienburger Strasse 1, 30167 Hannover

Das Studium kostet Geld, nicht nur um zu leben, sondern die teils hohen Studiengebühren zu bezahlen. Aber wenn die Eltern das Geld nicht aufbringen wollen oder können kann der Student sich bei einer Bank einen Kredit besorgen, den er nach zügigem Abschluss des Studiums zurückzahlen muss. Daneben gibt es die Möglichkeit während des Studiums zu jobben oder bei extrem guten Noten ein „scholarship“ zu erhaschen. Die Ferien im Sommer sind in Amerika ohnehin lang genug um einen „Summer – Job“ wahrzunehmen, von MacDonalds bis zum Job im Fachgebiet. Es gibt kaum jemand, der sich über dieses soziale Umfeld beschwert, denn es gibt in Amerika keine Arbeitsplatzbeschränkungen wegen mangelnder Qualifikationen, wie das in Europa der Fall ist. Der Arbeitsmarkt ist für Amerikaner oder Kanadier also weitgehend offen. Allerdings ist es für Ausländer, die mit einem Studentenvisum einreisen, schwierig eine Arbeitsgenehmigung zu erhalten.

Für europäische Studenten ist es oft eine heilsame Lehre festzustellen, dass ein Studienplatz keine sozial erworbene Berechtigung darstellt, mit der man leichtfertig umgehen kann.

Nach dem erfolgreichen „Undergraduate“ Studium, das in 3 bis 4 Jahren mit dem akademischen Grad „Bachelor of Science“ (B.Sc.) abgeschlossen wird, besteht bei gutem Abschneiden die Möglichkeit zu einem „Graduate“ Studium zugelassen zu werden. Als Graduate Student kann man in 2 Jahren Studium einschließlich einer „Thesis“ den akademischen Grad „Master of Science“ (M.Sc.) erwerben. Absolventen einer deutschen Hochschule mit dem akademischen Grad „Dipl. Ing.“ mit guten Noten haben normalerweise keine Schwierigkeit als Graduate Student angenommen zu werden. Die Zulassung ist der jeweiligen Universität überlassen und es ist schon vorgekommen, dass deutsche Studenten ohne Dipl. Ing. aber mit Nachweise über ein 4 jähriges Studium mit bestandenem Vordiplom und anerkannten Übungen und bestandenen Teilprüfungen als Graduate Studenten angenommen worden sind. Auch der Dipl. Ing. einer Fachhochschule ist im Grunde keine Hürde, wenn der für das Graduate Studium zuständige Fachadvisor im jeweiligen Department das o.k. gibt. Die Zulassung zu Graduate Studies wird also von Ort zu Ort sehr flexibel gehandhabt.

Sollte es mit einer Zulassung für ein Degreestudium (B.Sc. oder M.Sc.) nicht klappen, so ist allemal die Einschreibung als „Special Student“ möglich, bei der man alle Kurse, die keine Voraussetzungen erfordern, belegen darf. Man erwirbt trotz Prüfungszwang aber nicht das Recht mit diesem Kurs einen Degree zu erwerben. Trotzdem sind die üblichen Studiengebühren zu zahlen. Die „fees“ können an den jeweiligen Webseiten der Universitäten eingesehen werden. An der University of New Brunswick betragen beispielsweise die fees für 9 Monate 4600€ Niedrigere „Resident Fees“ gelten für permanente Einwohner der jeweiligen Staaten der USA oder der jeweiligen Provinzen von Kanada. „Out-of-State“ fees sind fast doppelt so hoch und kommen für deutsche Studenten infrage, wenn nicht durch einen Austauschvertrag zwischen einer deutschen und einer nordamerikanischen Universität ein „zero-fee“ oder „resident-fee“ ausgehandelt worden ist. Solche Verträge müssen über den Tisch des Präsidenten der Partneruniversität gelaufen sein, sie sind häufig nur schwierig und mit großem Vorlauf vom Leiter eines deutschen Instituts zu beantragen und durchzusetzen. Diese Zusatzinitiative deutscher Professoren im Einsatz für deutsche Studenten wird von den deutschen Studenten, die nach Nordamerika zum Studium bei verbesserten Bedingungen gehen oft gar nicht bemerkt.

Wenn man einem deutschen Studenten raten sollte, wann er nach Amerika gehen sollte, so sicherlich am besten erwerben. Während sich die Universitäten in Nordamerika und Europa und vor allem ihre Professoren darüber streiten ob ein europäisches Diplom einem M.Sc. oder einem B.Sc. gleichzusetzen ist, führt diese Diskussion zu gar nichts. Ich bin als deutscher Dipl. Ing. und als amerikanischer M.Sc. davon überzeugt, dass der große Vorteil beider

Abschlüsse darin liegt, das eine Fach aus zwei verschiedenen Sichtweisen kennen zu lernen. Dies ist prägend für das weitere Berufsleben.

Nützliche Webseiten sind für das Studium in den USA:

www.fh-hannover.de/usa/

und für Kanada:

www.cic.gc.ca

2. Wo und was?

In Deutschland ist das Studium des Vermessungswesen eine seit 1930 etablierte Studienrichtung. Sie führt in einen anerkannten Berufsstand, der aus nahezu 10 000 tätigen Absolventen besteht.

Dies ist in Nordamerika völlig anders. In Kanada hat es im französischsprachigen Quebec seit langem zwar eine Geometerausbildung gegeben, aber ein nach deutschem Muster orientiertes Geodäsiestudium ist in Kanada erst 1960 an der University of New Brunswick eingerichtet worden. Ab 1971 gibt es einen Ableger davon an der University of Calgary. Diese beiden Universitäten sind der Ausbildung in Deutschland durchaus ebenbürtig, wenn auch angepasst an die unterschiedliche „Kultur“. Auch die University of Toronto und die Université Laval in Quebec bieten „Geomatics“-Programme an. (Canadian Surveyor 1960 und 1967).

In den USA ist die Situation völlig unterschiedlich. Es gibt zwar eine Reihe von Colleges, in denen „Geoinformationswesen“ als eine B.Sc.- Fachrichtung besteht, doch fehlt jedem dortigen Programm eine entsprechende Komponente dessen, was wir als Vermessungs- und Geoinformationswesen betrachten.

Der besondere Wert der amerikanischen (aber auch der kanadischen) Universitäten liegt darin, dass dort sehr leicht nach Abschluss des deutschen Diploms die akademischen Grade M.Sc. und Ph.D. erworben werden können. Das deutsche Hauptdiplom mit seiner Breite und Tiefe stellt dazu eine hervorragende Vorleistung dar.

Tabelle 1 listet die 14 Universitäten der USA, an denen „Geomatik, Geodäsie, Geoinformationswesen oder Vermessungswesen studiert werden kann mit ihren fachlichen Stärken und Schwächen auf. Diese Bewertung entstammt einem amerikanischen Artikel beim FIG- Kongress 2002. (S. Frank 2002)

3. Möglichkeiten der Studienfinanzierung

Bewerbungsmöglichkeiten für ein Auslandsstipendium bestehen für die USA und für Kanada beim DAAD. Für die USA gibt es die sogenannten U.S. Fulbright- Regierungsstipendien für die man sich in einem Ausleseverfahren etwa 1 Jahr zuvor bewerben kann. Diese Möglichkeit wurde nach dem Zweiten Weltkrieg von Tausenden von Deutschen wahrgenommen. Sie hat vielen Deutschen die Möglichkeit einer akademischen Karriere eröffnet.

In den USA sind auch direkte Scholarship- Applications bei den jeweiligen Universitäten möglich. Allerdings ist eine enorme Bewerbungsinitiative erforderlich um zum Zuge zu kommen.

Im Prinzip ist auch eine Bafög- Förderung möglich. Die Bedingungen kann man über die Studentenwerke erfragen. Mit Bafög erhält man einen monatlichen Auslandszuschlag von €10 für die USA und von €0 für Kanada.

Tafel 1: Stärken der Schwächen der U.S. Surveying and Mapping Studien- Programme
(nach S. Frank, 2002)

Institution	Stärken	Schwächen
Ohio State University Columbus, Ohio	Geodäsie & GPS, Kartographie	Vermessungskunde, Kataster Landmanagement
Oregon Institute of Technology	Vermessungskunde, Kartographie	Geodäsie, Photogrammetrie
Fresno State College Fresno, Kalifornien	Photogrammetrie, GPS	
Pomona Kalifornien	GIS	Photogrammetrie & Fernerkundung
Michigan Tech		
Ferris State		
Texas A&M		Vermessungskunde, Kataster Landmanagement
Purdue University Lafayette, Indiana	Photogrammetrie	
Penn State State College, Pennsylv.	Vermessungskunde	GIS
New Mexico State University	Kartographie	
University of Alaska	Kataster	
East Tennessee State		GIS
University of Maine Orono, Maine	GIS Kataster	

Alle 13 genannten Studiengänge sind akkreditiert. Ein fehlender Eintrag bedeutet, dass das Gebiet ohne besondere Stärken und Schwächen vertreten ist.

Dem Selbstzahler steht die direkte Bewerbung um Zulassung an der Universität offen. Sie ist aber auch Voraussetzung für die Bewerbung bei Bafög oder um ein Stipendium.

Voraussetzung für die erfolgreiche Bewerbung bei der nordamerikanischen Universität ist die Beherrschung der Landessprache. Sie muss über einen TOEFL- Test nachbewiesen werden, den man entweder per Korrespondenz oder an entsprechend berechtigten deutschen Hochschulen (mehrmals im Jahr) ablegen kann. Nur bei entsprechend hoher Punktzahl (vorgeschrieben durch die jeweilige Uni oder den Stipendiengeber) ist die Bewerbung erfolgreich. Die Kosten für den TOEFL-Test in Deutschland betragen für den Computertest oder den schriftlichen Text 110\$, falls man ein „Assitanship“ der Universität als Verdienstmöglichkeit erhalten soll, kommt noch ein mündlicher Test (20 Minuten) hinzu, der 125\$ kostet. Details findet man auf der Webseite www.toefl.org/tse/tseindx.html

4. Studienbedingungen

Die Unterbringung der Studierenden am Studienort ist in Nordamerika im allgemeinen unproblematisch. Man kann entweder in einer Universitätsresidence wohnen oder sich privat eine Unterkunft suchen. Die Residence bietet die Vorteile, direkt am Campus zu wohnen und schnell Kontakte mit Mitstudenten knüpfen zu können. Für einen Platz für eine Residence bewirbt man sich am besten sofort, wenn man die Zulassung erhalten hat. Vor Ort sind die Universitäten beim Finden einer Unterkunft sehr hilfreich. Vor allem besticht die Europäer die Effizienz und Höflichkeit des dortigen Beratungspersonals.

Ist man erst mal untergebracht und erscheint man bei dem angemeldeten Kurs, wird einem erst mal Studienliteratur vorgeschrieben oder empfohlen. Man eilt zum Bookstore und kauft die vorgeschriebenen oder empfohlenen Textbücher. Bei den Vorlesungen und Übungen (Laboratories) ist Anwesenheitspflicht, die bisweilen auch kontrolliert wird. Der deutsche Student oder Absolvent wird diese Verschulung zwar als unangenehm empfinden, aber sie hat den Vorteil, dass man über den Studienfortgang stets im Bilde ist und so leichter die Zwischenprüfungen besteht. Im Gegensatz zu Deutschland ist man in Nordamerika voll in den Studienbetrieb integriert. Wer nicht mitmacht, hat keine Chancen des Vorwärtkommens.

5. Vorteile eines Studienaufenthaltes

Ein Auslandsstudium in Nordamerika bietet eine Reihe von Möglichkeiten sich zusätzlich beruflich und menschlich zu qualifizieren:

- Man lernt das Fachgebiet aus einer völlig neuen Sichtweise kennen. Im Vordergrund steht dort die nordamerikanische Problematik, die sich von der europäischen grundlegend unterscheidet.
- Man erlernt das Fachgebiet in der wichtigsten Fremdsprache „Englisch“, eine Voraussetzung für das internationale Engagement.
- Man erlernt die Denkweise anderer Kulturen, eine Ausbildung in Toleranz und gegenseitigem Verstehen.
- Man löst sich von den Zwängen der Inlandshierarchie.

Ein Weg ins Ausland ist nicht immer leicht, trotzdem empfehle ich ihn jedem offen orientierten Studenten. Die zwei Jahre im Ausland hat er durch den Gewinn seiner menschlichen Erfahrungen bald aufgeholt.

Ein Studienaufenthalt in Nordamerika ist kein Auslandstourismus. Ein Tourist wird als Geldgeber toleriert, aber nicht akzeptiert. Ein Auslandsstudent muss aber seinen Mann oder seine Frau stehen. Trotzdem, es ist die Sache wert.

6. Literaturverzeichnis

- CANADIAN SURVEYOR (1960): Colloquium on Survey Education,
Beiträge von: A.C.Hamilton, E.Van Steenburgh, W.F.Roberts, J.G.Pierce, J.March,
A. Bereskin, D.Kendall, E.H.Thompson, T.J.Blachut, A.McNair, S.deJong,
Z.Rousseau, L. Howlett ; S.1-86
- CANADIAN SURVEYOR (1967): Colloquium on Survey Education II,
Beiträge von: S.Gamble, J. Dineen, L.Howlett, W.McLean, W.Blackie, A.C.Hamilton,
P.Angus-Leppan; S. 1-151
- FRANK, P. (2002), U.S.Surveying and Mapping Core Curricula, Proceedings des 22. FIG-
Kongresses 2002, Washington, D,C., ISBN 87-90907-20-5
- BRAUN, Ute (1999), Studienführer USA, Kanada, DAAD, W. Bertelsmann 1999

Aktuelle Erfahrungen im Einsatz von E-Learning und photogrammetrischer Auswertesoftware im Fachbereich „Bauingenieur- und Vermessungswesen“

MANFRED WIGGENHAGEN & FOLKE SANTEL¹

Zusammenfassung: In den vergangenen Jahren mussten die Kursinhalte im Fach "Vermessungskunde für Bauingenieure" im Studienfach Bauingenieurwesen der Universität Hannover auf internetbasierten Übungsbetrieb umgestellt werden, um die hohe Zahl von bis zu 380 Studierenden innerhalb eines Semesters wirtschaftlich betreuen zu können. Aus praktischen Feldübungen wurden Übungsbesprechungen in Präsenzveranstaltungen mit multimedial aufbereiteten Stundenübungen, Hausübungen und Erläuterungen von komplexeren Messaufgaben. Durch die Implementierung von Zugriffszählern auf den verschiedenen Internetseiten konnte im Wintersemester 2002/2003 sehr gut nachvollzogen werden, wie intensiv die unterschiedlichen E-Learning-Angebote genutzt wurden. Eine Befragung zu Beginn des Semesters ergab, dass über 90 % der anwesenden Studierenden sich zusätzlich praktische Übungen am Messgerät wünschten. Diesem Wunsch konnte durch das Angebot zusätzlicher Übungsstunden entsprochen werden, da inzwischen nur noch ca. 60 Studierende in dem Fach eingeschrieben sind.

In den vergangenen Jahren wurden zunehmend auch Bauingenieure der höheren Semester während ihrer Projektarbeit betreut. Innerhalb der Projektarbeit müssen die Studierenden innerhalb von vier Wochen ein begrenztes Projekt bearbeiten, auswerten und dokumentieren. Sämtliche Projektaufgaben wurden mit Methoden der Photogrammetrie gelöst. In diesem Artikel werden die Erfahrungen und Ergebnisse aus fünf verschiedenen Projektarbeiten bewertet. Ein Ausblick auf zukünftige Projekte soll die Diskussion zur Einsetzbarkeit von "low-cost" Softwarepaketen in der Ausbildung einleiten.

1 Motivation

In den vergangenen vier Jahren wurde die Ausbildung im Kurs: „Vermessungskunde für Bauingenieure“ zusätzlich mit internetbasierten Inhalten ausgestattet (BAUING 2, 2003). Auf diese Weise konnte der Übungsbetrieb flexibler gestaltet werden und den Studierenden die Möglichkeit gegeben werden, unabhängig von den Präsenzveranstaltungen die Lehrinhalte zu vertiefen (BAUING 1, 2003). Zur Erhöhung der Akzeptanz der Internetdarstellungen durch die Studierenden wurden einige komplexere Themen mit multimedialen Mitteln aufbereitet (WIGGENHAGEN, M., 2001B). Einige dieser Internetpräsentationen wurden bereits in (WIGGENHAGEN & SCHMIDT, 2002) vorgestellt. Im Wintersemester 2002/2003 wurden im Rahmen einer Fragebogenaktionen die aktuellen Wünsche der Studierenden ermittelt. Da sich 51 von 68 Befragten wieder praktische Geräteübungen wünschten, wurden zusätzliche praktische Geräteübungen angeboten. Zusätzlich zu den Grundlagen der Vermessungskunde im ersten Semester wurden in den vergangenen Jahren Projektarbeiten für Bauingenieure im höheren Semester betreut. Der große Erfolg dieser Arbeiten mit einer Bearbeitungsdauer von nur vier Wochen ist wesentlich auf die Leistungsfähigkeit des Programmes PhotoModeler

¹ Universität Hannover, Institut für Photogrammetrie und GeoInformation,
Nienburger Str.1, D-30167 Hannover,
Dr.-Ing. Manfred Wiggenhagen,
email: wigge@ipi.uni-hannover.de
Dipl.-Ing. Folke Santel,
email: santel@ipi.uni-hannover.de

Pro 4.0 der Firma EOS. Inc. zurückzuführen (EOS, 2003).

2 Einführung

Der Kurs: „Vermessungskunde für Bauingenieure“ basiert auf folgendem Ausbildungskonzept:

- 1.) Zweistündige Vorlesung zur Darstellung der grundlegenden Inhalte.
- 2.) Zweistündige Übung mit Übungsvorbesprechung, Vertiefung der Inhalte und Vorbereitung der häuslichen Übungen in einer ca. 45-minütigen Stundenübung.
- 3.) Umgang mit den gängigen Vermessungsgeräten in einer dreistündigen praktischen Übung mit individueller Betreuung in Gruppen mit maximal 4 Personen.

Die Inhalte der Stunden- und Hausübung sowie Hintergrundwissen zu den Messverfahren werden auf mehreren kursbegleitenden Internetseiten angeboten.

2.1 Akzeptanz durch die Studierenden

Im direkten Dialog mit den Studierenden wurde festgestellt, dass die Internetinhalte als sehr sinnvoll und hilfreich bei der Vorlesungsvorbereitung und Übungsbearbeitung angesehen werden. Zusätzlich zu den Befragungen wurden auf den entsprechenden Internetseiten Zugriffszähler installiert, die eine Beurteilung des Zugriffsverhaltens während des Wintersemesters ermöglichten. In Tabelle 1 sind die Zugriffszahlen der wichtigsten Internetinhalte aufgelistet.

Die nachfolgend aufgeführten Stichproben wurden zu Beginn der Vorlesungen, vor und nach den Übungen, sowie nach Abschluss der Veranstaltung erhoben.

	17.10.02	24.10.02	01.11.02	13.11.02	19.11.02	12.02.03	03.03.03	22.04.03	Diff.
Vorlesungsseite	1350	1360	1450	1560	1620	1966	2061	2179	829
Übungsseite	1170	1180	1335	1494	1547	2200	2565	2632	1462
1. Stundenübung	237	241	311	409	430	563	566	576	339
2. Stundenübung	219	220	254	313	329	453	456	477	258
3. Stundenübung	557	559	582	642	675	942	981	1095	538
4. Stundenübung	162	164	173	194	203	298	303	311	149
5. Stundenübung	162	163	171	190	197	306	310	317	155
Summe	3857	3887	4276	4802	5001	6728	7242	7587	3730
Differenz	0	30	419	945	1144	2871	3385	3730	

Tab.1: Zugriffszahlen im WS 2002/2003

Folgende Übungen wurden im Wintersemester 2002/2003 angeboten:

1. Übung "Liniennivellement / Erdmassenberechnung",

2. Übung "Bauplatzabsteckung",
3. Übung "Orthogonalaufnahme/Flächenberechnung",
4. Übung "Polares Anhängen/Vorwärtsschnitt",
5. Übung "Turmhöhenbestimmung".

Im Wintersemester 2002/2003 fanden insgesamt 3730 Zugriffe auf vorlesungs- und übungsrelevante Seiten statt. Es ist eine starke Korrelation zwischen der Erhöhung des Zugriffszählers für Übungen innerhalb der Woche zu verzeichnen, in der die Übung auch tatsächlich durchgeführt wurde. Die Studierenden nutzen also die Internetinhalte, um sich gezielt auf die jeweilige Übung vorzubereiten. Im Januar 2003 war der Vorlesungs- und Übungsbetrieb abgeschlossen und im Februar wurden die Noten bekannt gegeben. Nach diesen Termin wurden noch 859 Zugriffe verzeichnet. Davon erfolgten 213 Zugriffe auf Vorlesungsseiten und 646 auf Übungsinhalte. Diese Zahlen sind bei einer gemeldeten Studierendenzahl von 72 Personen sehr bemerkenswert und belegen, dass die Inhalte nicht nur von Studierenden des aktuellen Semesters sondern auch von Dritten abgefragt werden. Die Internetseiten, auf denen die Noten der Übungen bekannt gegeben wurden, wiesen in dem gleichen Zeitraum 80 Abfragen auf. Die hohen Zugriffszahlen und die positive Resonanz der Studierenden motivieren dazu, auch in den folgenden Jahren eine Unterstützung der Lehre durch Internetinhalte vorzunehmen.

2.2 Betreuung von Projektarbeiten

Studierende des Studiengangs Bauingenieurwesen müssen im höheren Semester eine vierwöchige Projektarbeit ablegen, welche die selbständige wissenschaftliche Bearbeitung eines aktuellen Themas umfasst. Da bereits im ersten Fachsemester in dem Kurs „Vermessungskunde für Bauingenieure“ Grundlagen der Photogrammetrie und Geographischer Informationssysteme vermittelt wurden, wählen interessierte Studierende im siebten Semester zunehmend Themen aus dem Fach Photogrammetrie für ihre Projektarbeit aus. Zur reibungslosen Abwicklung der Projektarbeit in dem engbemessenen Zeitraum wurde ein einheitliches Ausbildungskonzept benutzt. Unabhängig von den Projekteinhalten wurde folgendes Schema bei der Durchführung der Projektarbeit angewendet:

- Erarbeitung der notwendigen Grundlagen aus dem jeweiligen Spezialgebiet,
- Planung der Vorgehensweise bei der Lösung der speziellen Messaufgabe,
- Einweisung in die notwendigen Messgeräte und Softwarepakete,
- Durchführung der Aufnahme und Auswertung in häuslicher Bearbeitung,
- Anfertigung der Dokumentation und Bewertung der Ergebnisse.

Im nachfolgenden Kapitel werden die Erfahrungen bei der Durchführung dieser Projektarbeiten dargestellt. Die positiven Erfahrungen mit der Auswertesoftware PhotoModeler Pro 4.0 der Firma EOS Inc. aus den vergangenen Jahren (WIGGENHAGEN, M., 2001A) führten zu der Entscheidung, diese Software auch für die Lösung der Projektaufgaben einzusetzen.

3 Erfahrungen bei der Durchführung von Projektarbeiten

Bei den unterschiedlichen Projektarbeiten wurden photogrammetrische Aufgabenstellungen bearbeitet, die nur unter Einsatz photogrammetrischer Mess- und Auswertesoftware gelöst werden konnten. Da die Studierenden des Studiengangs „Bauingenieurwesen“ über kein Detailwissen zu grundlegenden Themen der Photogrammetrie verfügten, wurde als Software das Programm PhotoModeler Pro 4.0 der Firma EOS Inc. eingesetzt. Dieses Programm weist folgende Vorteile auf: Intuitive Nutzerschnittstelle, Einfache Nutzung grundlegender Funktionen, detaillierte Online-Hilfe, Tutorial-Projekte und Tutorial-Videos. Die Vor- und Nachteile computer-unterstützter Lehrangebote als Ergänzung zur Präsenzlehre wurde bereits in (SCHIEWE, 2001) eingehend diskutiert.

Unter dem Aspekt des E-Learning spielen die auf der Installations-CD befindlichen Tutorien eine sehr wichtige Rolle. Nach kurzer, etwa 30-minütiger Einweisung in die Funktionalität des Programms waren die Projektteilnehmer in der Regel sofort in der Lage das vollständige Projekt zu bearbeiten. Bei der Abwicklung der Projektarbeiten wurden folgende Arbeitsschritte durchgeführt:

- Kamerakalibrierung,
- Bildaufnahme mit digitaler Kamera,
- Import der Bilder in das Projekt,
- Bildkoordinatenmessung von Verknüpfungspunkten,
- vollständige Bündelausgleichung,
- Visualisierung der Ergebnisse.

3.1 Projekthalte

Das Institut für Verkehrswirtschaft, Straßenwesen und Städtebau der Universität Hannover betreute neben dem Institut für Photogrammetrie und GeoInformation (IPI) die Studierenden bei der Durchführung der Projektarbeiten. Um den Zielrichtungen der beiden Instituten Rechnung zu tragen, wurden wechselnde Themen und Objekte als Projekthalt vorgegeben. In allen Fällen wurde eine Projektbegrenzung eingeplant, um die Lösung der Aufgabe innerhalb der vier Wochen zu ermöglichen. Folgende Themen wurden in den vergangenen Jahren vergeben:

- Computergestützte dreidimensionale Objekterfassung mit photogrammetrischen Methoden (Erfassung eines Brückensegmentes in Hannover),
- Dreidimensionale Objekterfassung mit photogrammetrischen Methoden (Erfassung eines Kunstobjektes auf dem Königsworther Platz in Hannover), (siehe Abb.1),
- Erfassung von Fahrzeuggeschwindigkeit und –abstand mit photogrammetrischen Methoden (Auswertung von Verkehrsvideosequenzen),
- Dreidimensionale Objekterfassung eines Brückenbauwerks mit Photogrammetrie (Aufnahme und Auswertung der Fußgängerbrücke zur Mensa der Uni Hannover),
- Photogrammetrie in der Unfallforschung (Auswertung von Photodokumentationen zu Verkehrsunfallszenen), (siehe Abb.2).



Abb.1: Kunstobjekt



Abb.2: Verkehrsunfallszene

3.2 Projektergebnisse

In Abhängigkeit von den unterschiedlichen Projektinhalten wurden verschiedenen Ergebnisse aufbereitet und dokumentiert. Zusätzlich zu dreidimensionalen Koordinaten der Objektpunkte in einem lokalen Koordinatensystem wurden internettaugliche 3D-Darstellungen als Drahtgittermodell hergestellt und als VRML-Modell exportiert. Innerhalb der Auswertung der Unfallszenen wurden zusätzlich Orthophotos der dokumentierten Szenarien angefertigt. Die Ermittlung von Fahrzeugabständen und –geschwindigkeiten wurde durch Einzelbildauswertung der Videosequenzen rein numerisch durchgeführt. Aufgrund des robusten Laufzeitverhaltens der eingesetzten Software und der optimalen Planung der jeweiligen photogrammetrischen Aufnahmekonfigurationen konnten die Projekte ohne Zwang zur Nachbesserung oder Wiederholungsmessung abgeschlossen werden. Die Ergebnisse der Arbeiten und die Resonanz der Studierenden ermutigen zu weiteren Projekten in diesem Bereich.

4 Ausblick

Die Kombination aus multimedial begleiteter Einweisung und Unterstützung bei der Nutzung des Programms PhotoModeler Pro 4.0 trug wesentlich zum Gelingen der Projekte in der nur begrenzten Zeit bei. Die neue Version PhotoModeler 5.0 verfügt zusätzlich über Funktionen zur Erkennung von codierten Messmarken und zur Auswertung von Filmsequenzen. Diese Funktionalität bereitet den Weg für eine Vielzahl von zukünftigen Anwendungen. Geplant sind Projekte zur Dokumentation von Objektdeformationen sowie zur Analyse von dynamischen Vorgängen.

5 Schlussbemerkung

In den vergangenen Jahren ist die Zahl der Studierenden im Studiengang Bauingenieurwesen an der Universität Hannover von 170 Personen im Jahr 1999 auf 80 Studierende im Jahr 2003 zurückgegangen. Die hohe Personenzahl in den Vorjahren, eine Umstellung des Studienfachs Bauingenieurwesen auf ein Kurssystem mit kursbegleitenden Prüfungen und die Verlagerung

in das Wintersemester hatten dazu geführt, dass die praktischen Geräteübungen zunächst eingestellt und das Lehrangebot im Internet dargestellt wurde. Die reduzierte Personenzahl erlaubt heute jedoch wieder eine vertiefte praktische Arbeit in Gruppen mit maximal vier Personen. Auf eigenen Wunsch der Studierenden wurden im Wintersemester 2002/2003 erstmalig wieder praktische Geräteübungen mit den gängigen Vermessungsgeräten durchgeführt. Die existierenden Internetinhalte wurden jedoch auch weiterhin zum vertieften Lernen unabhängig von festen Vorlesungszeiten genutzt. Geplant ist die Erweiterung der Inhalte auf dem Gebiet „Nahbereichsphotogrammetrie für Bauingenieure“. Als wesentliches Werkzeug bei der Auswertung der photogrammetrischen Projekte wird die Auswertesoftware Photomodeler in der neuen Version 5.0 vorgesehen.

6 Literatur

- BAUING 1, 2003: Übungsinhalte im Kurs: "Vermessungskunde für Bauingenieure".
Internetseite: <http://www.ipi.uni-hannover.de/html/lehre/lehrveranstaltungen/vermbau/bauueb.html>, Zugriff am 17.6.2003.
- BAUING 2, 2003: Vorlesungsinhalte im Kurs: "Vermessungskunde für Bauingenieure".
Internetseite: <http://www.ipi.uni-hannover.de/html/lehre/lehrveranstaltungen/vermbau/bauvor.html>, Zugriff am 17.6.2003.
- EOS, 2003: Homepage der Eos Systems Inc., Vancouver, British Columbia.
www.photomodeler.com, Zugriff am 17.6.2003.
- SCHIEWE, J., 2001: Telelearning-Module für die Aus- und Weiterbildung in Fernerkundung und Photogrammetrie. Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation, Band 10, Eckhardt Seyfert (Hrsg.), S.73-80.
- WIGGENHAGEN, M., 2001A: Akzeptanz einfacher photogrammetrischer Auswertesoftware in der photogrammetrischen Ausbildung. Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation, Band 10, Eckhardt Seyfert (Hrsg.), S. 81-83.
- WIGGENHAGEN, M., 2001B: Multimediale Komponenten in der Lehre -sinnvolle Hilfsmittel oder Spielerei? Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation, Band 10, Eckhardt Seyfert (Hrsg.), S. 87-93.
- WIGGENHAGEN, M., SCHMIDT, R., 2002: Vor- und Nachteile des E-Learnings in der universitären Ausbildung. Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation, Band 11, Eckhardt Seyfert (Hrsg.), S. 41-48.

eLearning-Angebote in Geoinformatik und Fernerkundung: Mehrwert oder Mode-Erscheinung?

JOCHEN SCHIEWE¹

Zusammenfassung: Basierend auf ausgewählten Projekten aus dem deutsch-sprachigen Raum wird der Status von eLearning-Projekten zu Themen aus Geoinformatik und Fernerkundung betrachtet und bewertet. Hierbei wird einerseits der Mehrwert dieser Angebote herausgestellt, andererseits aber auch deutlich gemacht, dass die inhaltlichen, organisatorischen, didaktischen, wirtschaftlichen und technischen Komponenten unterschiedlich stark entwickelt sind und kein gleichgewichtiges Netzwerk bilden. Dies hat zur Folge, dass Nachhaltigkeit und Nutzerakzeptanz noch stark eingeschränkt sind.

1 Motivation

Die Entwicklung und Nutzung von eLearning-Angeboten ist auch im Bereich der Aus- und Weiterbildung in Geoinformatik und Fernerkundung ein aktuelles und kontrovers diskutiertes Thema. Während Befürworter Einsparpotenziale, räumliche und zeitliche Flexibilität der Lernenden sowie erweiterte didaktische Möglichkeiten propagieren, betonen Kritiker den hohen Aufwand und die Abhängigkeit aus technischer Sicht, zu seltene Nutzung sowie häufig mangelnde inhaltliche Qualität.

Ziel dieses Übersichtsartikels soll es sein, die Frage nach „Mehrwert“ oder „Mode-Erscheinung“ von eLearning-Angeboten basierend auf einer exemplarischen und systematischen Bestandsaufnahme existierender Angebote im Bereich Geoinformatik und Fernerkundung zu beantworten. Bevor diese Übersicht gegeben wird (Kapitel 3), werden zunächst generelle konzeptionelle Gesichtspunkte zur Einführung von eLearning-Angeboten behandelt (Kapitel 2). Auf dieser Grundlage werden in Kapitel 4 die inhaltlichen, organisatorischen, didaktischen und wirtschaftlichen Komponenten zusammenfassend bewertet sowie noch nicht ausgeschöpfter Potenziale diskutiert. Kapitel 5 fasst die Ergebnisse zusammen und beantwortet die im Titel gestellte Frage.

2 Einführung von eLearning-Angeboten

2.1 Terminologie

eLearning bezeichnet den Einsatz von Hard- und Software für Lehr- und Lernzwecke. Analoge Begriffe mit in der Regel gleicher Bedeutung sind computer-unterstütztes Lernen (CUL) bzw. Computer-assisted Learning (CAL), Computer-based Training (CBT) oder auch Multimedia-based Training (MBT). Zwar gibt es bereits einige Ansätze (siehe z.B. eine Übersicht bei ANIDO ET AL., 2001), doch eine allgemein akzeptierte Standardisierung der Terminologie zum eLearning existiert noch nicht.

Eine Gruppierungsmöglichkeit für eLearning-Angebote besteht bezüglich ihrer **Organisationsform** bzw. der Rolle des Dozenten – man unterscheidet Angebote, die

¹ PD Dr.-Ing. Jochen Schiewe, Forschungszentrum für Geoinformatik und Fernerkundung (FZG), Hochschule Vechta, Postfach 1553, 49364 Vechta, e-mail: jschiewe@fzg.uni-vechta.de

- die klassische *Präsenzlehre ergänzen* (z.B. digitale Skriptensammlungen, Medieneinsatz in der Präsenzlehre, integrierte Software-Schulungen),
- die *Präsenzlehre teilweise substituieren* (d.h., einzelne Module anbieten) oder zusätzliche Materialien zur Verfügung stellen (aber weiter in das Präsenzstudium eingebunden sind),
- die *Präsenzlehre vollständig substituieren*, d.h. komplette Studien- oder Ausbildungsgänge über digital bereitgestellte Materialien anbieten, sowie
- Zwischenformen in der praktischen Umsetzung (z.B. beinhalten virtuelle Studiengänge oft auch kurze verpflichtende Präsenzveranstaltungen).

Je nach Art des **Kommunikationsprozesses** zwischen Lehrer und Lernenden bzw. deren zeitlicher Trennung existieren folgende Formen:

- Beim *Teleteaching* erfolgt die (einseitige) Vermittlung des Lehrstoffes durch einen entfernten Lehrer, hierzu werden die Möglichkeiten der breitbandigen, synchronen Kommunikation (Video-Conferencing) genutzt.
- Beim *Telelearning* erfolgt ein Selbststudium anhand von bereitgestellten Lernmaterialien.
- Beim *Teletutoring* als einer zusätzlichen Form zu den zuvor genannten Angeboten, die jeweils noch keine Kommunikationsmöglichkeiten beinhalten, erfolgt die Betreuung von Lernprozessen durch einen entfernten Tutor, hierbei wird unterschieden zwischen *synchroner Kommunikation*, die die gleichzeitige Anwesenheit der Partner verlangt (Beispiele: Telefon, Chat) sowie der *asynchronen Kommunikation*, die eine zeitliche Trennung von Vermittlung, Betreuung und Lernen bedeutet (Beispiel: e-mail).

Im weiteren Verlauf erfolgt eine Einschränkung auf die – im Bereich Geoinformatik und Fernerkundung am häufigsten anzutreffende – Ausprägung von eLearning-Angeboten, die die Präsenzlehre teilweise substituieren und zum Selbststudium gedacht sind (Telelearning).

2.2 Konzeptionelle Überlegungen zur Einführung

Bei der Konzeption und Einführung computer-unterstützter Lehrangebote spielen eine Reihe eng miteinander verknüpfter Faktoren eine Rolle. In Erweiterung des "magischen Vierecks" nach KERRES (2001) fassen wir die technischen, organisatorischen, inhaltlichen, didaktischen und auch die wirtschaftlichen Aspekte sowie ihre Zusammenhänge zu einem erweiterten *Netzwerk der mediendidaktischen Innovation* zusammen (Abb. 1).

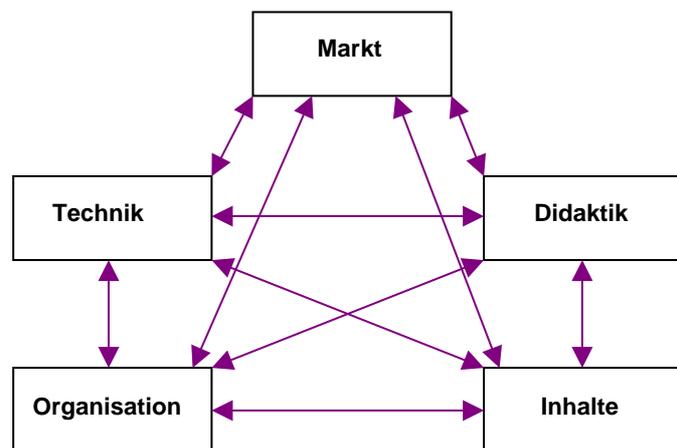


Abb. 1: Netzwerk der mediendidaktischen Innovation

Dieses Netzwerk drückt aus, dass es auch (bzw. insbesondere) bei der Entwicklung von eLearning-Angeboten notwendig ist, ein gewisses Gleichgewicht dieser Komponenten herzustellen. Es macht z.B. wenig Sinn, nur in technische Infrastruktur zu investieren, ohne dass die personellen und organisatorischen Voraussetzungen zur Nutzung und Pflege gewährleistet sind. Im weiteren Verlauf sollen schwerpunktmäßig die Komponenten Inhalte (Abschnitt 4.1), Organisation (4.2), Didaktik (4.3) und Wirtschaftlichkeit (4.4) anhand ausgewählter Beispiele (Kapitel 3) betrachtet und zusammenfassend bewertet werden.

3 Ausgewählte Projekte

Eine Übersicht über ergänzende Materialien zur Präsenzlehre bzw. Telelearning-Tutorials zu Themen der Geoinformatik und Fernerkundung geben z.B. CHRISTIANSEN (2001) oder das Portal der Arbeitsgruppe VI/1 der Internationalen Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung (ISPRS, 2003). Im Folgenden sollen stichprobenartig sechs ausgewählte aktuelle eLearning-Projekte aus dem deutsch-sprachigen Raum betrachtet werden (Tab. 1), um eine Bewertung des aktuellen Status der in Abschnitt 2.2 genannten Faktoren des Netzwerkes der mediendidaktischen Innovation zu ermöglichen. Der Faktor Technik wird hierbei nicht berücksichtigt – hier ähneln sich die meisten Angebote sehr stark (HTML-/XML-Basis).

Die ausgewählten Projekte zeichnen sich dadurch aus, dass sie einen recht großen Umfang hinsichtlich der dargestellten Inhalte und/oder der beteiligten Institutionen aufweisen. Sie werden alle aus Universitäten heraus entwickelt und sind zum großen Teil auch für Aus- und Weiterbildungszwecke außerhalb dieser Einrichtungen nutzbar. Spezifische kommerzielle Weiterbildungsangebote (wie das UNIGIS-Programm der Universität Salzburg; UNIGIS, 2003) werden hier nicht näher betrachtet.

4 Bewertung

4.1 Inhaltliche Aspekte

Aufgrund der verstärkten interdisziplinären Ausrichtung, der immer geringeren Haltbarkeitsdauer des Fachwissens sowie der Einforderung von mehr prozeduralem Wissen ist auch im Bereich der Geoinformatik das Problem der sog. *"Lehre-Schere"* – mehr Lehrstoff bei weniger Zeit zum Lehren – evident. Es muss aber festgehalten werden, dass neue eLearning-Angebote dieses Dilemma per se natürlich nicht lösen, da auch sie jeweils nur einen kleinen und begrenzten **Ausschnitt** des Lehrstoffes abdecken.

Die potenziellen Vorteile der computer-unterstützten Methoden aus inhaltlicher Sicht liegen in der schnelleren Aktualisierbarkeit und Verbreitung (z.B. gegenüber einem Lehrbuch) sowie in der Möglichkeit, kognitive Prozesse zielgerichtet abzubilden (z.B. durch Computeralgebra-systeme). Tatsächlich konzentrieren sich aber die meisten betrachteten Module auf die Vermittlung von **grundlegendem Faktenwissen**, das aber auch schon in Lehrbüchern oder in den Materialien der Dozenten vorrätig ist. Von daher ist die Motivation, auf entsprechende eLearning-Produkte umzusteigen, eher gering. Dagegen konzentriert sich das Projekt FerGI auf die Erstellung von aktuellen Spezialthemen, die von den jeweiligen Expertenteams aufbereitet werden und eine größere Mehrfachverwertung ermöglichen sollen.

Generell ist zu erwarten, dass zukünftig aufgrund der immer geringeren Haltbarkeitsdauer des Wissens sowie sich verändernder Strukturen (z.B. Übergang zum Bachelor-/Master-Studienmodell) eine häufigere Revision bzw. **Flexibilisierung** der Studieninhalte und Curricula vorgenommen werden muss. In diesem Zusammenhang können modularisierte und damit auch schnell anpassbare, austauschbare und zu entfernende Angebote – unter anderem auch eLearning-Angebote – integriert werden.

4.2 Organisatorische Aspekte

Hinsichtlich des organisatorischen Rahmen bzw. der Förderung lassen sich zwei Kategorien von eLearning-Projekten unterscheiden: Zum Einen erfolgt eine Initiierung durch umfangreiche Förderprogramme des Bundes sowie der Länder nach dem **top-down-Prinzip**. In diese

Tabelle 1: Ausgewählte eLearning-Projekte

Projekt Website Leitung	Organisatorischer Rahmen	Inhalte	Lerndialoge	Animationen etc.	Zielgruppe & Zugang	Sprache	Status	Literatur
Einführung in die Fernerkundung http://www.fpk.tu-berlin.de/cbt/fernerkundung/ TU Berlin	Mitarbeiter und Studierende des Fachgebiets Photogrammetrie und Kartographie	Einführung in Fernerkundung und digitale Bildverarbeitung	Multiple choice im Block, mit Verzweigungsempfehlungen	Animated GIFs	Studierende an der TU, offen	deutsch	vollständig, erweiterbar	König (2000)
FerGI – Fernstudienmaterialien Geoinformatik www.fzg.uni-vechta.de/fergi Uni Vechta et al.	BLK-Förderprogramm Fernstudium, Partner: 5 Hochschulen (6 Institute) Laufzeit: 36 Monate (Start: 8'2003)	ca. 20 Module zu aktuellen Spezialthemen aus GI und FE	Multiple choice und Zuordnungsaufgaben, mit Verzweigungsempfehlungen	Flash, animated GIFs	alle GIS-relevanten Studiengänge, Nutzung setzt Zugang zu Lernplattform (Lottus Notes) voraus	deutsch oder englisch	Designphase	Schiewe (2003)
GIMOLUS – GIS und Modellgestützte Lernmodule für umweltorientierte Studiengänge www.gimolus.de Uni Stuttgart et al.	BMBF-Programm „Neue Medien“ Partner: 4 Universitäten (9 Institute) Laufzeit: 27 Monate (Ende: 9'2003)	ausgewählte umweltorientierte Themen mit GIS-gestützten Modellen; spezielle GIS-Module zu Grundlagen GIS, Fernerkundung	Multiple choice mit Wahr/Falsch-Bewertung, Diskussionsforen, Referenzlösungen	Flash, Zugriff auf „virtuelle Landschaft“ (WebGIS basierend auf ESRI-Technologie)	umweltorientierte Studienrichtungen an Projekt-Unis, in Zukunft auch in beschränktem Umfang auch für Gäste nutzbar	deutsch und englisch	noch unvollständig (technische Fertigstellung zum Wintersemester 2003/04 geplant)	Müller (2003), Weippert & Fritsch (2002)
GIS-Tutor www.gis-tutor.de Greve/Stahl	ca. 30 freie Mitarbeiter aus Hochschulen (mit Review-Prozess)	alle Aspekte von GIS	keine	keine	alle GIS-relevanten Studiengänge, offener Zugang	deutsch	sehr unvollständig, seit 1998 keine Aktualisierung	
GITA – Geographical Information Technology Training Alliance www.gita.info Uni Zürich et al.	Programm „Swiss Virtual Campus“, Partner: 11 Hochschulen, 1 Business-Unternehmen Laufzeit: 36 Monate (Ende 12'2003)	punktuell Abdeckung der gesamten Bandbreite regulärer GI-Curricula, drei Levels (basic, intermediate, case studies)	Übungen, Gruppenarbeiten, versch. Frageformen	Flash, SVG	Studierende der Partnerunis (ca. 85% der akademischen GI-Ausbildung in der Schweiz) nicht offen	z. T. mehrsprachig (dt., frz., engl., it.)	unvollständig, erster Einsatz im Sommersemester 2003	Lorup (2003)
Verbundprojekt Geoinformation http://www.geoinformation.net/ Uni Bonn et al.	BMBF-Programm „Neue Medien“ Partner: 7 Universitäten Laufzeit: 30 Monate (Ende: 12'2003)	14 Lernmodule zu Kerninhalten des Querschnittsfaches Geoinformation (Basis, vertiefende Aspekte)	Multiple choice im Block mit Wahr/Falsch-Bewertung; Vergleiche mit Expertenlösungen	Flash, Filme (noch nicht implementiert)	alle GIS-relevanten Studiengänge, offener Zugang	deutsch	unvollständig (z.Zt. 6 von 14 Modulen anwählbar)	Plümer & Quadt (2002)

Kategorie fallen auch die in Kapitel 3 vorgestellten Maßnahmen GIMOLUS und das Verbundprojekt Geoinformation (jeweils im BMBF-Programm „Neue Medien“), GITTA („Swiss Virtual Campus“) und FerGI (Förderschwerpunkt „Fernstudium“ der Bund-Länder-Kommission). Mit diesen Verbundprojekten soll eine Senkung der Produktionskosten (u.a. durch die Mehrfachverwertung) sowie eine höhere Qualität (u.a. durch einen gegenseitigen peer review) erzielt werden. Als generelle Nachteile beim top-down-Prinzip sind aber anzuführen:

- Die direkte und befristete Förderung von Einzelpersonen und Instituten bzw. das Überspringen der Hochschulebene bewirkt nur eine kurzfristige, weniger aber eine nachhaltige Implementierung (siehe z.B. KERRES, 2001).
- Die Fördermaßnahmen beinhalten zumeist Investitionen in technische Infrastruktur sowie in die Herstellung von Bildungs-Software, nicht aber in organisatorisch-strategische Entwicklungen sowie ausreichende didaktische Begleitungen.
- Speziell bei den Programmen zur Herstellung von Bildungs-Software ergeben sich eine Reihe von identischen oder sich überschneidenden Entwicklungen (weniger bei der Content-Erstellung, als vielmehr bei der Generierung von Lehr-/Lernumgebungen; siehe z.B. THOMAS ET AL., 2001).
- Die Austauschbarkeit bzw. Vereinheitlichung der Module steht im Gegensatz zur gleichzeitig politisch geforderten Profilbildung jeder einzelnen Hochschule.

Auf Länderebene gibt es durchaus unterschiedliche Ansätze zur top-down-Förderung: So stellt z.B. Nordrhein-Westfalen die organisatorische Ebene in den Vordergrund der Fördermaßnahmen, während Niedersachsen im Rahmen des aktuellen Programms "ELAN" (eLearning Academic Network) zwar auch die Hochschulen und nicht mehr einzelne Lehrende als Antragsteller vorsieht, jedoch weiterhin nur technische Investitionen fördert.

Alternativ zum top-down-Ansatz gibt es die **bottom-up**-Entwicklungen wie den GIS-Tutor oder das Modul „Einführung in die Fernerkundung“, die nicht speziell finanziell gefördert werden und auf der Initiative einzelner Personen beruhen. Diese „Hobby-Variante“ kann unter günstigen personellen Voraussetzungen eine nachhaltigere Pflege und Nutzung der Module gewährleisten – hier ist aber auch das Gegenbeispiel des GIS-Tutors anzubringen, der seit 1998 nicht mehr fortgeführt wird. Generell zeichnen sich die bottom-up-Angebote durch ein weniger aufwändiges und damit weniger kostenintensives Konzept und Design aus.

Wichtig für eine nachhaltige und didaktisch fundierte Entwicklung von eLearning-Modulen ist die Unterstützung durch die mittlere, **hochschul-politische Ebene**. Hier sind spezifische Leitbild-Entwicklungen notwendig (siehe z.B. KERRES, 2001; SEILER-SCHIEDT, 2001), die an den Organisationsrahmen und die Größe der jeweiligen Hochschule angepasst sind. Solche Konzeptionen sollten z.B. durch finanzielle Anreize (z.B. interne Fördermaßnahmen) sowohl die interne Zusammenarbeit (zwischen Didaktikern, Psychologen sowie den Fachdisziplinen), als auch hochschulübergreifende Kooperationen (zur Nutzung speziellen Know-Hows sowie zur kostengünstigeren Mehrfachverwertung von Modulen) fördern.

Auf dem **kommerziellen Sektor** (z.B. durch Verlage) ist bisher wenig Initiative zur intensiven Einführung computer-unterstützter Angebote im Bereich der Geoinformatik und Fernerkundung erkennbar. Für die Zukunft ist aber zu erwarten, dass eine langsame Evolution hin zu einer stärkeren Trennung zwischen (einigen) Entwicklern (in Hochschulen sowie im kommerziellen Bereich) sowie Nutzern von eLearning-Modulen eintreten wird. Aufgrund der Tatsache, dass die Erstellung von eLearning-Angeboten im Gegensatz zu konventionellen Lehrmaterialien (noch) relativ aufwendig ist, erscheint dieser Ansatz auch effizienter zu sein.

Zusammenfassend lässt sich konstatieren, dass auch im Bereich Geoinformatik und Fernerkundung hinsichtlich der organisatorischen Einbettung von eLearning-Angeboten die vertikale Gliederung in die übergeordneten politischen (und fördernden) Institutionen sowie die ausführenden Institute bzw. Mitarbeiter keine nachhaltige und effiziente Struktur darstellt. In Kürze wird sich herausstellen, ob eLearning auch ohne top-down-Förderung existieren kann. Ferner erscheint es notwendig zu sein, mit der stärkeren Einbeziehung von Teil- und Fernstudenden einen größeren Markt anzusprechen, damit sich die relativ hohen Produktionskosten amortisieren.

4.3 Didaktische Aspekte

Die teil-virtuellen oder virtuellen Organisationsformen des eLearning ermöglichen einen erhöhten Anteil selbstbestimmten Lernens bzw. konstruktivistischer Anteile gegenüber den – gerade an Universitäten anzutreffenden – fremdbestimmten bzw. behavioristischen Strategien. Die Umsetzung dieser Ansätze kollidiert zum Einen mit strukturellen Defiziten in der didaktischen Aus- und Fortbildung von Lehrern und Dozenten, zum Anderen fehlen standardisierte Anleitungen und Beispiele für didaktisch nicht bzw. wenig ausgebildete Dozenten, die eigene Module entwickeln wollen. Als sehr hilfreich zeigt sich daher – wie bei den hier aufgeführten top-down geförderten Projekten – die Einbeziehung von professioneller **mediendidaktischer Expertise**. Ferner ist – wie z.B. im Projekt FerGI – die verstärkte Nutzung von Lern-/Lehrplattformen in Erwägung zu ziehen, die u.a. die Trennung zwischen der Erstellung der Inhalte (Content) sowie der des Designs ermöglichen.

Generell muss festgehalten werden, dass die meisten eLearning-Angebote das **Potenzial** der zusätzlichen Darstellungsformen, Kommunikationsmöglichkeiten und Lerndialoge nur teilweise ausschöpfen. Insbesondere wird die Möglichkeit einer adaptiven Wissensdiagnostik (d.h. nicht nur die Korrektur von Übungsfragen, sondern auch individuell angepasste Empfehlungen zum weiteren Vorgehen) kaum genutzt. Dagegen ist positiv anzumerken, dass der für das Selbststudium notwendige, häufigere Wechsel zwischen der Vermittlung von Faktenwissen sowie Fragen und Übungen in den meisten Fällen auch praktisch umgesetzt wird.

Die wünschenswerte Ausreizung des denkbaren didaktischen Potenzials von eLearning-Angeboten bedingt allerdings auch einen erhöhten Produktions- und Kostenaufwand. Kompromisse zwischen „didaktischer Revolution“ und Kosten werden bisher allerdings kaum diskutiert. Grundsätzlich ist zu erwarten, dass die Heterogenität der Inhalte, der Curricula sowie des Vorwissens und der Motivation der Studierenden auch zu heterogenen didaktischen Szenarien führen werden.

Einen kritischen Punkt bei dem wachsenden Angebot von eLearning-Module stellen die fehlenden **Qualitätsmaßstäbe und -beurteilungen** dar. Einerseits gehen viele eLearning-Angebote mit einer Offenlegung der Lehrmaterialien im Internet einher, was zu einem größeren Kreis von Rezipienten (und Kritikern) und somit auch zu einer Steigerung der inhaltlichen und insbesondere der didaktischen Qualität führt. Darüber hinaus muss aber auch im Bereich Geoinformatik und Fernerkundung über eine unabhängige Beurteilung der didaktischen und inhaltlichen Qualität der Materialien nachgedacht werden – hier könnte die DGPF eine zentrale Rolle spielen.

4.4 Wirtschaftliche Aspekte

Der wirtschaftliche Aspekt bei der Einführung von eLearning-Angeboten wird und kann in der Initialisierungsphase sicherlich noch in den Hintergrund gestellt werden, ist aber im Hinblick auf einen zukünftigen operationellen Einsatz von entscheidender Bedeutung. Dieser

Stellenwert wird z.B. auch durch die erstmalige Veranstaltung einer Konferenz zum Thema „eLearning an Hochschulen - Marktpotenziale und Geschäftsmodelle“ durch das Forschungsinstitut für **Bildungs- und Sozialökonomie (FiBS)** im Juli 2003 in Köln verdeutlicht.

Eine erfolgreiche wirtschaftliche Verwertung von eLearning-Angeboten bedingt zum Einen deren kostengünstige **Produktion**. In diesem Kontext sind insbesondere die Forderungen nach einfach handhabbaren Entwicklungs-Tools (z.B. Lehr-/Lernplattformen) und Kooperationen (z.B. innerhalb von Hochschulverbänden) zu unterstützen.

Hinsichtlich der **Distribution** der eLearning-Produkte ist festzuhalten, dass generell eine weitere Verschiebung vom öffentlichen hin zum privaten Anbieter zu erwarten ist (siehe auch HAEFNER, 1997). Die Kommerzialisierung in diesem Bereich wird durch weitere technische Fortschritte (z.B. sicheres Bezahlen über das Internet) noch voranschreiten. Da computerunterstützte Angebote insbesondere für den Prozess des lebenslangen Lernens eine besondere Rolle spielen, diese Marktnische aber noch nicht ausreichend besetzt ist, können und sollten sich Universitäten und Fachhochschulen hier rechtzeitig einen Anteil sichern.

5 Zusammenfassung

Die im Titel gestellte Frage „Mehrwert oder Mode-Erscheinung“ muss mit einem „sowohl, als auch“ beantwortet werden, da sich die Einführung von eLearning-Angeboten noch in einem Entwicklungsstadium befindet. Ausgewählte Beispiele, die zur Ergänzung der Präsenzlehre sowie zum Selbststudium konzipiert sind, haben gezeigt, dass im Rahmen des Netzwerkes der mediendidaktischen Innovation noch ein Ungleichgewicht herrscht, das eine breite Akzeptanz verhindert. Konkret lassen sich folgende **Kernaussagen** zum Status von eLearning-Angeboten generell, als auch speziell für den Bereich Geoinformatik und Fernerkundung, zusammenfassen:

- Der wichtigste Mehrwert der Telelearning-Module besteht in der Individualisierung von Lernweg, -tiefe, -geschwindigkeit und -ort.
- Von allen Beteiligten am Lehr-/Lernprozess besteht der Wunsch nach einer integrierten Form aus Präsenzlehre und eLearning-Komponenten.
- Die organisatorischen Voraussetzungen (auf politischer und hochschul-politischer Ebene) für eine nachhaltige Einführung bzw. Integration von computer-unterstützten Angeboten sind noch nicht gegeben.
- Hinsichtlich der didaktischen Grundsätze, die für eine aktive und selbstbestimmte anstatt einer passiven und fremdbestimmten Erfassung des Lernstoffes notwendig sind, besteht noch großer Informationsbedarf bei Entwicklern und Nutzern.
- Fehlende Qualitätsstandards für multimediale Lehre verhindern eine Vergleichbarkeit zwischen verschiedenen Angeboten.

Versucht man einen **Ausblick** auf die zukünftige Rolle von eLearning-Angeboten, kann die Hypothese aufgestellt werden, dass es verschiedene Kombinationen von Präsenz- und Fernlehre mit unterschiedlichen didaktischen Ansätzen geben wird. Trotz dieser Diversifizierung sollten diese Spezialisierungen jedoch nicht das Ziel aus den Augen verlieren, die beschriebenen Komponenten des Netzwerkes der mediendidaktischen Innovation jeweils in ein Gleichgewicht zu bringen, um tatsächlich auch qualitativ bessere sowie nachhaltige Lehrangebote hervorbringen zu können.

6 Literaturverzeichnis

- ANIDO, L. ET AL., 2001: From Theoretical Standards to Real Interopable Systems. in: Wagner, E. & Kindt, M. (Hrsg.): Virtueller Campus. Szenarien - Strategien - Studium. Waxmann-Verlag: 230-238.
- CHRISTIANSEN, T., 2001: Fernerkundungstutorials im Internet. GIS - Geo-Informationssysteme. (3): 8-12.
- HAEFNER, K., 1997: Multimedia im Jahre 2000plus - Konsequenzen für das Bildungswesen. in: Issing, L.J. & Klimsa, P. (Hrsg.): Information und Lernen mit Multimedia, 2. Aufl., Beltz Psychologie Verlags Union: 463-474.
- ISPRS, 2003: www.commission6.isprs.org/wg1/ (letzter Zugriff: 10.06.2003)
- KERRES, M., 2001: Neue Medien in der Lehre - Von der Projektförderung zur systematischen Integration. Hochschulentwicklung/-politik. (2):38-44.
- KÖNIG, G., 2000: Interactive education on the web - experiences in development and application of a computer assisted training course for remote sensing. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. 33(B6-Supplement): 14-20.
- LORUP, E.J., 2003: Lehre aus einem Guss. GeoBIT. (4): 38-40.
- MÜLLER, M., 2003: Internetplattform GIMOLUS. Übungen zu GIS und Modellen. ESRI aktuell. (1):46-47.
- PLÜMER, L. & QUADT, U., 2002: Geoinformation - Neue Medien für die Einführung eines neuen Querschnittfaches. In: 7. Münchner Fortbildungsseminar Geoinformationssysteme. TU München.
- SCHIEWE, J., 2003: Auswertung hoch auflösender und multi-sensoraler Fernerkundungsdaten - Entwicklung von Methoden und Transfer in die Lehre. Habilitationsschrift zur Erlangung der venia legendi im Fachgebiet Umweltwissenschaften (Schwerpunkt Geoinformatik) an der Hochschule Vechta. Materialien Umweltwissenschaften Vechta, Heft 18.
- SEILER-SCHIEDT, E., 2001: Die E-Learning-Strategie der Universität Zürich. in: Wagner, E. & Kindt, M. (Hrsg.): Virtueller Campus. Szenarien - Strategien - Studium. Waxmann-Verlag: 385-392.
- THOMAS, U.T. ET AL., 2001: Anytime, Anywhere - IT-gestütztes Lernen in den USA. Bericht zur Studienreise in die USA, GMD-Projektträger "Neue Medien in der Bildung".
- WEIPPERT, H. & FRITSCH, D., 2003: Development of a GIS SUPPORTED interactive "Remote Sensing" Learning Module, Journal GIS - Geoinformationssysteme 14(9), September 2002, Wichmann Verlag, Heidelberg, Germany, pp. 38-42
- UNIGIS, 2003: www.unigis.ac.at (letzter Zugriff: 10.06.2003)

Automatische V/H und Driftberechnung beim Bildflug

RASMUS DEBITSCH¹

Zusammenfassung: Das Airborne Sensor Management System (ASMS) von Z/I Imaging setzt ein Real Time Video (RTV) System zur automatischen Bestimmung von V/H und Drift während des Bildfluges ein. Das RTV benutzt Bilder einer Videokamera, um mit Hilfe von Merkmalsverfolgung die Bewegung des Bildfliegers über Grund zu bestimmen. Die ersten Einsätze des Systems zeigen, dass dies möglich ist.

1 Einleitung

Z/I Imaging führt in diesem Jahr die Digitale Mapping Camera (DMC) in den Markt ein. Das Gesamtsystem besteht aus Komponenten zur Missionsplanung, einem Airborne Sensor Management System (ASMS), dem eigentlichen DMC Kamerasystem, sowie einer Post Processing Station (PPS) zur Bereitstellung der digitalen Bilddaten für die weitere photogrammetrische Bearbeitung.

Das neue Airborne Sensor Management System (ASMS) ist ein offen gestaltetes System zur Verwaltung und Ansteuerung verschiedener flugzeuggetragener Sensoren und unterstützt den Bildflug mit analogen oder digitalen Kamerasystemen.

Eine der wesentlichen Aufgaben des Kameraoperators während des Bildfluges ist die Sicherstellung der Aufnahmequalität und der Aufzeichnung von Orientierungsparametern mit GPS und INS Systemen. Das bedeutet einerseits die Überwachung des Kamerasystems, die Einstellung der V/H -Werte zur Forward Motion Compensation (FMC) sowie die Korrektur der Flugzeugdrift als auch die Qualität der GPS/INS Bedingungen. Diese Aufgaben werden bei konventionellen Systemen vorwiegend manuell vorgenommen. Um diesen Arbeitsschritt zu automatisieren setzt das Airborne Sensor Management System eine Real Time Video (RTV) Komponente ein, um aus Videobildern den V/H Wert und den Driftwinkel des Bildfliegers zu bestimmen. Die online berechneten V/H Werte werden für die Forward Motion Compensation jeder Einzelaufnahme benutzt. Die gewonnenen Driftwinkel werden mit GPS Messungen verknüpft und für die Steuerung der stabilisierten Plattform eingesetzt.

Die Videobilder einer handelsüblichen Überwachungskamera werden vom ASMS anstatt eines Navigationsteleskops benutzt. Diese Bilder werden auf einem Bildschirm vom ASMS während des Fluges dargestellt. Der Modul RTV benutzt diese Videobilder um den V/H Wert und die Drift zu bestimmen.

Dieser Artikel beschreibt die eingesetzten Verfahren und Algorithmen und präsentiert die Ergebnisse der ersten Testflüge. In Kapitel 2 wird der Aufbau des Systems beschrieben. Kapitel 3 beschreibt die eingesetzten Algorithmen und Kapitel 4 die ersten Ergebnisse. Wie die Entwicklung weiter geht, wird in Kapitel 5 beschrieben.

¹ Rasmus Debitsch, Z/I Imaging GmbH, e-mail: r.debitsch@ziimaging.de

2 Aufbau des Systems

Die Real Time Video (RTV) Komponente ist in das Airborne Sensor Management System (ASMS) eingebunden. Die Komponenten des Systems versorgen RTV mit Daten und benutzen die Ergebnisse für Steuerungs- und Regelungsaufgaben.

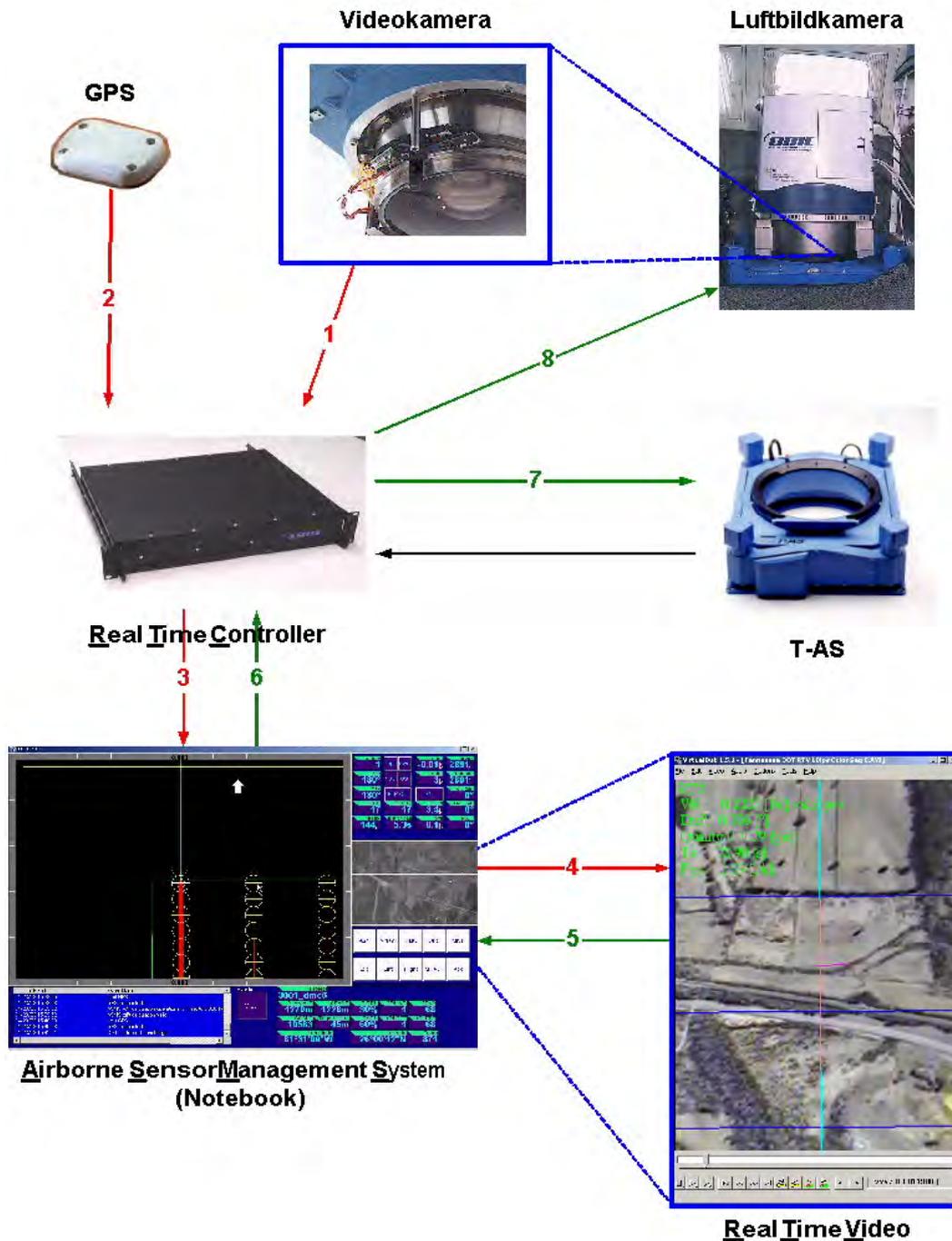


Abb. 1: Systemaufbau

Die Informationen der Videokamera werden von dem Real Time Controller (RTC) aufgenommen (1). Der RTC verarbeitet auch die Messungen des GPS-Empfängers (2). Die

Informationen werden an das ASMS, das auf einem leistungsfähigen Notebook installiert ist, weitergeleitet (3). Das ASMS sendet die Videodaten an die RTV Komponente (4). Das RTV berechnet den V/H Wert und die Drift. Die Ergebnisse werden periodisch vom ASMS abgefragt (5). Mit Hilfe des RTC (6) werden die berechneten Ergebnisse benutzt, um die T-AS (7) und die Kamera (8) zu steuern. Die T-AS positioniert die Kamera mit Hilfe des Driftwertes so, dass sie zur Flugrichtung ausgerichtet ist. Die Kamera berechnet aus dem V/H die notwendige Forward Motion Compensation (FMC) damit die Bilder frei von Bewegungsunschärfe sind.

Da die Videokamera auf der T-AS montiert ist, werden kleine Winkelbewegungen von der T-AS selber korrigiert. Die vom RTV berechneten Driftwerte sind nur „relative“ Werte. Das ASMS nutzt die aktuellen κ -Werte der T-AS, die GPS Messungen und die RTV Ergebnisse um den Stellwinkel für die T-AS zu bestimmen.

3 Verfahren

RTV geht bei der Berechnung der V/H Werte und der Drift von folgenden Voraussetzungen aus:

- Die Werte werden nur auf einem Streifen benötigt. Man kann von gleichmäßigen Flugbedingungen ausgehen.
- Die Frequenz, mit der RTV mit Bildern versorgt wird, kann vom RTV selber gesteuert werden.
- V/H und Drift ändern sich nur geringfügig!
- Die Bilder haben keine geometrischen Fehler (Verzeichnung).

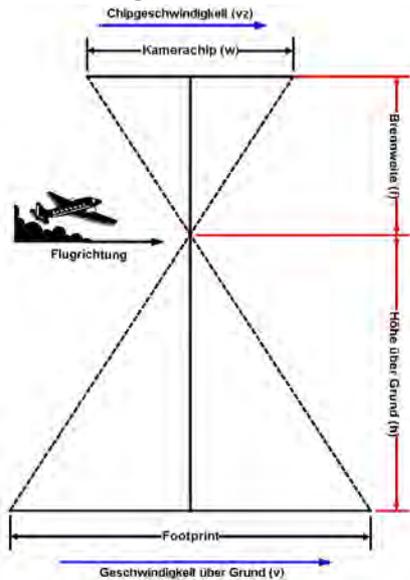
RTV wird vom ASMS mit Daten versorgt. Das sind

- die Parameter der Videokamera (Brennweite und Chipgröße) und
- die Videobilder mit Millisekunden genauem Zeitstempel.

Aus diesen Informationen berechnet RTV

- den optimalen Zeitabstand zwischen zwei Videobildern,
- die „relative“ Drift und
- den V/H Wert.

ASMS fragt alle diese Werte ab und sendet die Bilder in dem gewünschten Zeitabstand.



$$\frac{v}{h} = vz \cdot \frac{1}{f} \cdot \frac{w_s}{w_p}$$

Gl. 1: v/h und vz

mit

v	[m/s]	Geschwindigkeit über Grund
h	[m]	Höhe über Grund
f	[m]	Brennweite der Kamera
w_s	[m]	Chipgröße
w_p	[pixel]	Chipgröße
vz	[pixel/s]	Geschwindigkeit über dem Chip

Abb. 2: V/H und vz

Intern berechnet der RTV Modul die Bewegung zwischen zwei aufeinanderfolgenden Bildern in Pixel. Mit Hilfe der Brennweite und der Chipgröße werden die Pixel in den V/H Wert mit der Einheit 1/s umgerechnet. Die „relative“ Drift ist der Winkel des berechneten Bewegungsvektors zu der Flugrichtung. **Abb. 2** und Gl. 1 zeigen den Zusammenhang zwischen der Geschwindigkeit über dem Kamerachip und dem V/H Wert.

Die Gl. 2 kann man benutzen, um die erforderliche Genauigkeit der Chipgeschwindigkeit vz zu schätzen. Brennweite und Chipgröße in Meter und Pixel bleiben gleich. Wenn man die Gl. 1 umformt in

$$vz \left(\frac{v}{h} \right) = \frac{v}{h} \cdot f \cdot \frac{w_p}{w_s}$$

Gl. 2: vz und V/H

und die Werte für die DMC von Z/I Imaging aus **Tab. 1** einsetzt erhält man die Zahl der Pixel, um die bei der Forward Motion Compensation (FMC) geschoben werden muss, aus

$$FMC = vz_{DMC} \cdot t$$

Gl. 3: FMC und vz

Wenn ein Pixel FMC Genauigkeit bei einer Belichtungszeit t von 20 Millisekunden gefordert wird, muss die Chipgeschwindigkeit der Videokamera auf 1 pixel/s genau bestimmt werden.

Tab. 1: Kameraparameter

Kamera	Brennweite	Pixelgröße	$vz \left(\frac{v}{h} \right)$
DMC Panchromatische Kameras	120 mm	12 μ m	10000 V/H
DMC Multi-chromatische Kameras	25 mm	12 μ m	2000 V/H
DMC Video (JAI CV-M820)	4 mm	20 μ m (Halbe NTSC Auflösung)	200 V/H

Das RTV fordert die Bilder vom ASMS mit Frequenzen von 0.2 – 3 Hz. Bei einer Aktualisierungsrate von 3 Hz muss der Abstand zwischen zwei aufeinanderfolgenden Bildern auf 0.3 Pixel genau bestimmt werden.

Die Genauigkeit des Driftwinkels hängt von der Genauigkeit der berechneten Richtung des Bewegungsvektors ab. Wenn eine Genauigkeit von $\frac{1}{2}^\circ$ gefordert wird und der Vektor auf 0.3 Pixel genau bestimmt wird, muss der Vektor hinreichend lang sein um die Anforderungen zu erfüllen. Die Länge des Bewegungsvektors wird durch die Aktualisierungsfrequenz und den V/H bestimmt. RTV steuert diese Frequenz so, dass die Bewegung zwischen zwei Bildern immer 30 Pixel ist. Durch diese Steuerung wird die gewünschte Genauigkeit garantiert.

Die oben beschriebenen Anforderungen und Randbedingungen haben zu folgendem Verfahren geführt:

- (1) RTC nimmt die Videobilder auf und sendet sie an ASMS.
- (2) ASMS führt die Verzeichnungskorrektur durch und stellt das Video dar.
- (3) Wenn RTV ein neues Bild möchte, sendet ASMS das aktuelle Bild an RTV.
- (4) RTV extrahiert Features aus dem neuen Bild.
- (5) RTV überträgt die Features aus dem letzten Bild in das neue Bild.
- (6) Aus den Positionen der Features in dem alten und dem neuen Bild wird der Bewegungsvektor errechnet.
- (7) Aus dem Bewegungsvektor werden V/H und Drift berechnet. Die Werte werden gefiltert.

Die neue Aktualisierungsfrequenz wird berechnet.

3.1 Feature Detection und Matching

Um die Bewegung zwischen zwei Bildern zu bestimmen, werden Features von einem Bild in das nächste übertragen. Das Matching soll eine Genauigkeit von 0.3 Pixel haben. Die verfügbare Rechenzeit für Bilder der Größe 480×640 ist 0.3 Sekunden.

Die Videobilder und die Matchingaufgabe unterscheiden sich deutlich von den bisher bei Z/I bekannten Matchingaufgaben. Die Auflösung ist geringer und die Qualität der Bilder ist schlechter. Dafür sind aber nur kleine Verschiebungen ohne Drehungen vorhanden. Die Beleuchtungsverhältnisse und die Perspektive ändern sich auch nicht. Deswegen wurden Verfahren aus dem Bereich der „Computer Vision“ untersucht. Eine Übersicht über die Bestimmung des optischen Flusses in Bildern geben BEAUCHEMIN & BARRON.

Ausgewählt wurden letztendlich

- Die Kanade–Tomasi–Methode für die Merkmalsextraktion und
- Der Lucas–Kanade–Algorithmus über Pyramidenstufen für das Matching.

Features

Die Kanade–Tomasi–Methode bestimmt markante Punkte in Grauwertbildern. Die Methode wird von TOMASI & KANADE und SHI & TOMASI beschrieben. Im Prinzip werden Punkte mit möglichst großer Krümmung auf der durch die Grauwerte definierten Fläche des Bildes gesucht. Das Verfahren ist



Abb. 3: Identifizierte Features

(1) Tiefpassfilterung mit einem Gauss'schen Kern

(2) Berechnung der Ableitungen D_x und D_y der Fläche in x- und y-Richtung

(3) Berechnung der Krümmung

$$C = \begin{pmatrix} D_x^2 & D_x \cdot D_y \\ D_y \cdot D_x & D_y^2 \end{pmatrix} \text{ und des kleinsten}$$

Eigenwertes λ der Matrix C .

(4) Aussortieren der Pixel mit zu kleinem Eigenwert λ und der Pixel, in deren direkter Umgebung ein größerer Eigenwert λ existiert (Identifizieren von lokalen Maxima der Krümmung).

(5) Sortieren der verbliebenen Pixel nach λ . Aussortieren der Features, die zu dicht beieinander sind. Dieser Schritt garantiert, dass keine Featurehaufen entstehen.

In der **Abb. 3** sind die gefundenen Features durch rote Kreise markiert. Für diese Abbildung wurde der minimale Abstand zwischen zwei Features auf 40 Pixel gesetzt. Im „normalen Betrieb“ werden Bilder benutzt, die etwa halb so groß sind. Der minimale Abstand ist dann 20 Pixel.

Matching



Abb. 4: Gematchte Punkte

Das Matching wird mit dem Lucas–Kanade–Algorithmus über Pyramidenstufen durchgeführt. Eine ausführliche Beschreibung gibt BOUGUET. Der Algorithmus bestimmt den „Optical Flow“ in einem Bild. Diese Verfahren werden im Bereich der Computer Vision und der Videokompression eingesetzt. Für das Matching wird der optische Fluss nur in einer kleinen Umgebung der gewählten Features berechnet.

Die Berechnung des optischen Flusses beruht auf der Voraussetzung, dass die Intensitäten in den beiden Bildern gleich bleiben. Die Intensitäten können von wechselnder Beleuchtung und Perspektive verändert werden. Dies ist der Normalfall beim Matching in Luftbildern. Bei aufeinanderfolgenden Bildern aus Videosequenzen ist dies nicht der Fall – die Voraussetzung ist erfüllt. Diese Annahme kann in die sogenannte „Optical Flow Gleichung“ in den Intensitäten $I(x,y,t)$ eines Bildes an der Stelle (x,y)

zum Zeitpunkt t umgesetzt werden. Wenn ein Bild um den Vektor (v_x, v_y) in der Zeit v_t verschoben ist, gilt

$$I(x, y, t) = I(x + v_x, y + v_y, t + v_t)$$

Gl. 4: Konstante Intensitäten

Die rechte Seite der Gl. 4 wird in eine Taylorreihe um (v_x, v_y, v_t) entwickelt. Wenn man alle Terme höherer Ordnung weglässt, erhält man

$$I(x, y, t) = I(x, y, t) + \partial_x I(x, y, t) \cdot v_x + \partial_y I(x, y, t) \cdot v_y + \partial_t I(x, y, t) \cdot v_t$$

und daraus folgt

$$\partial_x I(x, y, t) \cdot v_x + \partial_y I(x, y, t) \cdot v_y + \partial_t I(x, y, t) \cdot v_t = 0$$

Gl. 5: Optical Flow

Die Gl. 5 ist nicht eindeutig lösbar, da sie eine Line in der Raumzeit definiert. Man muss noch zusätzliche vernünftige Bedingungen hinzufügen um eine Lösung zu erhalten. Die verschiedenen Verfahren zur Berechnung des optischen Flusses unterscheiden sich in der Wahl der geeigneten Zusatzbedingung. Lukas und Kanade führen die Annahme ein, dass die Verschiebung (v_x, v_y) lokal konstant ist. Für die Verschiebung in der Zeit wird $v_t = 1$ gesetzt.

Wenn zwei Bilder, die gegeneinander in Zeit und Raum verschoben sind, vorhanden sind, kann man versuchen die Verschiebung im Raum zu schätzen. Die Schätzung erfolgt über die Funktion

$$\sum_{x,y \in R} W^2(x, y) (\partial_x I(x, y, t) \cdot v_x + \partial_y I(x, y, t) \cdot v_y + \partial_t I(x, y, t))^2 \quad \text{Gl. 6: Zielfunktion}$$

Dabei ist R eine Umgebung des Features (x, y) und W eine Fensterfunktion, die die Pixel in der Umgebung von (x, y) zusätzlich gewichtet. Die Ableitungen in Zeit und Raum werden mit Hilfe von zwei Bildern geschätzt. Mit Hilfe eines Iterationsverfahrens wird eine Verschiebung (v_x, v_y) bestimmt, die Gl. 6 minimiert. Der Fangradius solcher Verfahren beträgt ein paar Pixel. Um auch größeren Bewegungen zu berechnen wird das Matching über Pyramidenstufen durchgeführt. Dabei wird das Ergebnis der vorherigen Stufe immer als Eingabe für die nächst feinere Stufe benutzt.

Abb. 4 zeigt die aus **Abb. 3** in das nächste Bild übertragenen Punkte in blau. Die Features des neuen Bildes sind in rot markiert.

Implementierung

Alle benötigten Funktionen werden von der Open Computer Vision (siehe INTEL CORPORATION) Bibliothek der Intel Corporation zur Verfügung gestellt. Für die Implementierung des RTV wurde diese Bibliothek benutzt.

Die Rechenzeit für Bilder mit halber NTSC-Auflösung (240×320 Pixel) ist kleiner als 0.2 Sekunden. Verbesserungen der Rechenzeit sind möglich durch

- die Wiederverwendung von Features und der Einschränkung des Suchbereiches und
- die Verwendung spezieller Hardwareoptimierter Bibliotheken.

3.2 Berechnung der Bewegung

Nach dem Matching muss aus den beiden Punktwolken, die aus den Features und den getrackten Features bestehen, ein Bewegungsvektor berechnet werden. Für die Bewegung wird ein Modell angenommen und die Parameter des Modells werden mit Hilfe einer

robusten Ausgleichung bestimmt. Mögliche Bewegungsmodelle für die Punktpaare (X_i, X_i') aus den beiden Bildern sind

- | | | | |
|-----|------------------------|---|---|
| (1) | Lineare
Bewegung | $X_i = X_i' + v$ | 2 Parameter (Verschiebung) |
| (2) | Affine Bewegung | $X_i = \begin{pmatrix} +s \cdot \cos(\alpha) & +s \cdot \sin(\alpha) \\ -s \cdot \sin(\alpha) & +s \cdot \cos(\alpha) \end{pmatrix} X_i' + v$ | 4 Parameter (Verschiebung, Winkel und Skalierung) |
| (3) | Projektive
Bewegung | $X_i = \frac{\begin{pmatrix} a_1 & a_2 \\ a_3 & a_4 \end{pmatrix} \cdot X_i' + v}{\begin{pmatrix} c_1 & c_1 \end{pmatrix} \cdot X_i' + 1}$ | 8 Parameter |

Gl. 7: Bewegungsmodelle

Alle Modelle sind linear oder lassen sich linearisieren. Die Parameter können mit einer linearen Ausgleichung bestimmt werden. Das dritte Modell entspricht einer vereinfachten relativen Orientierung. Dieses Modell wird von der aktuellen Implementierung benutzt.

Bei allen Ausgleichungen muss die Berechnung in Photokoordinaten durchgeführt werden. Vor der Berechnung werden die Punktpaare (X_i, X_i') für ein Bild der Größe $w \times h$ mit

$$\begin{aligned} x_{photo} &= x_{pixel} / w - 0.5 \\ y_{photo} &= y_{pixel} / h - 0.5 \end{aligned}$$

Gl. 8: Photokoordinaten

in Photokoordinaten umgewandelt.

Die robuste Ausgleichung wird mit einer adaptiven Gewichtsfunktion durchgeführt. Eine Beschreibung der möglichen Methoden gibt ZHENGYOU. Als Gewichtsfunktion werden Tukey's Biweights eingesetzt. Für jede einzelne Gleichung der Ausgleichsaufgabe wird das Gewicht mit Hilfe von Gl. 9 berechnet.

$$weight = \begin{cases} \left(1 - \left(\frac{error}{q \cdot mean_{error}} \right)^2 \right)^2 & |error| < q \cdot mean_{error} \\ 0 & sonst \end{cases} \quad \text{Gl. 9: Tukey's Gewichte}$$

Der Parameter für q aus Gl. 9 wird so gewählt, dass eher mehr Punkte entfernt werden. Die Ausgleichung selber wird mit Hilfe des QR-Verfahrens (siehe LAWSON & HANSON) durchgeführt.

3.3 Filterung der Ergebnisse

Die Annahme „V/H und Drift ändern sich nicht“ macht eine Filterung der berechneten Ergebnisse möglich. Durch die Filterung werden schnelle Bewegungen des Flugzeuges eliminiert, die trotz T-AS für das RTV sichtbar bleiben. Insbesondere für die Steuerung der Drift ist dies notwendig. Die schnellen Bewegungen sollen nicht als Driftwinkel an die T-AS weitergegeben werden.

Für die Filterung kommen verschiedene Typen in Frage

- (1) Median Filter

- (2) Gleitender Mittelwert
- (3) Kalman Filter
- (4) Nichtlineare Filter

Die Typen (1) und (2) führen zu einer Glättung der Kurven. Dabei werden die Zeitpunkte der Datengewinnung nicht berücksichtigt. Beide Konzepte erzeugen eine zusätzliche Phasenverschiebung der Ergebnisse. Wenn die Ergebnisse zum Regeln benutzt werden sollen, ist diese Phasenverschiebung unerwünscht.

Für die Entwicklung von Kalmanfiltern (3) wird ein Modell der erwarteten Bewegung benötigt. Da die Höhenstruktur der Oberfläche und das Verhalten des Flugzeuges nicht vorher bekannt ist, ist die Entwicklung dieser Filter eher schwierig. Erste Experimente waren nicht sehr ermutigend.

Der Typ (4) nutzt Informationen über das Verhalten der T-AS, um optimale Ergebnisse zu erzielen. Die Entwicklung dieses Filtertyps ist abgeschlossen und wartet auf die Erprobung in der Praxis.

Da die berechneten Driftwerte zur Zeit nur zur Steuerung aber nicht zur Regelung der T-AS eingesetzt werden, nutzen wir einen gleitenden Mittelwert für die Filterung der Ergebnisse.

4 Ergebnisse

Die Untersuchungen der Algorithmen wurde in 3 Phasen durchgeführt.

- (1) Mit simulierten Daten wurde geprüft, ob die gewählten Algorithmen das Problem lösen können und ob die gewünschten Rechenzeiten erreicht werden können.
- (2) Bei einigen Bildflügen wurden die Bilder der Videokamera mit Hilfe eines Recorders aufgezeichnet. Diese Videos wurden benutzt, um die Funktionsfähigkeit des Verfahrens unter Flugbedingungen zu testen.
- (3) Für einige Bildflüge liegen auch IMU-Daten vor. Diese Daten werden benutzt, um die Ergebnisse des Verfahrens zu prüfen.

4.1 Simulierte Daten

Aus Luftbildern werden Sequenzen von Bildern mit wohldefinierten Bewegungen ausgeschnitten. Diese Bildsequenzen werden an das RTV gesendet und die Soll- und Ist-Ergebnisse werden verglichen.

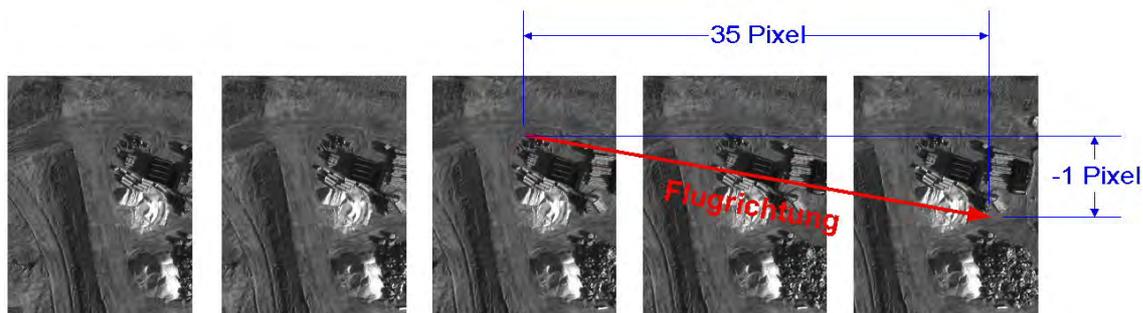


Abb. 5: Bildsequenz

Mit Hilfe der Simulationen wurde

- Das prinzipielle Konzept überprüft.
- Die Parameter der einzelnen Algorithmen bestimmt.

- Die Auswirkung von falschen Bewegungsmodellen geprüft.

Die Simulationen zeigten, dass die gewählten Verfahren unter optimalen Bedingungen perfekt arbeiten — es kommt immer das raus, was auch reingesteckt wurde.

4.2 Videos von Bildflügen

Das Gesamtsystem aus **Abb. 1** erlaubt die Aufzeichnung von Videodaten. Zwischen die Videokamera und den RTC wird ein Videorecorder angeschlossen. Nach einem Bildflug sind die Daten in Farbe und in voller Auflösung verfügbar.



Abb. 6: Bildsequenz

Die Videodaten enthalten noch die Verzeichnung der Kamera. Diese Aufzeichnungen können für Tests mit dem Gesamtsystem (Videorecorder statt Videokamera) im Labor und für den Test des RTV's allein benutzt werden. Mit Hilfe der Videodaten wurde

- Die Verzeichnungskorrektur überprüft.
- Die Steuerung der Aktualisierungsfrequenz ausgearbeitet.
- Die Funktionsfähigkeit der Verfahren unter Flugbedingungen getestet.
- Die Randbedingungen des Verfahrens bestimmt (Notwendige Bildbeschaffenheit, Qualität der Verzeichnungskorrektur, maximale V/H Werte, ...).
- Die berechneten V/H Werte mit den erwarteten V/H Werten aus der Flugplanung und den GPS-Aufzeichnungen verglichen.
- Die software-technische Integration in das ASMS gelöst.

4.3 Vergleich mit IMU Aufzeichnungen

Die **Abb. 7** zeigt einen Vergleich von V/H Werten über eine knappe Stunde, die vom RTV und einer IMU (POSAV) während eines Testfluges berechnet wurden. Die RTV Ergebnisse

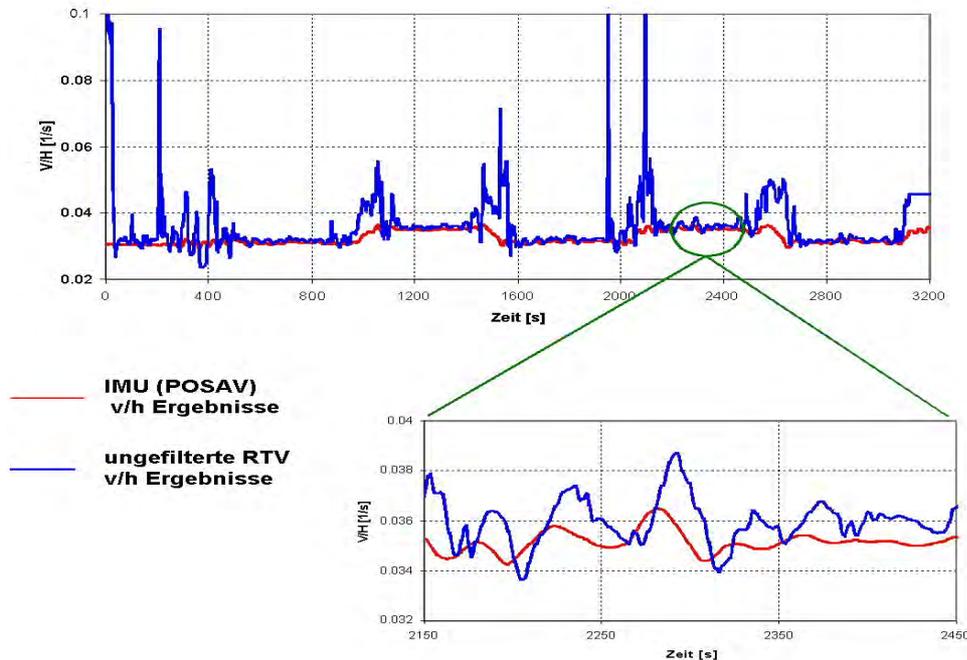


Abb. 7: RTV und IMU

wurden nicht gefiltert, um eine bessere Analyse der Ergebnisse zu ermöglichen.

Die Analyse zeigt:

- Die Ergebnisse stimmen während der ruhigen Flugphasen überein.
- Zwischen den Flugstreifen sind die „RTV-Voraussetzungen“ verletzt. Die RTV Ergebnisse werden von den starken Flugzeugbewegungen beeinflusst.
- Zwischen RTV und IMU Ergebnissen ist eine Phasenverschiebung von mehreren Sekunden. Diese Phasenverschiebung ist eine Folge notwendigen zeitlichen Abstandes zwischen zwei Bildern. Bei kleinen V/H Werten ist dieser Abstand und folglich auch die Phasenverschiebung größer.

4.4 Flugtests

Berichte der Anwendungstechniker und Analysen der Bilder zeigen, dass die Steuerung des V/H Wertes gut klappt. Die Ergebnisse liegen immer im erwarteten Bereich. Das Verfahren hat nur Probleme über gänzlich unstrukturierten Landschaften (Wasser) oder bei Höhen kleiner als 200 Meter.

Die Drift Ergebnisse können nur zur Steuerung und nicht zur Regelung der T-AS eingesetzt werden. Nachdem der Bildflieger auf der Fluglinie ist, braucht RTV wegen der Mittelung mehrere Sekunden bis der Driftwert sich stabilisiert hat. Die Phasenverschiebung führt zu einem sichtbaren Nachlaufen der eingestellten Drift. In der aktuellen ASMS-Version wird

der berechnete Driftwinkel explizit vom Anwender akzeptiert, bevor er an die T-AS gesendet wird.

5 Ausblick

Das RTV wird in der aktuellen Version des ASMS eingesetzt. Da diese Entwicklung noch neu ist, wurde für die Weitergabe der Drift and die T-AS eine halbautomatische Lösung gewählt. Die berechneten Werte mit Hilfe von Linien in den Videobildern (siehe **Abb. 1**) visualisiert. Wenn der Bediener mit den Ergebnissen zufrieden ist, werden der Driftwinkel an die T-AS gesendet.

Die Filterung der RTV Ergebnisse wird verbessert. Die nichtlinearen Filter, die das Wissen über das Verhalten der T-AS ausnutzen, werden gerade entwickelt. Dafür werden statistische Modelle für das Verhalten der V/H und Drift Werte entwickelt um dann Kalman-Filter einzusetzen.

Um die Drift-Ergebnisse zum Regeln der T-AS einzusetzen, müssen die Ergebnisse genauer werden und die Phasenverschiebung verkleinert werden. Gegenwärtig arbeiten wir an einem Verfahren, das mehr als zwei aufeinanderfolgende Bilder benutzt und die Bewegung mit Hilfe einer photogrammetrischen Blockausgleichung berechnet.

Mit Hilfe von zusätzlichen Datenquellen (GPS, IMU, Kompass, ...) kann die Genauigkeit der Drift-Werte deutlich gesteigert werden. Dies ist aber nur notwendig, wenn versucht wird, die T-AS mit diesen Werten nicht nur zu steuern, sondern zu regeln. Untersuchungen über die Machbarkeit dieser Regelung sind gegenwärtig im Gange.

Das RTV muss nicht auf dem ASMS-Laptop laufen. Eine Implementierung auf dem RTC ist sinnvoll. Da der RTC direkten Zugriff auf die Kamera hat, können in dieser Variante dann Bilder mit höherer Auflösung für die Berechnungen benutzt werden.

6 Literaturverzeichnis

- ASMS, 2002: Airborne Sensor Management System, Technische Information. – Z/I Imaging Corporation, http://www.ziimaging.de/Products/AuxiliaryContent/ASMS_deutsch.pdf.
- BEAUCHEMIN, S.S. & BARRON, J.L., 1995: The Computation of Optical Flow. – ACM Computing Surveys, **27** (3): 433-467.
- BOUGUET, J.-Y., 2000: Pyramidal Implementation of the Lucas Kanade Feature Tracker. – Intel Corporation, Microprocessor Research Labs.
- INTEL CORPORATION, 2001: Open Source Computer Vision Library, Reference Manual. – Intel Corporation, <http://www.intel.com/research/mrl/research/opencv/>.
- LAWSON, C.L. & HANSON, R.J., 1974: Solving Least Squares Problems. – Prentice-Hall.
- SHI, J. & TOMASI, C., 1994: Good Features to Track - IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 593-600.
- TOMASI, C. & KANADE, T., 1991: Detection and Tracking of Point Features. - Carnegie Mellon University Technical Report CMU-CS-91-132.
- ZHENGYOU ZHANG, 1997: Parameter Estimation Techniques: A tutorial with application to conic fitting. – Image and Vision Computing Journal, 15(1):59-76.

Untersuchungen im 1D- und 2D-Parameterraum von Punktwolken aus Flugzeuglaserscannerdaten

ALEXANDRA D. HOFMANN¹

Zusammenfassung: Über ein Segmentierungsverfahren wurden einzelne, mit hoher Wahrscheinlichkeit gebäudebeinhaltende Punktwolken aus einem Laserscannerdatensatz extrahiert. Die Auswertung ergab, dass zahlreiche Nicht-Gebäudeobjekte mit erfasst wurden. Ziel der Studie war es, diese Objekte zu reduzieren und zusätzlich weitere Informationen von Gebäuden abzuleiten. Die Untersuchungen wendeten statistische Verfahren im 1D und 2D-Parameterraum der Punktwolken an. Die Ergebnisse zeigten, dass die Parameterräume nur bedingt Aufschluss über den Inhalt einer Punktwolke geben und weitere Unterscheidungskriterien für eine eindeutige Klassifikation notwendig sind.

1 Hintergrund

Flugzeuglaserscannerdaten sind zur Zeit ein viel genutztes Medium um Informationen von Gebäuden abzuleiten. Die Erkennung von Gebäuden im Datensatz und deren Extrahierung sind erste Schritte dazu. In früheren Arbeiten (HOFMANN, MAAS & STREILEIN, 2002) wurde festgestellt, dass die auf segmentierten first-pulse Laserscannerdaten basierende Detektierung von Gebäuden ohne Hilfsmittel wie Grundrissinformationen nicht trivial ist. Es zeigte sich, dass nur unter Inkaufnahme eines hohen Anteils an Fehlern 2. Art (als Gebäude erkannte Vegetation) ein Großteil der Gebäude identifiziert werden konnte. Ziel weiterführender Arbeiten war es, diesen Anteil weitestgehend zu reduzieren.

Als Gebäude klassifizierte Segmente wurden mit den rohen Laserscannerdaten verschnitten und die jeweiligen Punktwolken extrahiert. Die Punktwolken wurden zuerst mit einfachen statistischen Parametern, wie der Standardabweichung der Höhenwerte analysiert. Weiterhin wurde ein Ansatz entwickelt, der eine in jede Punktwolke gerechnete TIN-Struktur nutzt. Für jedes der Dreiecke der TIN-Struktur wurden Eigenschaften wie Ausrichtung und Neigungsgrad ermittelt. Die Eigenschaften wurden einzeln mit statistischen Maßen wie Verteilungsformen und auch kombiniert mit einem Ansatz aus der Clusteranalyse untersucht. Mit Hilfe der Clusteranalyse wurden spezifische Unterscheidungen zu den Inhalten einer Punktwolke im 2D Parameterraum erkundet.

Vorteile und Probleme der Ansätze werden im Folgenden ausführlich diskutiert. Es werden außerdem weiterführende Analysen besprochen, die sich mit der Interpretation von Objekteigenschaften (wie die Dachart) in den analysierten Parametern befassen. In einem kurzen Ausblick soll gezeigt werden, welche Möglichkeiten die Weiterführung der Clusteranalyse im 3D-Parameterraum erwarten lässt.

2 Daten

Die verwendeten first-pulse Flugzeuglaserscannerdaten haben eine mittlere Punktdichte von ca. 1,2 m. Die Standardabweichung beträgt ca. 30 cm in x- und y- Richtung und ca. 20 cm in z. Da planimetrische Fehler der Laserscannerdaten hauptsächlich durch das GPS und INS-System des Flugzeuges hervorgerufen werden, können diese innerhalb kleiner Objekte fehler-technisch als korreliert verstanden werden. Das heißt, nur der Fehler in der z-Koordinate ist

¹ Dipl.-Ing. Alexandra D. Hofmann, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, Technische Universität Dresden, Mommsenstr. 13, 01062 Dresden, e-mail: Alexandra.Hofmann@mailbox.tu-dresden.de

zu beachten. Diese Annahme kann bei einer mittleren Objektgröße von ca. 300 m², die in dieser Studie angewendet wird, vorgenommen werden.

Die analysierten Studienggebiete sind ländliche Gebiete mit alpinem Charakter - das erste mit vereinzelter Bebauung und das zweite mit dichteren Ortskernen. Der in beiden Studienggebieten vorherrschende Gebäudetyp ist ein Einzelhaus mit Satteldach. Walmdächer und Pultdächer oder Kombinationen treten nur selten auf. Abbildung 1 zeigt Beispiele. Der Charakter der Region wird durch Felder mit Weidenbäumen und kleineren Waldflächen bestimmt.

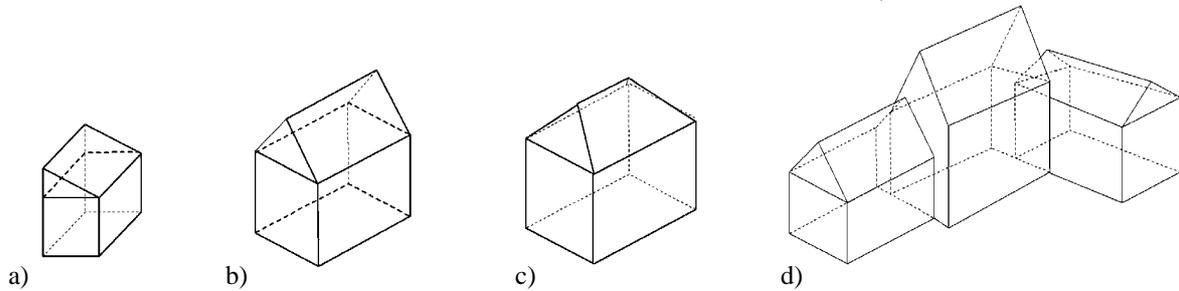


Abb. 1 a) Pultdach b) Satteldach c) Walmdach d) Kombination

Beide Areale, jedes ca. 7 km² groß, sind mit eCognition, wie in HOFMANN, MAAS & STREILEIN (2002) beschrieben, segmentiert und klassifiziert worden. All jene Segmente, die eine größere Wahrscheinlichkeit als 80% für das Vorhandensein eines Gebäudes haben, wurden mit einer Bufferzone von 3 m versehen und mit den rohen Laserscannerpunktdaten verschnitten. Die Laserscannerpunkte der Segmente wurden extrahiert und, wie im Folgenden beschrieben, analysiert. Es sei bemerkt, dass die Segmentgröße die Objektgröße um ein Vielfaches übersteigen kann. Die Untersuchungen wurden an insgesamt ca. 5500 als Gebäude klassifizierten Punktwolken durchgeführt, wovon tatsächlich nur 1310 Punktwolken Gebäude beinhalten.

3 Statistische Verteilungsanalyse im eindimensionalen Parameterraum

Erste Untersuchungen der Punktwolken wurden durch statistische Parameter, wie der Standardabweichung der Höhenwerte oder den mittleren Neigungsgrad realisiert. Es wurde angenommen, dass vor allem Punktwolken, die Waldflächen darstellen, über eine erhöhte Standardabweichung der z-Werte bestimmt und eliminiert werden könnten. Es bestand auch die Annahme, dass über den mittleren Neigungsgrad Wiesenflächen detektierbar sind, da jene i.d.R. eine flächenhafte Struktur besitzen.

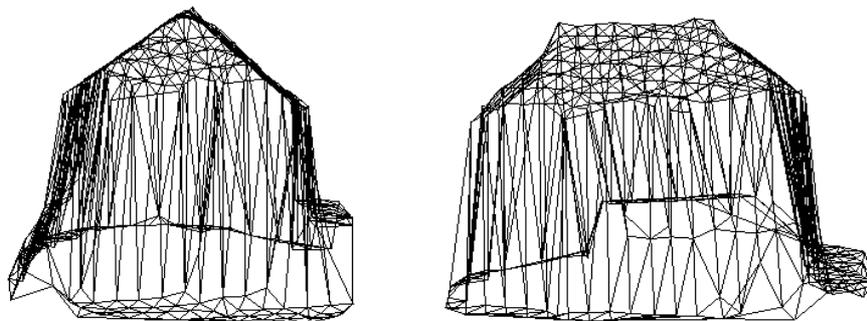


Abb. 2 Beispieldarstellung eines Gebäudes mit Walmdach durch eine TIN-Struktur

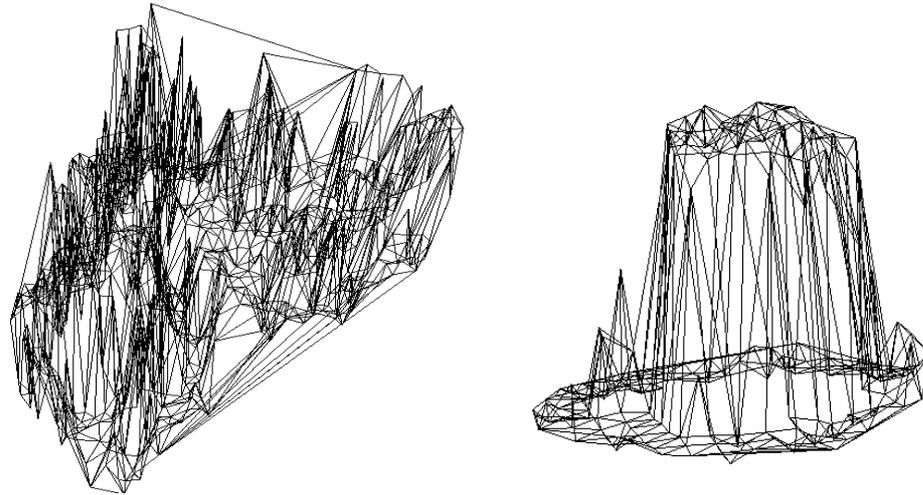


Abb. 3 Beispieldarstellung eines Waldstückes und eines Baumes durch eine TIN-Struktur

Eine Analyse dieser allgemeinen Parameter der Punktwolken brachte keine nutzbringenden Erkenntnisse. Eine detailliertere Untersuchung ist somit nötig. Hierzu wurde in jede Punktwolke mittels einer Delaunay-Triangulation mit dem Modul Triangle von SHEWCHUK (1996) eine TIN-Struktur gerechnet. Abbildung 2 zeigt eine Frontal- und Seitenansicht eines Gebäudes mit Walmdach und Abbildung 3 ein Waldstück und einen Baum, welche mit einer solchen TIN-Struktur dargestellt sind. Für jedes Dreieck sind Ausrichtung und Neigungsgrad bekannt.

3.1 1D-Parameteranalyse

Aus dem ersten Studiengebiet wurden ca. ein Drittel (800) der Objekte willkürlich ausgewählt, um daraus Parameter abzuleiten, mit denen beide Studiengebiete analysiert werden sollen. Dieses Drittel enthielt eine repräsentative Auswahl an Objekten.

Erste Versuche, Gebäudepunktwolken von Nicht-Gebäudepunktwolken zu trennen, bezogen sich auf die Verteilung der Ausrichtung der Dreiecke aus der TIN-Struktur. Im Histogramm des Gebäudes im Abbildung 4 sind gut vier Peaks zu erkennen, wobei die beiden höheren durch Dreiecke die in Dachrichtung liegen hervorgerufen worden.

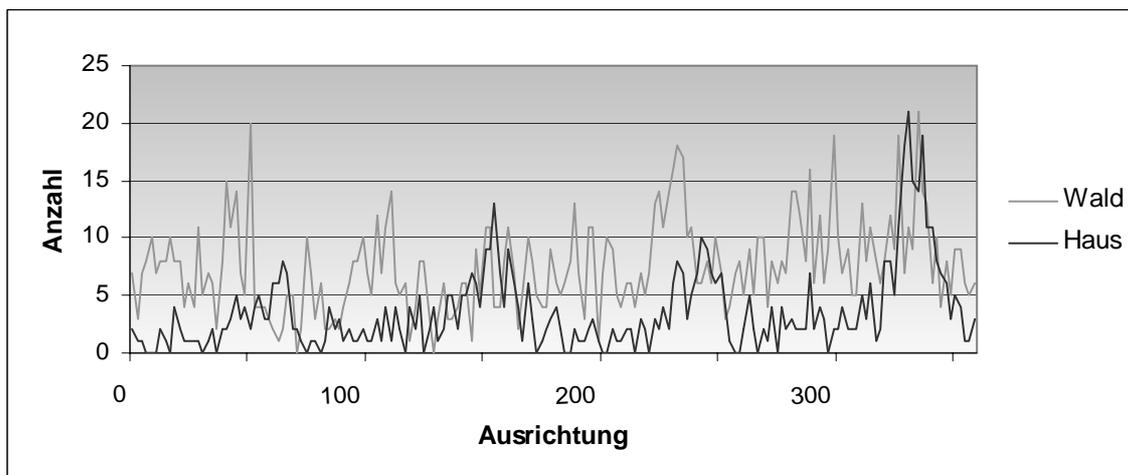


Abb. 4 Histogramm der Ausrichtungsverteilung

Die Besonderheit dieser Peaks ist, dass sie jeweils 90 Grad zueinander versetzt sind. Eine derartige Struktur lässt sich im Histogramm der Waldpunkt- wolke nur unter Umständen wiederfinden. Für eine statistische Auswertung dieser Kurven treten zu viele Mehrdeutigkeiten auf. Nachteilig ist vor allem die Schwankung der Intensität der Peaks von Gebäudepunkt- wolken in Abhängigkeit von Dachgröße, Dachart und Ausdehnung der Punkt- wolke.

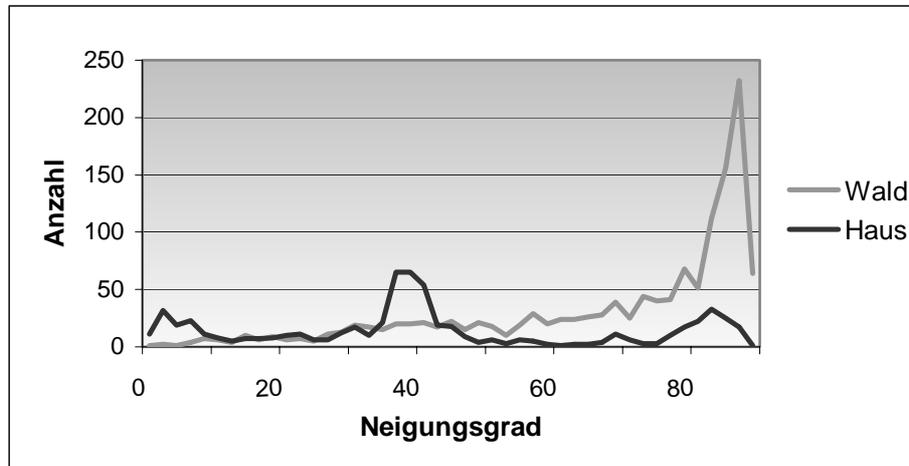


Abb. 5 Histogramm der Verteilung der Neigungsgrade

Die Verteilung der Neigungsgradwerte der Dreiecke der selben Objekte ist in Abbildung 5 illustriert. Für das Waldobjekt ist der hohe Anteil an Dreiecken größeren Neigungsgrades auffällig. Dieser Verlauf ist typisch für Waldflächen. Da für Gebäude von einer maximal zulässigen Dachneigung von 75 Grad ausgegangen werden kann, wurde für jede Punkt- wolke der Anteil an Dreiecken mit einem größeren Neigungsgrad als 76 Grad bestimmt. Aus den gesammelten Informationen konnte empirisch die Regel abgeleitet werden, dass Punkt- wolken mit mehr als 30% solcher Dreiecke Waldobjekte darstellen. Eine Regel für Wiesenflächen konnte nicht gefunden werden, da jene in diesem Parameterraum sehr häufig flachen Gebäuden ähneln.

3.2 Ergebnisse

Beide Studiengebiete wurden mit der oben beschriebenen Regel in Gebäude und Nicht- Gebäudeobjekte unterteilt. Tabelle 1 fasst die Resultate zusammen. Die Analyse stellt sich als recht effektiv dar. Das Ziel, keine Gebäudeobjekte (Fehler 1. Art) zu verwerfen, wurde insofern eingehalten, als dass die vier eliminierten Gebäude (0,35 %) sich als Objekte mit sehr schlechter Laserscannerdatenqualität herausstellten und somit vegetationsähnliche Eigenschaften aufwiesen.

Tab. 1: Anteil an eliminierten Objekten

Eliminierte Objekte	Studiengebiet 1	Studiengebiet 2
Nicht-Gebäude:	54 %	31 %
Gebäude:	0,5 %	0,2 %
Anteil an		
eliminierten Fehlern 2. Art		42,5 %
eliminierten Fehlern 1. Art		0,35 %

Das Gebäude-Nichtgebäude-Verhältnis ist für das erste Studiengebiet von 1:5 auf 1:3 und für das zweite Studiengebiet von 1:3 auf 1:2 reduziert worden. Der im ersten Studiengebiet an sich höhere Anteil an Fehlern 2. Art kann nur durch eine ungünstig verteilte Objektvielfalt erklärt werden. In diesem Falle mit einem größeren Anteil an Wiesenflächen.

4 Clusteranalyse im zweidimensionalen Parameterraum

Die Betrachtung der Abbildungen 4 und 5 impliziert, dass die Darstellung der einzelnen Dreiecke in einem Ausrichtungs-Neigungsgrad-Diagramm, wie in Abbildung 6 zu sehen ist, Aufschluss über das Objekt geben kann. Im Gebäudediagramm der Abbildung 6 sind die Clusters der beiden Längsseiten des Walmdaches eingekreist. Die Mittelpunkte der Clusters geben die ungefähre Ausrichtung und Neigung der jeweiligen Dachseite wieder. Eine solche Struktur ist nicht im Diagramm der Waldfläche zu finden. Schlussfolgernd könnte aufgrund von logischen Clusterkombinationen auf Gebäude geschlossen werden. Somit könnten in diesem 2D-Parameterraum auch weitere Fehler 2. Art eliminiert werden.

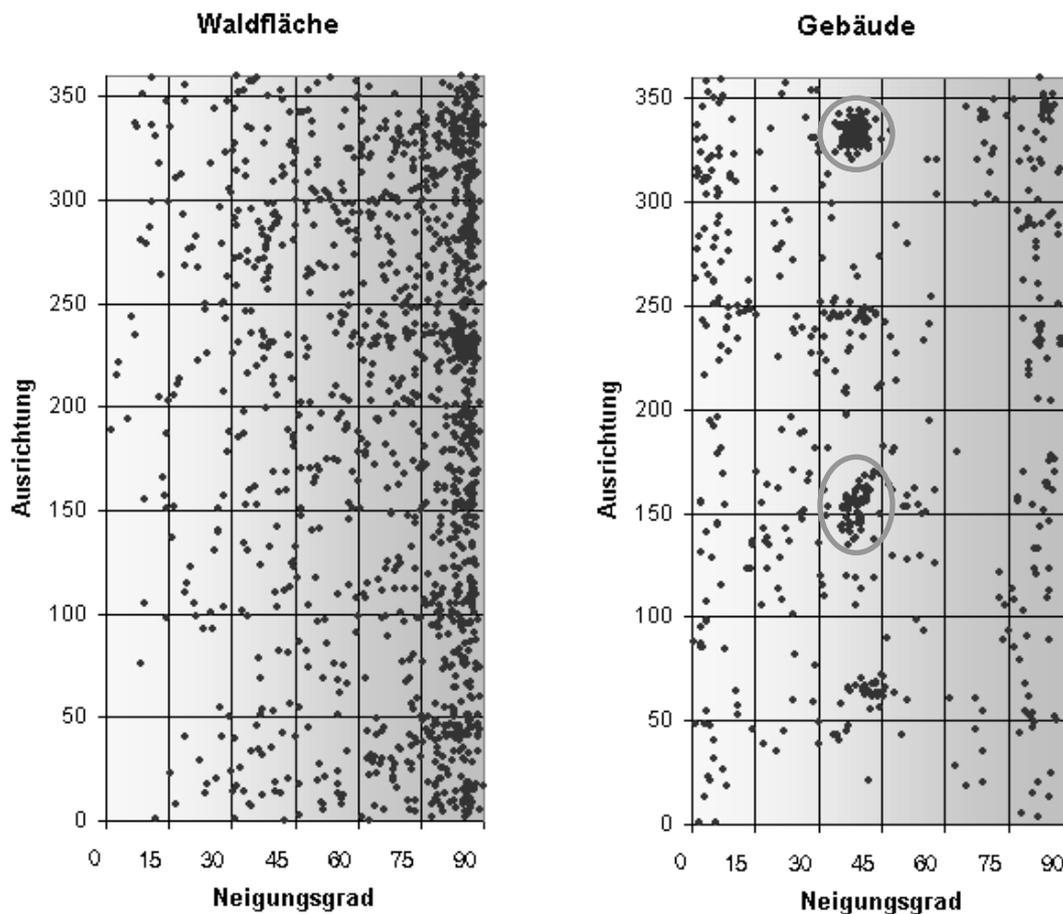


Abb. 6 2D Verteilung der Dreiecke einer Waldfläche und eines Gebäudes mit Walmdach

4.1 Clusteralgorithmus

Die Clusterung wurde durch einen agglomerativen Ansatz mit single-linkage Zuweisung realisiert. Diese begrenzt nicht die Größe der Cluster, trennt jedoch dichtere Punktgruppen von entfernter liegenden Punkten. Clusteralgorithmen, die die Kenntnis über der Anzahl der

Clusters voraussetzen, konnten nicht angewendet werden, da die Clusteranzahl vom Objekt abhängt und somit nicht bekannt ist. Eine automatische Bestimmung der Anzahl der Cluster erwies sich als nicht erfolgreich.

Damit zu jedem Punkt die direkten Nachbarn und deren Abstand zueinander bekannt sind, wurde ein Netzwerk in die Parameterpunkte gerechnet. Ein willkürlicher Startpunkt wurde unter den Parameterpunkten gewählt und sämtliche Distanzen zu den direkten Nachbarn verglichen. Lag mindestens eine der Distanzen unter einer festgestellten Grenze (maximale Distanz), wurde ein Cluster gebildet und die entsprechenden nahen Nachbarn zum Startpunkt gruppiert. Von diesem nahen Nachbarn wiederholt sich der Prozess bis kein neuer naher Nachbar mehr gefunden wurde. Der Cluster ist somit abgeschlossen und ein neuer Startpunkt kann gewählt werden. Cluster mit weniger als 13 Parameterpunkten wurden nicht als Dachcluster zugelassen, um eventuelle zufällige Clusterbildungen auszuschließen. Folglich wird eine minimale Dachfläche von 13 Dreiecken pro Dachseite festgelegt.

Als problematisch stellt sich die Ermittlung der maximalen Distanz zwischen nahen Parameterpunkten heraus. Diese wird indirekt durch den Fehler der z-Koordinate der Laserscannerdaten bestimmt. Es ist zu beachten, dass je kleiner der Neigungsgrad, desto größer der Einfluss der Fehler der Laserscannerdaten auf die Ausrichtung und Neigung der Dreiecke ist. Flächen mit einer Neigung kleiner als 7 Grad bilden keine nachvollziehbaren Cluster. Es gilt auch, dass je größer die Punktwolke, desto mehr Dreiecke und umso kleiner das Signal-Rausch-Verhältnis. Je nach Inhalt der Punktwolke konzentrieren sich die Parameterpunkte mehr oder weniger in Clusters. Die maximale Distanz bestimmt sich nun aus der Streuung der Dreiecke (aufgrund der Fehler der z-Koordinate) in Abhängigkeit vom Neigungsgrad und der Konzentration der Parameterpunkte. Um Clusters auch in Punktwolken mit mehr Rauscheffekten zu detektieren, wurde die Größe der Clusters bestimmt. Wenn mindestens 80% aller Parameterpunkte in einem Cluster gruppiert waren, wurde die Distanz schrittweise reduziert und die Clusterung erneut gestartet.

4.2 2D Parameteranalyse

Jede Punktwolke wurde der Clusteranalyse unterzogen. Gefundene Clusters wurden auf ihre Eigenschaften geprüft. Der logische Neigungsgrad einer Dachseite liegt zwischen 7 Grad und 75 Grad. Die Dachform des Gebäudes sollte aus der Anzahl und Position der Clusters abgeleitet werden. Bei z.B. einem Satteldach sollten sich zwei Clusters mit 180 Grad unterschiedlicher Ausrichtung auffinden. Wenn wenigstens ein Cluster mit einer logischen Position und Größe vorhanden war, wurde der Punktwolke ein Gebäude unterstellt. Folgender Entscheidungsbaum wurde genutzt:

- 0 Cluster: kein Gebäude
- 1 Cluster mit schlüssigem Neigungsgrad: Gebäude mit Pultdach
- 2 Cluster mit sinnvollen Neigungsgraden und ca. 180° versetzter Ausrichtung: Satteldach
- Mehr als 2 Cluster mit sinnvollen Neigungsgraden und logisch versetzten Ausrichtungen (d.h. 180° bzw. 90°): kombiniertes Dach

Aussagen, ob es sich um ein Walmdach oder zwei Satteldächer handelt, können nicht vorgenommen werden. Hierzu ist eine dritte Dimension nötig.

4.3 Ergebnisse

Die Ergebnisse der 1D-Parameteranalyse werden als Vorinformation behalten. Somit werden nur als Gebäude klassifizierte Punktwolken mit der Clusterung analysiert. Tabelle 2 zeigt, dass die Clusteranalyse den Anteil erkannter Fehler 2. Art auf 62 % erhöht. Identifizierte

Nicht-Gebäudeobjekte sind jetzt neben Waldflächen auch zahlreiche Bäume und Waldrandgebiete. Ein Hauptgrund für den abnehmenden Wirkungsgrad ist, dass teilweise Bäume als Satteldächer und Wiesen- und Waldgebiete als Pultdächer interpretiert wurden. Das heißt, es bildeten sich ein oder mehrere zufällige Clusters im 2D-Parameterraum. Dieses Problem könnte mit einem 3D-Parameterraum, in dem die Position der Dreiecke einbezogen wird, gelöst werden.

Die Clusteranalyse verwarf ca. 21 % der Gebäude. Dieses Ergebnis ist so suboptimal und wird näher untersucht. Statistische Proben ergaben, dass 34 von 100 Gebäuden mangelhaft in ihrer Datenqualität sind. Mangelhaft heißt, dass mindestens eine Dachseite im Laserscannerdatensatz zweimal mit unterschiedlichen Höhen und zum Teil unterschiedlicher Lage aufgenommen wurde. Ein Beispiel ist in MAAS (2003) gegeben. Die Parametereigenschaften der Dachseiten werden dabei verfälscht und können durch die Clusteranalyse nicht mehr erkannt werden. Ca. 50 % der verworfenen Gebäude wiesen diese Mängel in den Laserscannerdaten auf.

Tab. 2: Anteil an eliminierten Objekten

Eliminierte Objekte	Studiengebiet 1	Studiengebiet 2
Nicht-Gebäude:	70 %	55 %
Gebäude:	23 %	20 %
Anteil an eliminierten Fehlern 2. Art		62,5 %
eliminierten Fehlern 1.Art		21,5 %

Weitere Gründe für das Verwerfen von Gebäuden sind zu kleine Dachflächen oder weitere in der Punktwolke vorhandene Objekte wie Bäume, die sich wie Rauschen auswirken. Dachclusters können somit nicht eindeutig oder gar nicht identifiziert werden.

Die Richtigkeit der Dachformbestimmung ist nur teilweise mit der Dachform selbst korreliert, sondern eher mit der Größe des Daches und der Umgebung des Gebäudes. Tabelle 3 bestätigt diesen Eindruck. Die extrem geringe Trefferzahl für kombinierte Dächer ist mit der erhöhten Punktdichte bei teilweise kleinerer Dachfläche und somit einer schlechteren Trennbarkeit der einzelnen Clusters zu erklären. Die fehlende 3. Dimension ist wieder offensichtlich.

Tab. 3: Ergebnisse der Spezifikation der Dachform durch eine 2D-Clusteranalyse

Dachform	Richtig klassifiziert	Gar nicht klassifiziert
Pultdach	56 %	25 %
Satteldach	29 %	23 %
Kombination	12 %	22 %

Für die Klassifizierung der Dachart konnte nur nach Pult-, Satteldach oder Kombination unterschieden werden. In Tabelle 3 bedeutet „Richtig klassifiziert“, wenn die Zuweisung der Dachform korrekt war und „Gar nicht“, dass kein Haus entdeckt wurde; die restlichen Prozente sind mangelhafte oder falsche Zuweisungen. Tabelle 3 bestätigt auch, dass das Verwerfen eines Gebäudes nicht mit der Dachform korreliert ist.

5 Zusammenfassung

Die Ergebnisse zeigen, dass allein mit der Analyse des Neigungsgrades einer Punktwolke eine recht gute Entscheidung getroffen werden kann, ob es sich um ein Gebäudeobjekt handelt oder nicht.

Die 2D-Clusteranalyse erweist sich prinzipiell als Möglichkeit, Punktwolken differenzierter zu betrachten, ist allerdings mit der Variabilität von Objekten überfordert. Besonders die ungleichmäßige Größe des Objektfeldes wirkt sich störend auf die Analyse aus. Die Clusteranalyse ist schwer zu automatisieren, wenn starke Schwankungen in der gesuchten Objektgröße und im Rauschverhalten vorliegen. Zudem kann der wichtigste Parameter, die maximale single-linkage Entfernung, nicht auf die Anzahl der Dreiecke angepasst werden, da der Inhalt der Punktwolke nicht bekannt ist. Dieser Parameteransatz ist außerdem sehr sensibel bezüglich Schwankungen in der Laserscannerdatengenauigkeit. Je fehlerbehafteter die Daten sind, desto größer ist die Clusteraufweitung und die maximale single-linkage Entfernung wird leichter überschritten.

Generell wurde eine höhere Erfolgsquote für die Erkennung der Fehler 2. Art erwartet. Weitere Prüfungen sollen klären, inwiefern Qualitätsmängel der Laserscannerdaten Einfluss auf das Ergebnis hatten. Es ist möglich, dass die Datenqualität ebenfalls Ursache für die hohe Anzahl an Fehlern 2. Art war.

Als Fortführung zur Clusteranalyse soll die Verwendung eines 3. Parameters zur Dachformenklassifizierung diskutiert werden. Es soll gezeigt werden, dass aufgrund der Vielfalt der Objekte und Bautypen auch im 3D-Parameterraum eine klare Klassifizierung nur bedingt möglich ist (HOFMANN, MAAS & STREILEIN, 2003). Es ist angedacht 4. und evtl. 5. Parameter hinzuzunehmen. Weitere Untersuchungen werden auch zeigen, wie exakt die aus der Clusteranalyse gewonnenen Dacheigenschaften sind.

7 Danksagung

Diese Studie wurde vom Schweizer Bundesamt für Landestopographie unterstützt. Die Autorin dankt dem Schweizer Bundesamt für Landestopographie für die Bereitstellung der Flugzeuglaserscannerdaten.

8 Literaturverzeichnis

- HOFMANN, A.D., MAAS, H.-G., STREILEIN, A. 2002: Knowledge-based building detection based on laser scanner data and topographic map information - IAPRS International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing and Spatial Information Sciences Vol.34, Part 3A, pp.169-174
- HOFMANN, A.D., MAAS, H.-G., STREILEIN, A. 2003: Derivation of roof types by cluster analysis in parameter spaces of airborne laserscanner point clouds – ISPRS Commission III WG3, Workshop, 3-D reconstruction from airborne laserscanner and InSAR data, 8. - 10. October, Dresden, Germany (eingereicht)
- MAAS, H.-G. 2003: Planimetric and height accuracy of airborne laserscannerdata: User requirements and system performance - Photogrammetric Week 2003, Wichmann Verlag
- SHEWCHUK, J.R. 1996: Triangle: Engineering a 2D Quality Mesh Generator and Delaunay Triangulator - First Workshop on Applied Computational Geometry (Philadelphia, Pennsylvania), pp. 124-133, ACM

Hierarchisches Klassifikationsverfahren zur automatisierten Ableitung von Biotoptypen aus HRSC-AX-Scannerdaten

MONIKA GÄHLER, RONALD JANOWSKY¹

Zusammenfassung: Im Rahmen mehrerer Biotoptypen-Monitoring-Vorhaben nutzt das Forschungszentrum Geoinformatik und Fernerkundung der Hochschule Vechta Daten des digitalen Stereoscanners HRSC-A bzw. der neueren Kameraversion HRSC-AX. Ziel der Projekte sind die hochgenaue Erfassung und das langfristige Monitoring von Biotoptypen und ihren Veränderungen in den Uferrandbereichen mehrerer großer deutscher Flüsse infolge von Ausbaumaßnahmen.

Notwendig hierfür sind neuartige und erweiterte methodische Ansätze, die einerseits eine effektive und bearbeiterunabhängig reproduzierbare Auswertung durch automatisierte Klassifikationsverfahren garantieren. Aufgrund der hohen räumlichen Auflösung der Datenquelle bedarf es weiterhin der Modifizierung bzw. Erweiterung der klassischen Einzelpixel-orientierten Klassifikationsmethoden.

Es konnte ein hierarchisches Klassifikationsverfahren entwickelt werden, das eine indexbasierte Segmentierung und Vorklassifikation sowie eine GIS-basierte Postklassifikation beinhaltet und zu großen Teilen in automatisierte Abläufe überführt werden konnte.

1 Einleitung

Die Verfügbarkeit neuer flugzeuggetragener Sensoren, die Bilddaten höchster Auflösung liefern, verändert und erweitert die Arbeitsweisen zahlreicher Fachrichtungen. Auch die Erfassung von Biotoptypen, traditionell mit einem hohen Anteil an Geländearbeit durch Biologen und unterstützt durch den Einsatz von RMK-Aufnahmen, profitiert von diesen Entwicklungen. An die Stelle der Auswertung von CIR-Aufnahmen kann eine vollständig digital durchgeführte Prozesskette von der Aufzeichnung über das Pre-Processing und die Analyse bis hin zur Integration der Ergebnisse in ein GIS treten.

Das Forschungszentrum Geoinformatik und Fernerkundung (FZG) der Hochschule Vechta nutzt Daten des digitalen Stereoscanners HRSC-A bzw. der neueren Kameraversion HRSC-AX im Rahmen mehrerer Biotoptypen-Monitoring-Vorhaben (EHLERS ET AL., 2003). Projektziele sind die hochgenaue Erfassung und das langfristige Monitoring von Biotoptypen und ihren Veränderungen in den Uferrandbereichen der tide-beeinflussten Unterläufen von Elbe und Weser sowie deren Nebenflüsse infolge von Ausbaumaßnahmen. Hierfür sollen automatisierte Klassifikationsverfahren entwickelt werden, die eine effektive und Bearbeiterunabhängig reproduzierbare Auswertung garantieren. Die Wahl des Sensors erfolgte wegen der hohen geometrischen und radiometrischen Genauigkeiten der erzeugten Bilddaten.

Notwendig sind neuartige und erweiterte methodische Ansätze, da die herkömmliche Auswertung mittels On-Screen-Digitalisierung u.a. die Reproduzierbarkeit von Ergebnissen bei häufigerer Wiederholung nicht gewährleisten kann. Darüber hinaus können klassische computergestützte Einzelpixel-orientierte Klassifikationsverfahren für eine thematische Auswertung

¹ Dipl.-Geogr. Monika Gähler, Dipl.-Biol. Ronald Janowsky, Forschungszentrum für Geoinformatik und Fernerkundung (FZG), Hochschule Vechta, Eichendorffweg 30, 49377 Vechta, e-mail: mgaehler@fzg.uni-vechta.de, rjanowsky@fzg.uni-vechta.de

tung wegen der hohen räumlichen Auflösung der Datengrundlage nicht eingesetzt werden (BLASCHKE & STROBL, 2001) bzw. bedürfen der methodischen Erweiterung.

2 Datengrundlage

Die HRSC-A und die HRSC-AX sind digitale multispektrale Mehrzeilen-Stereoscanner für photogrammetrische und allgemeine Fernerkundungsanwendungen. Die neuere Kameraversion HRSC-AX verfügt u.a. über eine deutlich höhere Auslesefrequenz, so dass eine wesentlich höhere Flächenabdeckung bei gleicher Bodenauflösung möglich ist. Weiterhin wurden die Spektralbanden für terrestrische Aufnahmen optimiert. Detailliertere Angaben, insbesondere zur Bildprozessierung und weiteren Anwendungsmöglichkeiten, finden sich u.a. bei WEWEL ET AL., 1998, SCHOLTEN ET AL., 2002 sowie MÖLLER 2000.

In die Auswertung wird ein kompletter HRSC-Datensatz, bestehend aus dem panchromatischen Nadirkanal und vier Farbkanälen (Blau, Grün, Rot und Infrarot) sowie einem Digitalen Oberflächenmodell (DOM), eingeführt.

Für den effektiven Einsatz bei großflächigen Untersuchungsgebieten unter Beibehaltung höchstmöglicher geometrischer Genauigkeit wurden die Bilddaten mit einer Bodenpixelgröße von 25 bzw. 32 cm (Bilddaten) bzw. 1 m (DOM) aus einer Flughöhe von 3000 bis 6000 m erhoben. Als absolute Genauigkeiten sind ± 20 cm in horizontaler und ± 30 cm in vertikaler Richtung angegeben. Ein Beispiel für verschiedene Bandkombinationen des Ausschnittes „Naturschutzgebiet Heuckenlock“ ist in Abbildung 1 dargestellt.

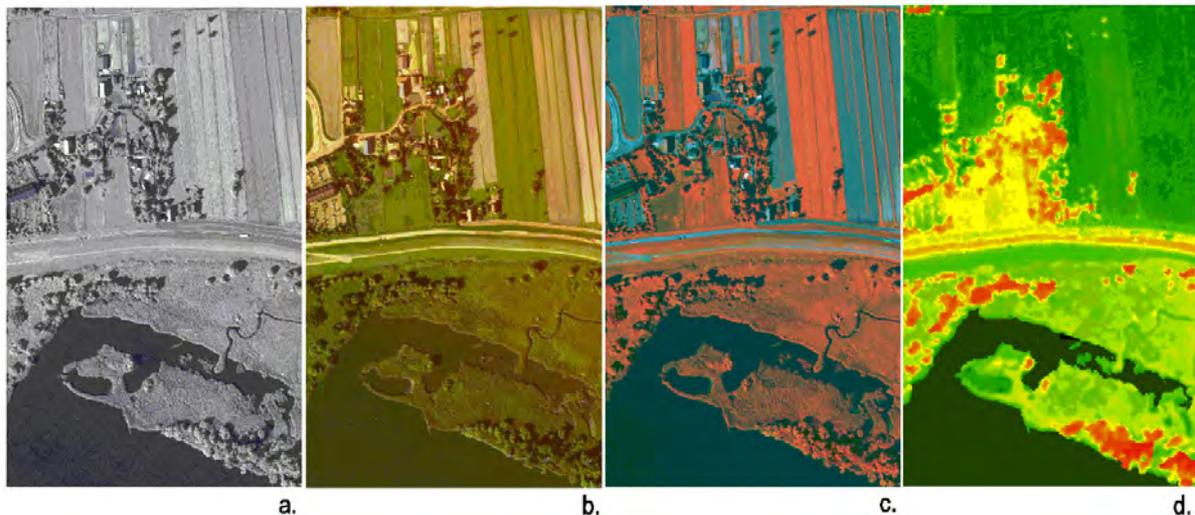


Abb. 1: Verschiedene Darstellungen der Datenprodukte der HRSC-A-Kamerasystems des Ausschnittes „Heuckenlock“
[a. panchromatisch; b. RGB; c. CIR; d. DOM in pseudocolor-Darstellung]

3 Hierarchisches Klassifikationsverfahren

Für eine automatische Biotoptypenklassifikation aus höchstauflösenden HRSC-Daten konnte eine hierarchisches GIS-basiertes Klassifikationsverfahren entwickelt werden (EHLERS ET AL., 2000). Das Verfahren basiert auf umfangreichen Klassifikationsversuchen und Fehleranalysen bzw. der Prüfung einer Anzahl von Alternativen bei der Verarbeitung (EHLERS ET

AL., 2000; GÄHLER, 2000). Die entwickelte Methode gliedert sich in vier Bearbeitungslevel (vgl. Abb. 3), die nachfolgend erläutert werden.

3.1 Level 1: Ableitung weiterer Informationen

Die HRSC-Datenprodukte, die 4 multispektralen Bilddaten und der panchromatische Nadirkanal sowie das vom FZG leicht modifizierte DOM, werden im Level 1 um einen Texturparameter (Varianzfilterung auf der Basis eines kantenverstärkten panchromatischen Bildes) und einem Vegetationsindex (NDVI) angereichert und zu einem Mehrkanalbild zusammengefügt. Insbesondere die Einbeziehung des Texturmaßes erweist sich bei der Klassifikation (siehe Abschnitt 3.3) als gut geeignet zur Unterscheidung von Biotop- und Nutzungstypen mit sehr glatter Oberfläche wie Wasser oder Mähgrünland gegenüber solchen mit sehr rauer Struktur wie Röhricht oder Gebüsch.

3.2 Level 2: Separierung von Informationen

Diese Gesamteingangsdaten können in Level 2 index- bzw. schwellwertbasiert in mehrere semantische Layer getrennt werden:

Der berechnete Vegetationsindex NDVI ermöglicht die exakte Trennung von Vegetation und Nicht-Vegetation. Mit dem errechneten Vegetationsindex als Maske wurden die aus Level 1 entstandenen Mehrbandbilder in semantisch aussagefähige Informationsschichten geteilt (Vegetation und Nicht-Vegetation). Weiterhin kann zwischen hoher und niedriger Vegetation mittels eines Höhenschwellwertes unter Verwendung des DOM differenziert werden.

Als Ergebnis der Trennung resultieren die Informationsbestände:

„Nicht-Vegetation“ (Wasser, Offenboden, geringe Vegetation)

„Niedrigwüchsige Vegetation“ und

„Hochwüchsige Vegetation“

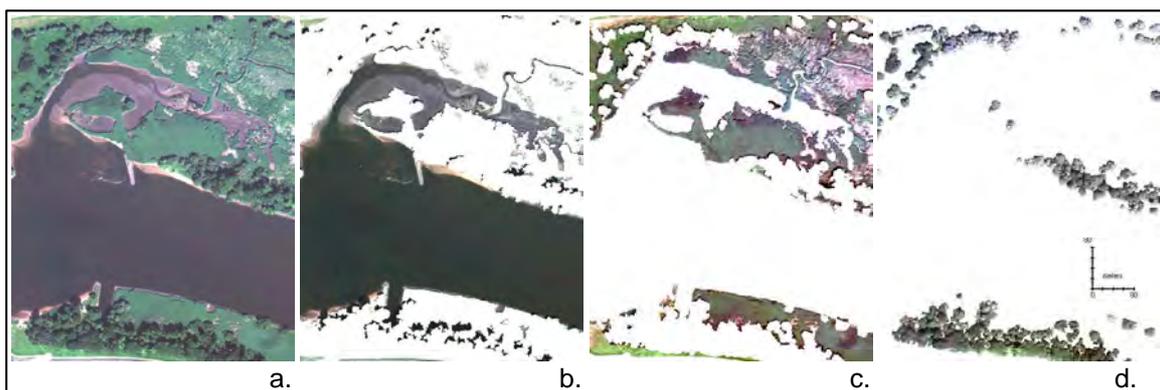


Abb. 2: Trennung der Informationen mit Hilfe des Vegetationsindex NDVI als Maske und eines Höhenschwellwertes am Beispiel des Ausschnitts Heuckenlock [a.: Gesamtbild - b: Nicht-Vegetation - c: niedere Vegetation (< 10 m) - d: hohe Vegetation]

Durch die hohe räumliche Auflösung der HRSC-AX -Daten und der pixelorientierten Arbeitsweise werden bei der Trennung der Informationen selbst kleinste Flächen identifiziert. Diese stellen allerdings nicht unbedingt Objekte der gewünschten Zielklassen dar und sind daher für die Weiterverarbeitung nicht erwünscht. Es hat sich herausgestellt, dass eine Definition von Mindestflächengrößen der unterschiedlichen semantischen Klassen vor der Trennung der Informationsschichten sehr sinnvoll ist. Hierfür wurden Mindestflächengrößen von 40m^2 für die niederen und hohen Vegetationsbestände sowie 70m^2 für die Nicht-Vegetationsbereiche festgesetzt. Die resultierenden Mehrbandbilder (vgl. Abb. 2) können dann anschließend jeweils separat und optimal angepasst im Level 3 mit Klassifikationsalgorithmen weiterverarbeitet werden.

3.3 Level 3: Bildanalyse

Für die weitere Differenzierung der Vegetation (sowohl der niederen als auch der hohen) wird im Bearbeitungslevel 3 des Klassifikationsverfahrens unter Verwendung von Trainingsgebieten überwacht klassifiziert (Maximum-Likelihood). Die Klassifikation des Informationsbestandes der Nicht-Vegetation kann hingegen z.T. mit unüberwachten Klassifikation (Isodata Clustering) vollzogen werden.

3.4 Level 4: Gis-basierte Nachbearbeitung

Level 4 beinhaltet eine GIS-basierte Nachbearbeitung zur Erstellung des endgültigen Klassifikationsergebnisses. GIS-Operationen wie z.B. „Majority-Filtering“, logische Überlagerungen sowie Nachbarschaftsbeziehungen und Mindestgrößenberechnungen der jeweiligen Biotoptypen werden dabei folgendermaßen angewandt:

Durch die hohe räumliche Auflösung der HRSC-A/HRSC-AX -Daten können bei den durchgeführten Klassifikationen selbst kleinste Flächen identifiziert werden. Es stellte sich im Laufe der Projekte heraus, dass eine Zuweisung von Mindestflächengrößen in Abhängigkeit zum Biotoptyp sinnvoll und notwendig ist. Bei der Wieder-Zusammenführung der einzelnen Klassifikationsergebnisse zu einem Ergebnislayer werden daher Mindestflächengrößen für jeden Biotoptyp definiert (z.B. geschlossene Baumbestände Mindestfläche 200m^2). Diese Überlagerung unterliegt dabei zusätzlich einer definierten Prioritätenliste.

Nach der Zusammenführung der Einzelbilder und der Definition von Mindestflächengrößen liegt ein Klassifikationsergebnis vor, das die Schattenbereiche noch nicht einbezieht. Durch die Verwendung einer Filtermatrix ist ein Auffüllen der Schattenbereiche möglich. Allerdings werden durch die Glättung die Grenzen zwischen unterschiedlichen Biotoptypen verfälscht. Um die Verzerrung der Grenzbereiche zu minimieren, wurden unter Verwendung des DOM die Schatten in zwei Klassen unterteilt: höher oder niedriger 10 m. Anschließend wurden zunächst nur die Schatten, die höher als 10 m sind, aufgefüllt. Bei der hierfür angewendeten Majority-Filterung wurde als Bedingung für die Kalkulation eines Schattenpixels (höher 10 m) nur die möglichen Biotoptypenklassen der „hohen Vegetation“ berechnet. Die Schattenbereiche, die niedriger als 10 m sind, wurden demzufolge nur unter der Bedingung „keine hohe Vegetation“ berechnet.

In einem weiteren Arbeitsschritt werden Nachbarschaftsbeziehungen zwischen den einzelnen Biotoptypen berücksichtigt. Hierbei wird beispielsweise eine Straße, die zwischen zwei Wasserobjekten liegt zu einer Brücke definiert Zur Sicherstellung der Ergebnisgüte werden die

Klassifikationsergebnisse jedoch anschließend manuellen Nachkontrollen und -bearbeitungen unterzogen, da in Einzelfällen eine Fehlklassifikation vorliegen kann und weiterhin inhaltliche Unterscheidung zwischen bestimmten Biotoptypen (z.B. Schilf-Landröhricht und tidebeeinflusstem Schilfröhricht) bei der Bildklassifikation nicht vorgenommen werden kann.

In der Abbildung 3 wird das entwickelte Verfahren der Biotoptypenklassifikation schematisch dargestellt.

Um diesen hierarchischen Klassifikationsablauf zu standardisieren und zu automatisieren wurde mit dem ERDAS IMAGINE® Modul „Spatial Modeler“ gearbeitet. Hiermit steht ein Instrument zur Verfügung, mit dessen Hilfe in einem sogenannten Modell eine bestimmte Abfolge von verschiedenen und modifizierten ERDAS IMAGINE® -Funktionen definiert werden kann.

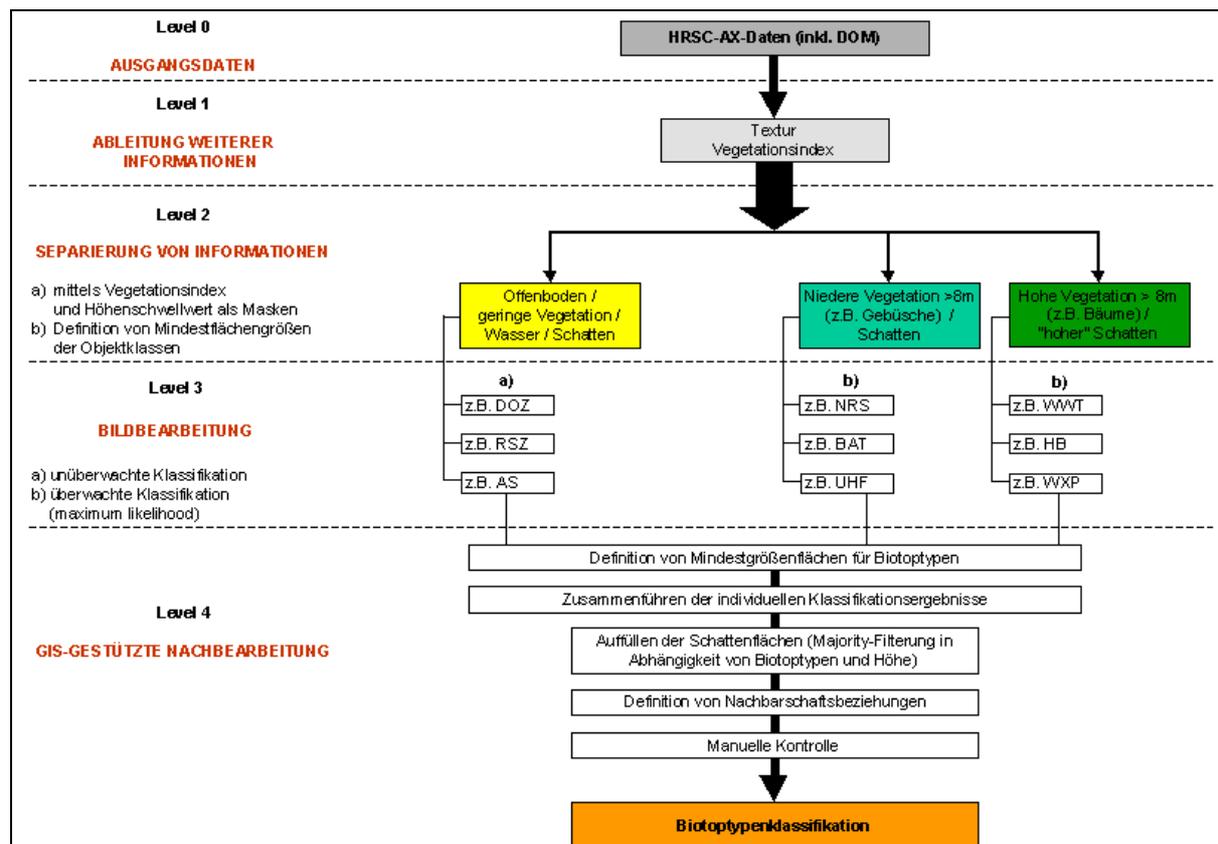


Abb. 3: Flussdiagramm des entwickelten hierarchischen Klassifikationsablaufes

4 Validation und Bewertung der Ergebnisse

Bei einem Vergleich der Ergebnisse der computergestützten Biotoptypenklassifikation mit den Resultaten der terrestrischen Geländekartierung und anschließendem On-Screen-Digitizing können Unterschiede festgestellt werden. Am Beispiel eines Ausschnittes des Testgebietes Elbinsel Heuckenlock werden die Abweichungen zwischen Kartierungs- und Klassifizierungsergebnissen im folgenden erläutert (vgl. Abb. 4).

Die Darstellung zeigt sehr deutlich, dass die Abgrenzung der Bestände mit Hilfe der computergestützten Klassifikationsmethode mit sehr hoher Lagegenauigkeit vollzogen wurde. Auch kleinere Bestände bis hin zu Einzelbäumen können lage- und flächentreu wiedergegeben

werden. Im Rahmen einer Kartierung ist dies in der Regel wegen des zu hohen Aufwandes für die Nachzeichnung jedes einzelnen Baumes gerade bei großen Untersuchungsgebieten nicht realisierbar. Daher wird die Generalisierung hier besonders deutlich bei Betrachtung der Lage und Abgrenzung der Gehölzbestände.

Folglich eignet sich aufgrund der Generalisierung bei der herkömmlichen Biotoptypenabgrenzung die vorliegende Referenzgrundlage zur Validation der Ergebnisse der Bildklassifikation nur bedingt. Angesichts dieser Problematik besitzen konventionelle Angaben zur Klassifikationsgenauigkeit nur eine sehr eingeschränkte Aussagekraft.

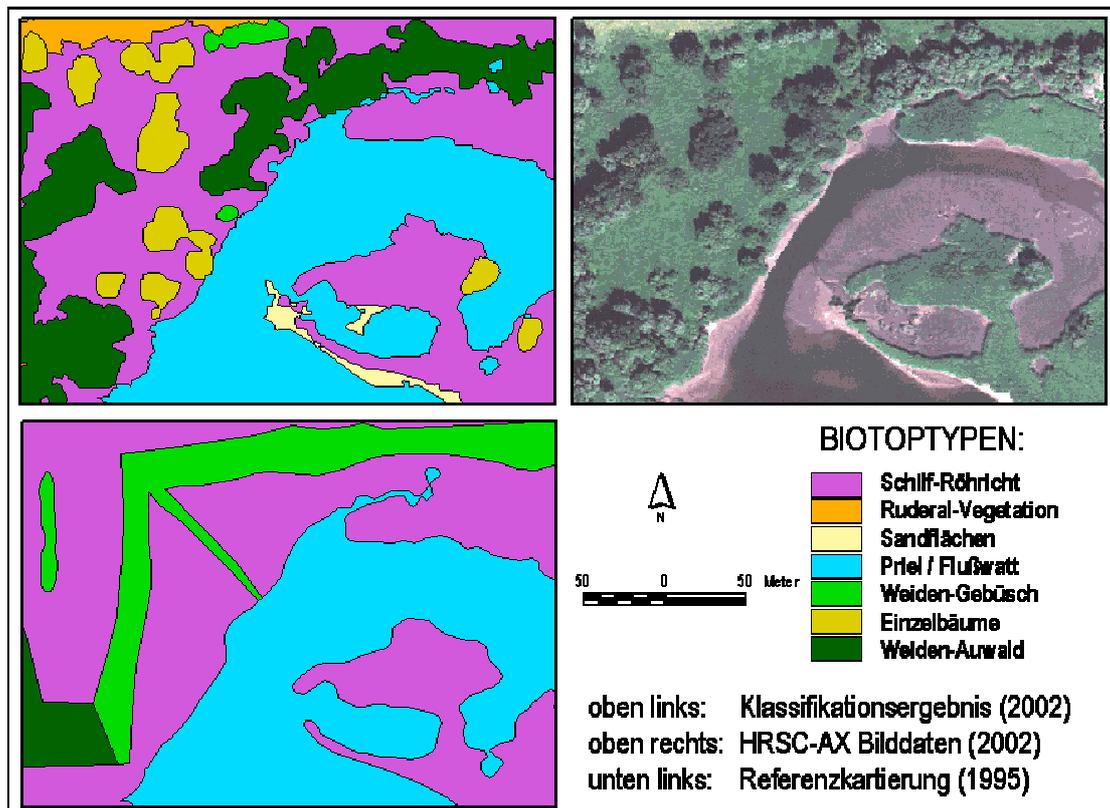


Abb. 4: Vergleich der Klassifikationsergebnisse am Beispiel des Untersuchungsgebietes Heuckenlock

Als Alternative bietet sich die Überprüfung der Biotoptypenklassifikationsergebnisse mittels Geländebegehung an. Unter Verwendung eines DGPS-Systems wurden von der in den Projekten beteiligten Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) 200 Punkte sowie die Flächenabgrenzungen der Biotoptypen auf einer Insel des Untersuchungsgebietes überprüft. Die Daten wurden in ein GIS übertragen und mit dem Klassifikationsergebnis verglichen. Hierbei konnte eine sehr hohe Übereinstimmung der Ergebnisse der computergestützten Bildklassifikation mit der Realität festgestellt werden. Die Abgrenzungen der Klassifikation wurden von der BfG als höchst zufriedenstellend beurteilt; nur im Einzelfall traten ungenaue Grenzen und Fehlzusweisungen auf.

Ziel der Projekte sind neben der hochgenauen Erfassung und auch das langfristige Monitoring von Biotoptypen und ihren Veränderungen in den Uferrandbereichen infolge von Ausbaumaßnahmen. In der Abbildung 5 wird an einem Ausschnitt die Entwicklung der Schilfbe-

stände anhand der Ergebnisse der Bildklassifikationen aus Befliegungen der Jahre 2000 und 2002 aufgezeigt.

Für das in Abbildung 5 dargestellte Gebiet waren kaum Veränderungen erwartet worden. Die Überlagerung der Ergebnisse weist hier jedoch eine Änderung von über 1000m² Schilfröhricht in zwei Jahren aus. Bei den dargestellten Veränderungen handelt es sich nicht um geometrische Artefakte der Erfassung; die Verluste konnten auch im Gelände evaluiert werden. Der Nutzen der hochgenauen Erfassung wird besonders deutlich, wenn man berücksichtigt, dass Abbildung 5 lediglich einen 200 m breiten Ausschnitt eines insgesamt ca. 80 km langen Untersuchungsgebietes darstellt.

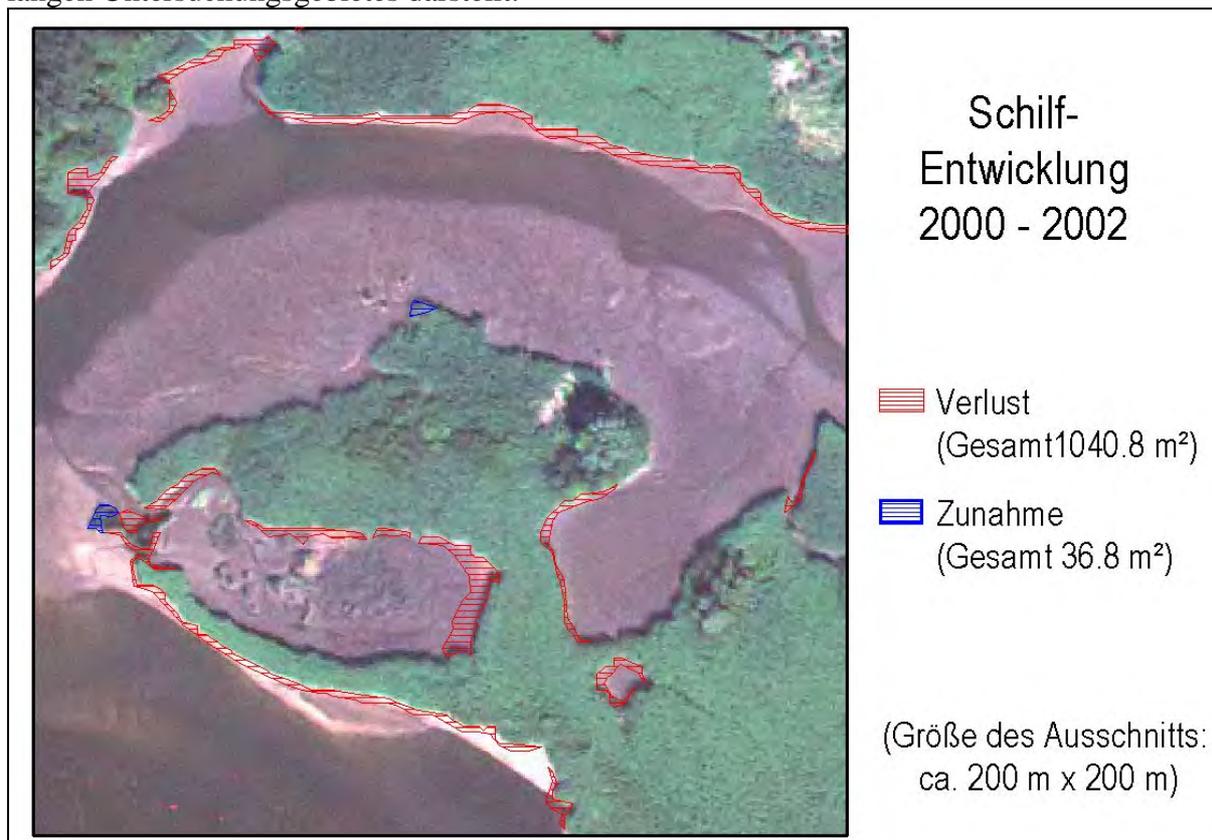


Abb. 5: Entwicklung der Schilfbestände anhand der Ergebnisse der Bildklassifikationen aus Befliegungen der Jahre 2000 und 2002 am Ausschnitt Heuckenlock

4 Schlussfolgerungen

In den vorgestellten Projekten konnte das Potenzial höchstauflösender digitaler Flugzeug-scannerdaten für ein flächenscharfes Biotoptypenmonitoring untersucht werden. Es konnte dabei festgestellt werden, dass die digitale Datenbasis in Kombination mit einer Auswertung von integrierten GIS- und Fernerkundungsmethoden die Entwicklung eines automatisierten und standardisierten Klassifikationsablaufs ermöglicht. Eine Übertragung des Verfahrens auf Bilddaten unterschiedlicher Aufnahmen (Zeitabstand zwei Jahre) konnte erfolgreich durchgeführt werden. Bei einem Vergleich der Ergebnisse der verschiedenen Aufnahmezeitpunkte kann darüber hinaus festgestellt werden, dass Entwicklungen detektiert werden können, die unter Verwendung traditioneller Auswerteverfahren höchstwahrscheinlich unerkannt bleiben würden.

5 Literaturverzeichnis

- BLASCHKE, T., STROBL, J. 2001: What's Wrong with Pixels? Some Recent Developments Interfacing Remote Sensing and GIS. - GIS – Zeitschrift für Geoinformationssysteme **6**: 12-17.
- EHLERS, M., GÄHLER, M., JANOWSKY, R., 2003: Automated Analysis of Ultra High Resolution Remote Sensing Data for Biotope Type Mapping: New Possibilities and Challenges. - ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, **37**, 315-326.
- EHLERS, M., MÖLLER, M., JANOWSKY, R., GÄHLER, M. 2000: Entwicklung einer Methode zur automatisierten Biotoptypenerfassung auf der Grundlage von HRSC-A-Scannerdaten. Projektabschlussbericht.
- GÄHLER, M. 2000: GIS-basierte Biotoptypenklassifikation auf Grundlage von multispektralen HRSC-A-Scannerdaten - Untersuchung der Einsatzmöglichkeiten am Beispiel der Elbinsel Pagensand. Diplomarbeit, Universität Osnabrück.
- MÖLLER, M. 2000: New Applications of Very High Resolution Digital Airborne Scanner Data. - IAPRS Vol. XXXIII, B4/2, Comm. IV. Amsterdam, S. 663-669.
- WEWEL, F., SCHOLTEN, F., NEUKUM, G., ALBERTZ, J. 1998: Digitale Luftbildaufnahme mit der HRSC - Ein Schritt in die Zukunft der Photogrammetrie. - Photogrammetrie-Fernerkundung-Geoinformation (PFG), **6**, S. 337-348.
- SCHOLTEN, F., GWINNER, K., WEWEL, F., 2002: Angewandte digitale Photogrammetrie mit der HRSC. - Photogrammetrie-Fernerkundung-Geoinformation (PFG), **5**, S. 317-332.

Objekterkennung und Modellierung zellulärer Strukturen aus mikroskopischen Bildern

TANJA STECKLING¹, HARTMUT KLÖTZER¹, TIM SUTHAU¹, STEPHANIE WÄLTER²,
ERICH WANKER² & OLAF HELLWICH¹

Zusammenfassung: Die vorliegende Arbeit hat die automatische Erkennung von Proteinen in Konfokalmikroskopaufnahmen zum Thema. Hierbei wird die ein Protein charakterisierende Verteilung innerhalb einer Zelle mit Hilfe einer geeigneten Parametrisierung untersucht. Da Proteine aufgrund ihrer Funktion und Struktur in speziellen Zellkomponenten auftreten, können sie anhand ihrer räumlich strukturierten Verteilung eindeutig identifiziert werden. Bisherige Auswertungen sind nur manuell durchführbar und basieren somit auf individuellen Erfahrungswerten. Ziel dieses Forschungsvorhabens ist die Entwicklung eines automatisierten Verfahrens, mit dem es möglich ist, Proteine mit Klassifizierungsverfahren aus der Fernerkundung zu klassifizieren. Es konnte gezeigt werden, dass Bildanalysealgorithmen sowohl bekannte Proteine erkennen, als auch unbekannte Proteine charakterisieren, sofern sie eine individuelle Proteinverteilung in der Zelle aufweisen.

1 Einleitung

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der automatischen Erkennung von Proteinen in Konfokalmikroskopaufnahmen. Hierbei wird die ein Protein charakterisierende Proteinverteilung innerhalb einer Zelle mit Hilfe einer geeigneten Parametrisierung untersucht. Da Proteine aufgrund ihrer Funktion und Struktur in speziellen Zellkomponenten auftreten, können sie anhand ihrer räumlich strukturierten Verteilung eindeutig identifiziert werden. Da bisherige Auswertungen nur manuell durchführbar sind und somit auf individuellen Erfahrungswerten basieren, ist ein Ziel dieses Forschungsvorhabens die Entwicklung eines automatisierten Verfahrens, mit dem es möglich ist, Proteine zu klassifizieren. Es konnte gezeigt werden, dass Bildanalysealgorithmen sowohl bekannte Proteine erkennen, als auch unbekannte Proteine charakterisieren, sofern sie eine individuelle Proteinverteilung in der Zelle aufweisen. Grundlegend hierfür ist ein fester Bezugspunkt innerhalb der Zelle, der eine Vergleichbarkeit der einzelnen Proteinaufnahmen ermöglicht. Der Ansatz beginnt mit der Lokalisierung des Zellkerns, mit dem es möglich ist, die Lage der Proteinstrukturen zu differenzieren. Die Definition weiterer markanter Zellkomponenten führt zu einem Zellmodell. Dieses erzeugte Modell ermöglicht es, die vom Protein markierten Zellkomponenten eindeutig zu analysieren. Mit Hilfe von Klassifizierungsverfahren aus der Fernerkundung wurden bereits stabile Ergebnisse erzielt.

Mittels Konfokalmikroskopie konnten geeignete Basisdaten gewonnen werden, wobei die zunächst ausgewählten Proteine eindeutige Lokalisationen aufweisen. Mit Hilfe dieser Aufnahmen gelang eine geeignete systematische Parametrisierung, die Grundlage für die Klassifizierung ist.

Diese funktionelle Charakterisierung von Proteinen könnte in Zukunft helfen, zunehmend von der Behandlung von Krankheitssymptomen zu der Beseitigung von Krankheitsursachen zu gelangen.

2 Modellierung und Aufnahme

2.1 Zellaufbau und Objektdefinitionen

Betrachtet man eine tierische Zelle unter einem Mikroskop, stellt man fest, dass das Cytoplasma groß genug ist, um verschiedene Zellorganellen voneinander unterscheiden zu können. Der Aufbau einer tierischen Zelle mit den unterschiedlichen Zellkomponenten (Organellen) ist in Abbildung 1 dargestellt.

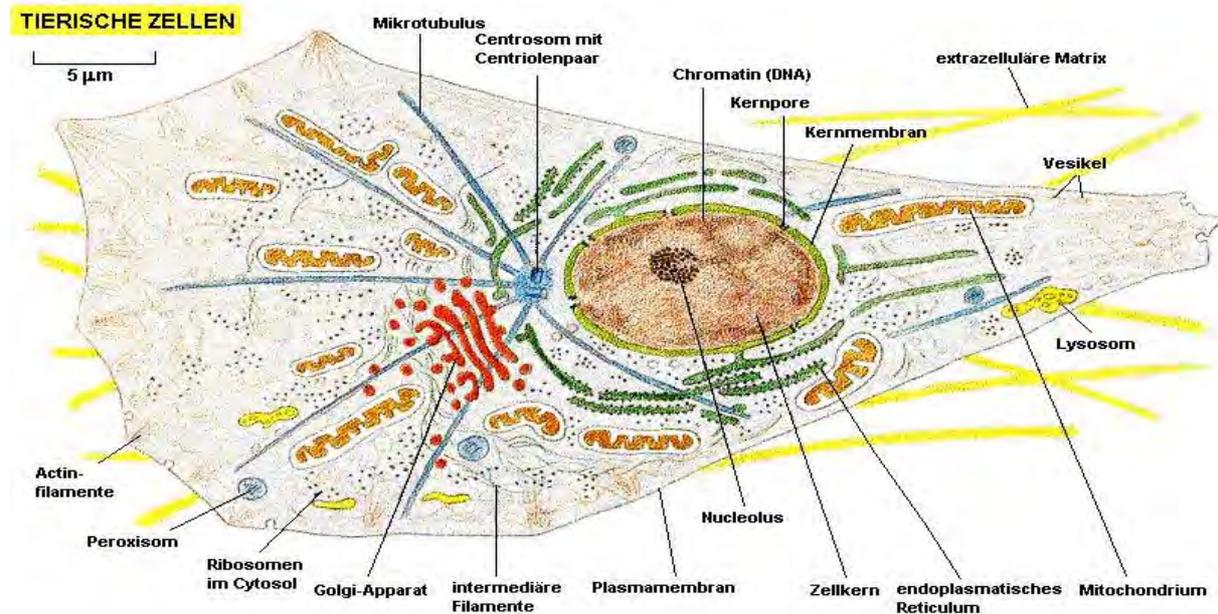


Abb. 1: Schematischer Aufbau einer tierischen Zelle [ALBERTS et al; 2001]

Spezielle Charakteristika ermöglichen es, die Organellen zu unterscheiden. Hierzu gehören nicht nur die Größe und die Form, sondern auch die Lage innerhalb der Zelle. Die Vielzahl der Funktionen, die Proteinen zuzuordnen sind, ist unter anderem eine Folge der ungeheuren Vielfalt verschiedener dreidimensionaler Formen, die sie haben können. Je nach Funktion treten die einzelnen Proteine an unterschiedlichen Orten in der Zelle auf. So ist bereits bekannt, dass z.B. einige Proteine insbesondere im Golgi-Apparat angesiedelt sind, wohingegen andere überwiegend im Zellkern vorkommen. Mit Hilfe der Immunfluoreszenzmethode ist es möglich, Bilder zu erzeugen, die eine Proteinverteilung wiedergeben und somit auch optische Analysen ermöglichen. Bei der bisherigen manuellen Auswertung von Proteinaufnahmen sind die Zellkomponenten identifiziert worden, die von der Färbung betroffen waren.

Die spezifischen Eigenschaften der einzelnen Organellen werden in der Tabelle 1 zusammengefasst. Ausgehend von dieser Aufstellung konzentrierte man sich bei der Definition von Merkmalen nicht in erster Linie auf die im Bild erkannten Organellen, sondern versuchte möglichst einfache Strukturunterschiede zu definieren. Zum Beispiel wurde das Protein Vimentin in eine fadenartige Kategorie eingeordnet, im Gegensatz dazu fiel das Protein Huntingtin (4C8) in die Kategorie punktförmige Strukturen im Außenraum. Andere Proteine besitzen kaum eine Außenraumfärbung, wie z.B. HSP70 oder Huntingtin (HD1), deren Unterscheidung jedoch durch den Zellkern möglich ist. Huntingtin (HD1) färbt den Zellkern recht intensiv, was von HSP70 nicht behauptet werden kann. Diese Vorgehensweise bei der Merkmalsdefinition schien zu Beginn relativ günstig und im ersten Schritt auch praktisch umsetzbar zu sein, genügt aber nach den späteren Erkenntnissen nicht mehr, um die Organellen eindeutig zu beschreiben [ALBERTS et al; 2001].

Zellorganelle	Merkmale
Zellkern/Nucleus	rund, oval, nierenförmig begrenzt von der Kernmembran
Nucleolus	ein oder mehrere Organellen in dem Nucleus meist rund oder oval; gleichmäßig geformt
Cytoplasma	flächige Struktur in der gesamten Zelle
Golgi-Apparat	unregelmäßige Struktur in der Nähe der Kernmembran fleckiger Charakter liegt in der Nähe des Centrosoms stellt im Zellbereich eine deutliche Intensität dar bei nierenförmigen Zellkernen meist in der Einbuchtung
Mitochondrien	wurmartige Form stellen z.T. dicke Fäden dar im gesamten Cytoplasma verteilt
Microtubuli	dünne, fadenartige Struktur liegen im gesamten Cytoplasma vor Konzentration nimmt zum Centrosom zu
Endoplasmatisches Reticulum	kammerförmige Struktur liegt um den Zellkern herum
Peroxisomen	punktförmige Struktur gleichmäßig im gesamten Cytoplasma verteilt
Fokal Adhesion	fleckenförmige Strukturen an der Plasmamembran meistens verbunden mit Microtubuli
Plasmamembran	Umrißlinie bei konfokalen Aufnahmen exakte Begrenzung der Zelle
Centrosom	punktförmige Struktur liegt direkt am Zellkern bildet das Zentrum der Microtubuli-Fäden bei nierenförmigen Zellkernen meist in der Einbuchtung

Tab. 1: Merkmale für die einzelnen Organellen

2.2 Konfokale Immunfluoreszenzmikroskopie

Um Zellen überhaupt betrachten zu können, benötigt man ein Mikroskop. Die Erfindung des Mikroskops im 17. Jahrhundert ermöglichte zum ersten Mal die Beobachtung von Zellen und noch ein paar hundert Jahre später verdankte man alles, was über Zellen bekannt war, diesem einfachen Gerät. Lichtmikroskope gehören nach wie vor zur Grundausrüstung der Zellbiologen [ALBERTS et al; 2001].

Mit dem konfokalen Mikroskop (Confocal Laser Scanning Microscope, CLSM), schematisch angedeutet in Abbildung 2, ist die Vermessung räumlicher Strukturen in der z-Achse mit hoher Auflösung möglich. Der Laser ist die Lichtquelle und beleuchtet ausschließlich Punkte in der Brennebene. Dies wird dadurch erreicht, dass ein Laserstrahl über die Bildebene tastet, die über die Mikroskopoptik auf die Brennebene fokussiert ist. Dabei ist lediglich ein dünner Streifen nahe der Brennebene hell beleuchtet. Außerhalb dieses Streifens fällt die Lichtintensität mit dem Quadrat der Entfernung von der Brennebene ab. So werden unscharfe Objekte außerhalb der Brennebene unterdrückt [JÄHNE; 2002].

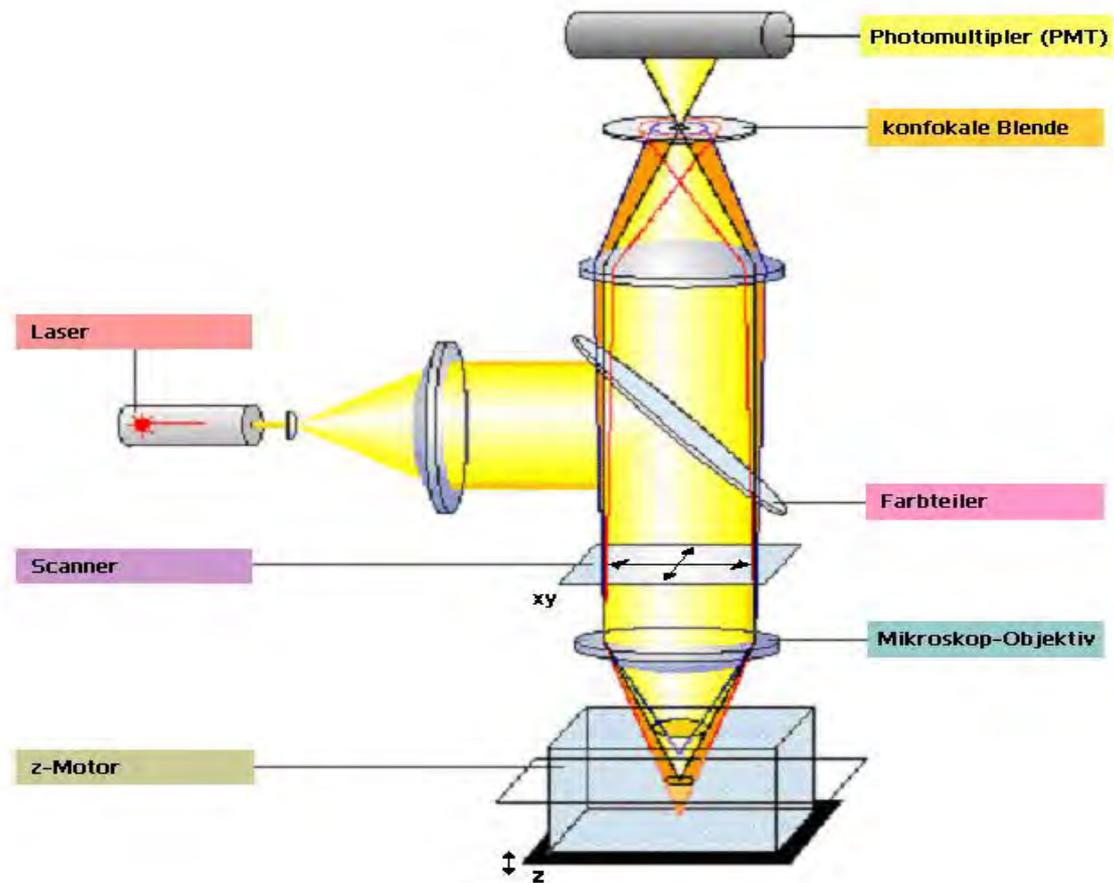


Abb. 2: Das konfokale Laser Scanning Mikroskop (schematische Darstellung) [ZEISS; 2002]

Eine Möglichkeit für den Nachweis und die Untersuchung bestimmter Objektdetails, wie hier die Lage und Struktur von Proteinen in Zellen, bietet die Fluoreszenzmikroskopie. Die endogenen Proteine werden mit Immunfluoreszenzmikroskopie in der Zelle sichtbar gemacht. Fluoreszenzfarbstoffe können im Fluoreszenzmikroskop mit Licht bestimmter Wellenlängen angeregt werden und strahlen dann Licht größerer Wellenlängen ab, das von einer digitalen Kamera aufgenommen wird.



Abb. 3: Gute Zellkernaufnahme am Beispiel von Vimentin

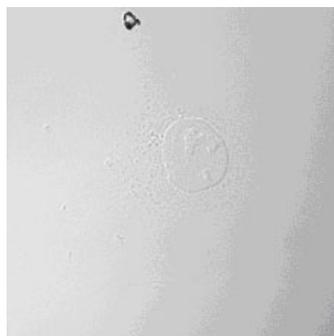


Abb. 4: Mittelmäßige Zellkernaufnahme am Beispiel von HSP70

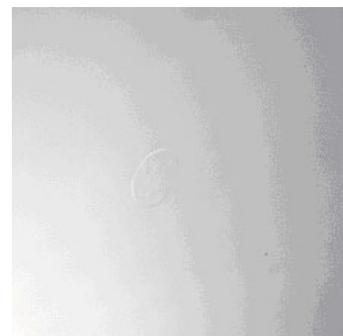


Abb. 5: Schlechte Zellkernaufnahme am Beispiel von HSP40

3 Kantenextraktion

Um die Proteinaufnahmen genauer untersuchen und untereinander vergleichen zu können, wird ein Bezugspunkt in der Zelle benötigt. Die neben den Proteinaufnahmen erstellten Hellfeldbilder zeigen je nach Qualität deutlich den Zellkern.

Grundlage für die Ermittlung der Zellkernkante waren die Hellfeldaufnahmen, die einen bzw. mehrere Zellkerne zeigen. Hierbei entstanden Aufnahmen, die sich in Hinblick auf die Qualität stark unterscheiden (Abbildungen 3 bis 5). Die in Abbildung 3 gezeigte Aufnahme repräsentiert eine optimale Bildqualität. Diese Tatsache wird auch dadurch verstärkt, dass nicht nur der Zellkern mit seinen Strukturen eindeutig erkennbar ist, sondern auch Strukturen außerhalb des Zellkerns im Cytoplasma wiedergegeben werden. Im Vergleich dazu wird der Zellkern in Abbildung 4 nur noch schwach deutlich, wobei einzelne Strukturen kaum erkennbar sind. Der qualitativ schlechteste Fall liegt bei Abbildung 5 vor, wo die Zellkernkante visuell nicht mehr eindeutig lokalisierbar und die Kantenerkennung kaum mehr möglich ist.

Wie die nachfolgenden Untersuchungen zeigen, treten in Hinblick auf die Kantenextraktion Probleme bereits bei den qualitativ besten Bildern auf. Von allen getesteten Programmen ergaben die Programmsysteme EDISON und HALCON die besten Resultate. Für die Bestimmung der Zellkernkante wurde im Folgenden das Programm EDISON verwendet, da bei HALCON kein allgemeingültiger Programmablauf realisiert werden konnte.

3.1 Kantenextraktion mit EDISON

Dieses Programm wurde freundlicherweise von der Rutgers State University of New Jersey im Internet zur Verfügung gestellt. EDISON steht für **E**dge **D**etection and **I**mage **S**egmenta**ti**ON System. Es handelt sich um ein Programm, das einerseits eine Kantenextraktion und andererseits eine Segmentierung durchführen kann [EDISON; 2002].

Trotz der qualitativen Unterschiede, deren Ursprung nicht rekonstruiert werden kann, wurde mit dem Programmsystem EDISON eine Kantenganalyse durchgeführt, deren Ergebnisbilder wie folgt aussehen:

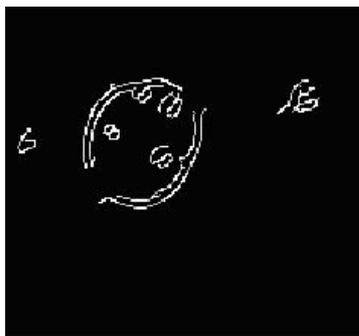


Abb. 6: Ergebnisbild von EDISON für die Vimentin-Aufnahme



Abb. 7: Ergebnisbild von EDISON für die HSP70-Aufnahme

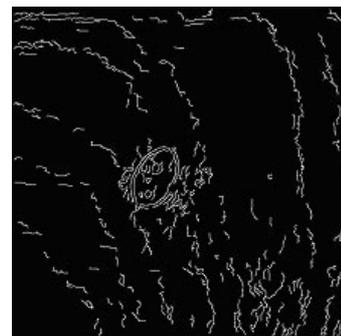


Abb. 8: Ergebnisbild von EDISON für die HSP40-Aufnahme

Die ursprüngliche Zielsetzung war, die vorliegenden Hellfeldaufnahmen möglichst automatisch zu bearbeiten und die Zellkernkante in allen auftretenden Fällen qualitativ bestmöglich zu lokalisieren. Selbst die besten Hellfeldaufnahmen ließen bald erkennen, dass eine geschlossene Zellkernkante mit EDISON nicht extrahiert werden kann. Es konnte aber ein Verfahren mit EDISON entwickelt werden, das durch wenige weitere Bearbeitungsschritte einen automatischen Programmablauf ermöglicht. Die daraus resultierenden Kantendateien sind somit die Basis für alle Modellansätze des selbstentwickelten Programms PROMEMORIA.

4 Merkmalsraum

Bezugnehmend auf die Extraktion der Zellkernkanten kann im Folgenden mit der Analyse der Proteinaufnahmen begonnen werden. Die Hauptaufgabe liegt hier in der Modellierung einzelner Merkmale, mit deren Hilfe eine Klassifizierung der Proteine möglich wird.

4.1 Merkmalsmodellierung und Parametrisierung

Im ersten Schritt werden nun die Organellen hinsichtlich ihrer Charakteristika analysiert. Wie bereits gezeigt (Tab. 1), weisen die meisten Organellen spezifische Eigenschaften auf, die z.T. in mathematische Modelle umgesetzt werden können.

Generell wurde zwischen dem Zellkerninnenraum und dem Cytoplasmabereich (Außenraum) unterschieden. Um die Zellkernfärbung zu charakterisieren, sind mehrere Methoden verfolgt worden. Die einfachste Parametrisierung besteht in der Bestimmung einer mittleren Zellkernfärbung. Hierfür werden alle Grauwerte der Pixel des Zellkerns gemittelt.

In Anlehnung an ein Histogramm erfolgte die zweite Parametrisierung durch eine Intervallbetrachtung der Grauwerte. Fünf konstante Grauwertintervalle wurden analysiert, wobei die Häufigkeit stets im Zusammenhang mit dem Grauwertmittel stand und somit keinen neuen unabhängigen Parameter darstellt. Um eine möglichst eindeutige Charakterisierung zu erhalten, wurde eine weitere Parametrisierung eingeführt. Für diese Analyse wurden alle Pixel, deren Grauwert größer als Null ist, als gefärbt betrachtet. Angefangen bei einem maximalen Grauwert von 255 (weiß) wurde die Menge aller gefärbten Zellkernpixel und der prozentuale Anteil auf alle möglichen Zellkernpixel bestimmt. Im Rahmen der Statistik sollte die Grenze, bei der eine 50%ige Zellkernfärbung ermittelt wird, als proteinspezifischer Parameter angesehen werden können.

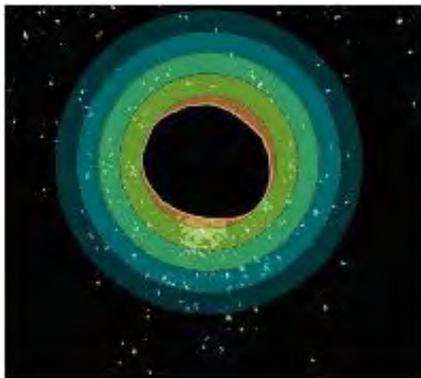


Abb. 9: Schalenmodell

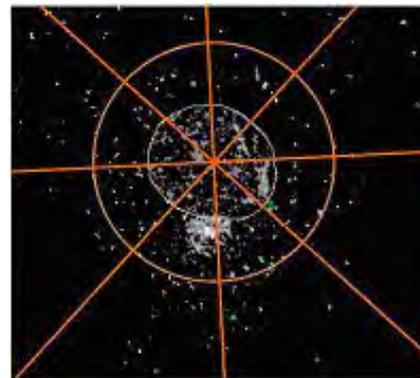


Abb. 10: Sektorendefinition

Neben dem Zellkerninnenraum wurden für den Außenraum der Zelle mehrere Modelle entwickelt. Geometrisch betrachtet wurde die Färbung in einem Schalenmodell untersucht, um ausgeprägte Strukturen rund um den Zellkern, wie z.B. das endoplasmatische Retikulum, zu lokalisieren. Dabei werden Schalen außerhalb des Zellkerns aufgebaut, die den Zellkernschwerpunkt als Mittelpunkt haben. Die Abbildung 9 zeigt, dass die erste Schale je nach Zellkernform, z.T. eine unregelmäßige Innenkante hat, alle weiteren Schalgrenzen jedoch äquidistant sind. Wiederum werden Grauwertmittel bestimmt und fließen zusammen mit der prozentualen Färbung in die Berechnungen ein.

Ein weiteres, sektorielles Modell hingegen wurde mit den Zellkernachsen (kleinste und größte Entfernung vom Zellkernschwerpunkt zur Kante) kombiniert, so dass in Abhängigkeit von der Zellkernform spezielle lokale Objekte analysiert werden konnten. Die Sektoren, wie in

Abbildung 10 angedeutet, basieren auf der Nullrichtung, die entlang der kleinen Hauptachse verläuft. Die angesprochenen Unterschiede zwischen Fadenstrukturen und punktförmigen Objekten im Außenraum wurden mit einer Fadenberechnung modelliert, so dass diese Parameter ebenfalls für die Klassifizierung zur Verfügung stehen. Deutlicher Vorteil dieser Methode ist die unabhängige Kontrolle der Lage des Golgi-Apparates, die es erlaubt, in einer ggf. zweiten Iteration die Golgi-Betrachtungen zu wiederholen. Untersucht werden in diesem Modell die Färbungen in Prozent, die sich wiederum aus der Anzahl der tatsächlich gefärbten und maximal möglichen Proteinpunkte ergeben. Aus diesen Modellen resultieren die in der Tabelle 2 zusammengefassten, verwendeten Parameter.

Modell	Parameter	Anz
Zellkern	Grauwertmittel, Färbung in %, 50%ige Färbung	3
Golgi	Grauwertmittel	1
Sektoren	Intervallbetrachtung der Färbung (0-20%, 20-80% & 80-100%)	3
Außenraum	Grauwertmittel, Färbung in %	2
Fäden/Punkte	ursprüngliche Anzahl, Anzahl (Länge über 5 Pixel), Anzahl Fäden	3
		12

Tab. 2: Alle 12 verwendeten Parameter

4.2 Klassifizierungsverfahren

Aus der Fernerkundung sind bereits mehrere Klassifizierungsverfahren bekannt, die auch in diesem Projekt angewendet werden können. Betrachtet man die einzelnen Merkmale bzw. die mathematischen Modellierungen und Parameterbestimmungen, stellt man fest, dass sich insbesondere das Quaderverfahren für die Klassifizierung anbietet. Auch die schnelle Umsetzung in dem selbstentwickelten Programm PROMEMORIA begünstigte die Entscheidung für dieses Verfahren.

Das allgemeingültige Quaderverfahren basiert auf n Merkmalsachsen und somit auf einem n -dimensionalen Merkmalsraum. Hierbei werden auf den Merkmalsachsen klassenspezifische Intervalle definiert, die im Merkmalsraum die eindeutige Lage jeder Objektklasse realisieren.

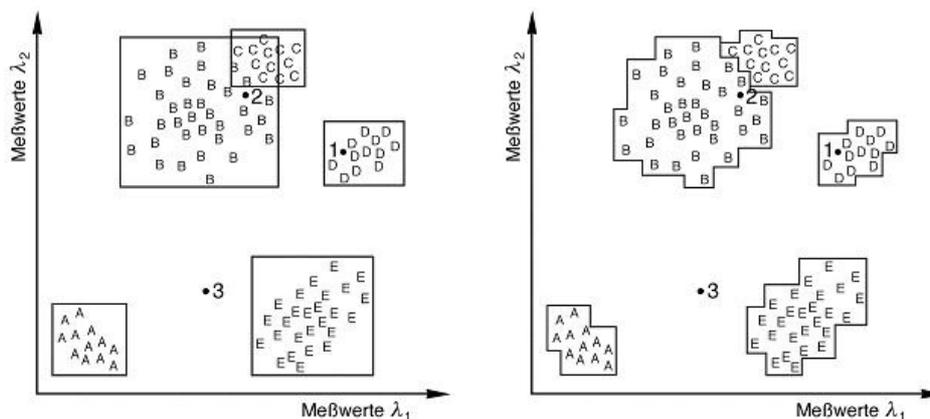


Abb. 11: Quaderverfahren [ALBERTZ; 2001]

Die folgenden Betrachtungen zur Zellkernanalyse sollen das angewendete, modifizierte Quaderverfahren erläutern. Sie können auf die übrigen Modelle übertragen werden. Die für diese Arbeit zur Verfügung stehende Datenbasis führte bei einer Analyse des Zellkerns zu der in Abbildung 12 dargestellten graphischen Verteilung.

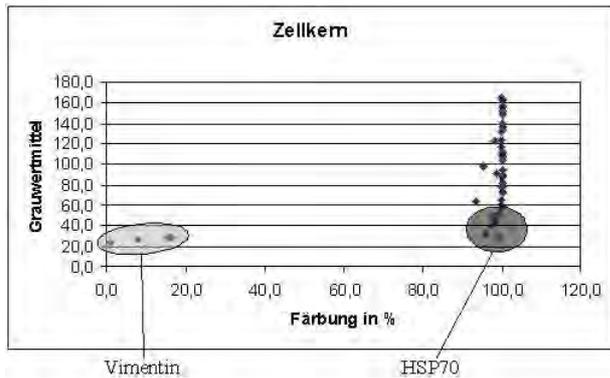


Abb. 12: Diagramm der Zellkernfärbung

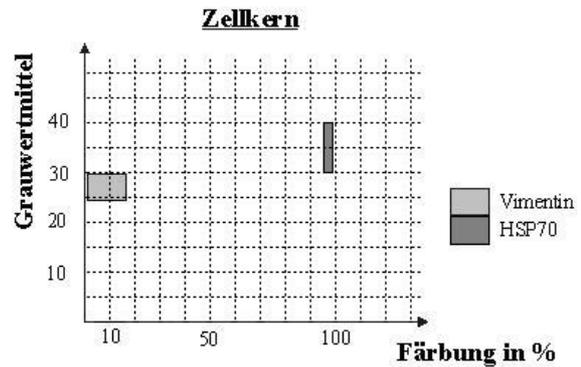


Abb. 13: Merkmalsraum zur Zellkernfärbung

Mit Hilfe der Parameter *Färbung in %* und *Grauwertmittel* können die Proteine Vimentin und HSP70 eindeutig klassifiziert werden. Für beide Proteine konnten Quader definiert werden, die eine Unterscheidung ermöglichen.

Neben der Analyse des Zellkerns, die den ersten Unterraum (Abb. 13) aus den Parametern in Tabelle 2 bildet, resultieren aus der Merkmalsmodellierung weitere fünf Unterräume, die sog. Unterscheidungskriterien. Es können daher maximal sechs Kriterien erfüllt sein. Wie man in Abbildung 13 erkennen kann, sind keine Quader für die restlichen Proteine definiert worden. Daraus ergibt sich, dass in diesem Fall nur für die beiden Proteine Vimentin und HSP70 eine positive Entscheidung eintreten kann.

Die maximale Anzahl an Unterscheidungskriterien für jedes Protein ergibt sich wie folgt:

Vimentin:	max. 6 Ja-Entscheidungen
HD1:	max. 3 Ja-Entscheidungen
HSP40:	max. 4 Ja-Entscheidungen
HSP70:	max. 2 Ja-Entscheidungen
BARD:	max. 2 Ja-Entscheidungen
4C8:	max. 2 Ja-Entscheidungen
CAG:	max. 2 Ja-Entscheidungen
GIT:	max. 4 Ja-Entscheidungen

Im Falle von Vimentin können alle sechs Unterscheidungskriterien positiv entschieden werden, wohingegen für das Protein BARD z.B. nur zwei Kriterien positiv erfüllt sein können. Die eigentliche Entscheidung, um welches aktuell vorliegende Protein es sich handelt, wird getroffen, indem prozentual berechnet wird, für welches Protein die meisten Ja-Entscheidungen vorliegen. Liegen für ein Protein 2 HD1-Kriterien vor (66%) und nur 1 BARD-Entscheidung (50%), fällt die Entscheidung auf HD1.

4.3 Klassifizierungsergebnisse

Auf Grundlage der Merkmalsmodelle und ihrer Parametrisierung bzw. des ausgewählten Klassifizierungsverfahrens erfolgte mit Hilfe von 47 Aufnahmen ein Klassifizierungstraining. Ziel dieses Trainings war die Optimierung des Klassifizierungsverfahrens und die Bestimmung von möglichst eindeutigen Unterscheidungskriterien.

In der Tabelle 3 werden die Klassifizierungsergebnisse zusammengestellt und im Folgenden kurz erläutert:

Die Spalten zwei bis neun der Tabelle sind je einem Protein zugeordnet. In diesen Spalten sind die Ergebnisse der Merkmalsuntersuchung für das jeweilige Protein angegeben.

Protein / Antikörper	Vimentin	HSP70	HSP40	BARD	HD1	4C8	CAG	GIT
Vimentin	6	2	4	2	3	2	2	4
Vimentin	4							1
Vimentin	4							
Vimentin	4							
Vimentin	4							
HSP70		2			1			
HSP70		2			1	1		
HSP70	1	1						
HSP40			3					1
HSP40			4					
HSP40			3					
BARD	1		1	2				
BARD			1	2				
BARD			1	2				
BARD			2	2				
HD1			1	1	1			
HD1	1			1	2			
HD1	1			1	2			
HD1				1	2			
HD1				1	3			
HD1				1	3			
HD1				1	1		1	
HD1				1	3			

Protein / Antikörper	Vimentin	HSP70	HSP40	BARD	HD1	4C8	CAG	GIT
4C8				1	1	1		
4C8			1		1	2		1
4C8			1			2		1
4C8						2		1
4C8	1					2		
4C8			1			2		1
4C8			3					
4C8			1	1		1		
4C8			2			1		
4C8				1		1		
4C8	1			1		2		
4C8					1			
4C8	1		1			2		
4C8				1		1		1
4C8				1		1		1
4C8				1		1		1
4C8				1		2		2
CAG	1						2	
CAG	1						2	
CAG								
GIT					1			4
GIT							1	3
GIT							1	3
GIT			1			1		1

Tab. 3: Klassifizierungsergebnisse

Es muss darauf hingewiesen werden, dass z.T. mehrere Zellen aus einer Aufnahme entnommen worden sind, was durch eine grau/weiß Markierung in der Tabelle veranschaulicht wird. Deutlich wird, dass die Grunddaten keine statistische Sicherheit garantieren.

Untersucht man die Proteinbilder, die in der ersten Spalte stehen, ergeben sich im Einzelnen folgende Resultate: Für das Protein Vimentin konnten fünf Bilder, die aus ursprünglich zwei Aufnahmen stammen, getestet werden. Das erste Bild wurde über ein Merkmal fälschlicher Weise dem Protein GIT zugeordnet. In diesem Fall wird das Protein dunkelgrau markiert. Bei den restlichen Aufnahmen wurden stets vier Vimentin-typische Merkmale erkannt und eine dementsprechende Zugehörigkeit festgestellt (mittelgraue Markierung).

Trotz einiger Fremdmerkmale wurden die Aufnahmen der Proteine HSP70, HSP40 und BARD korrekt klassifiziert.

Beim Protein Huntingtin muss zwischen den Antikörpern differenziert werden. Das vom Antikörper HD1 erkannte Huntingtin ist in zwei Fällen falsch, in den anderen sechs Fällen jedoch richtig zugeordnet worden. Von Huntingtin, das durch 4C8 markiert wurde, konnten die meisten Zellen getestet werden. Diese Vielzahl an Aufnahmen wurde aus Koloalitionen mit den unterschiedlichsten Proteinen gewonnen. Bei diesem Protein streute die Zuordnung, d.h. von insgesamt 17 Aufnahmen sind acht richtig, drei falsch klassifiziert worden, wobei die restlichen sechs Bilder, hellgrau markiert, als nicht klassifiziert einzustufen sind. Dieser Fall tritt genau dann ein, wenn gleich viele Unterscheidungskriterien mit Ja beantwortet wurden und die möglichen Proteinklassen die gleiche Kriterienanzahl besitzen. Die Ähnlichkeit mit dem Protein BARD, das ebenfalls über zwei Merkmale klassifiziert werden kann, ist Ursache für das Scheitern der Klassifizierung.

Wie beim nächsten Protein (Huntingtin (CAG)) deutlich wird, können im Extremfall Aufnahmen ohne jegliche Merkmalidentifikation überhaupt nicht zugeordnet werden.

Das letzte Protein GIT ist in drei Bildern richtig und in einem Bild falsch zugeordnet worden.

5 Ausblick

Die Parametrisierung von Proteinmerkmalen lieferte die Voraussetzung für eine Klassifizierung mittels modifiziertem Quaderverfahren. Das selbst erzeugte Programm PROMEMORIA ist in der Lage, eine neue Aufnahme mit acht bereits modellierten Proteinen zu vergleichen und ggf. eine Zuordnung zu treffen. Hier muss darauf hingewiesen werden, dass einerseits die

Ausgangsdatenmenge durch die Auswahl von acht Proteinen gering gehalten wurde. Andererseits ist das verwendete modifizierte Quaderverfahren ein relativ simples Klassifizierungsverfahren; es wird in Zukunft durch besser geeignete Klassifizierungsansätze ersetzt. Wenn man berücksichtigt, dass dieses Programm eine Vorstufe darstellt, sind diese beiden Aspekte ausreichend, um zu zeigen, dass die prinzipielle Klassifizierungsmethode funktioniert. Im nächsten Schritt kann dann die Basisdatenmenge, d.h. die Auswahl der Proteine vergrößert werden.

Zwar konnten die meisten Proteine korrekt zugeordnet werden, dennoch gibt es Methoden, die mehr Erfolg versprechen. Eine Lösung liegt in der Anwendung von Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen. Mit Hilfe dieser Funktionen können durch aussagekräftigere prozentuale Wahrscheinlichkeiten nicht nur für einige, sondern für alle Proteinklassen die Ja/Nein-Entscheidungen des modifizierten Quaderverfahrens ersetzt werden. Die damit einhergehende Mehrdimensionalität des Merkmalsraums wird berücksichtigt und genauere Ergebnisse erzeugt.

Darüber hinaus ist die Anzahl der Ausgangsbilder zu gering. Die im Augenblick zur Verfügung stehende Menge an Proteinaufnahmen sollte erhöht werden, um statistisch sichere Auswertungen zu garantieren.

Zudem ist es möglich, einen Antikörper zur Färbung der Zellkernmembran zu verwenden. Diese sogenannte Laminfärbung wird die Extraktion der Zellkernkante vereinfachen und bietet bei gleichbleibender Qualität eine bessere Automatisierbarkeit.

6 Literaturverzeichnis

- ALBERTS, B.; BRAY, D.; JOHNSON, A.; LEWIS, J.; RAFF, M.; ROBERTS, K. & WALTER, P., 2001: Lehrbuch der Molekularen Zellbiologie, 2. korrigierte Auflage, Übersetzung von Martina Börsch-Supan (Koordination), WILEY-VCH Verlag, Weinheim
- ALBERTZ, J., 2001: Einführung in die Fernerkundung, 2. Auflage, Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt
- EDISON, 2002: **Edge Detection and Image SegmentatiON**, Bogdan Georgescu, Chris Christoudias (freeware), Center for Advanced Information Processing (CAIP), Rutgers State University of New Jersey,
Internet: <http://www.caip.rutgers.edu/riul/research/code/EDISON>
Hilfdateien: <http://www.caip.rutgers.edu/riul/research/code/EDISON/doc/help.html>
- HALCON, 2002: HALCON Version 6.1, HALCON/C++ Referenzhandbuch, MVTec Software GmbH; München, Internet: <http://www.mvtec.com>
- HALCON, 2002: HALCON Version 6.1, Getting Started with HALCON, User's Manual, MVTec Software GmbH; München, Internet: <http://www.mvtec.com>
- JÄHNE, B., 2002: Digitale Bildverarbeitung, 5. Auflage, Springer Verlag, Berlin
- ZEISS, 2002: Das konfokale Laser Scanning Mikroskop im Überblick, Broschüre: Konfokales Prinzip, Firma Zeiss, Internet:
[http://www.zeiss.de/C12567BE00472A5C/EmbedTitelIntern/KonfokalesPrinzipd/\\$File/Konfokales_Prinzip.pdf](http://www.zeiss.de/C12567BE00472A5C/EmbedTitelIntern/KonfokalesPrinzipd/$File/Konfokales_Prinzip.pdf)
- ZEISS, 2002: LSM 510 QuickStart Manual, Broschüre, Firma Zeiss, Internet:
http://www.cbit.uhc.edu/home_pages_nv/LSM_510_Training.pdf
- ZEISS, 2002: Image Browser, Firma Zeiss, Internet:
<http://www.zeiss.de/de/micro/home.nsf/InhaltFrameDHTML/7F3C15790A8CEBB0C12567c1004B7861>

AUTOMATISCHE EXTRAKTION VON BÄUMEN AUS LUFTBILDERN UND OBERFLÄCHENMODELLEN

B.-M. STRAUB¹

Es wird ein Verfahren zur automatischen Extraktion von Bäumen vorgestellt, das auf der Verwendung einer Multiskalen-Repräsentation von Luftbildern und Oberflächenmodellen basiert. Unter Extraktion von Bäumen wird hier die Bestimmung der Position jedes einzelnen Baumes in der Szene sowie die Bestimmung der Kronenabgrenzungen verstanden. Die Grundidee des Verfahrens besteht darin, dass sich die Form einer Baumkrone durch eine Kugel- bzw. Ellipsoidoberfläche beschreiben lässt. Dies gilt dann, wenn durch eine vorhergehende Tiefpassfilterung die Feinstrukturen der Baumkrone optimal unterdrückt werden. Die hier vorgeschlagene Lösung zur Extraktion von Baumkronen verwendet eine Multiskalenrepräsentation im Linearen Maßstabsraum, eine Wasserscheidentransformation und Snakes zur Extraktion von einzelnen Bäumen.

Das Verfahren wurde mit Oberflächenmodellen unterschiedlicher Auflösung (0.2 m und 1 m) und Herkunft (Laserscanner, digitale Bildzuordnung) getestet. Dabei wurden sowohl in Waldgebieten, als auch in Siedlungsgebieten gute Ergebnisse erzielt.

1 EINLEITUNG

In diesem Artikel wird die automatische Extraktion von Bäumen auf der Basis von Luftbildern und Oberflächenmodellen behandelt. Der Begriff Extraktion impliziert die kognitive Erkennung von Objekten im Sinne einer Identifikation und deren Rekonstruktion. Unter Rekonstruktion werden die Prozesse zusammengefasst, die eine geometrische Beschreibung des Objektes zum Ziel haben. In diesem Sinne ist die Rekonstruktion eine Vermessung des Objektes. Die Initialisierung des Verfahrens erfolgt durch eine relativ geringe Anzahl von Steuerparametern, die für die Aufgabe der Extraktion von Bäumen aus dem Oberflächenmodell im wesentlichen konstant sind. Ein Extraktionsergebnis besteht aus dem Mittelpunkt, dem Durchmesser und den Stützpunkten des Umringspolygons der Baumkronenabgrenzung für jede in der untersuchten Szene sichtbare Baumkrone. Der Mittelpunkt der Baumkrone ist eine Schätzung für die Position des Stammes, mit Baumkronenabgrenzung ist der im Luftbild sichtbare Rand der Baumkrone gemeint. Mit diesen Informationen lassen sich bereits einfache 3D Modelle von Bäumen erzeugen (Abbildung 1).



Abbildung 1: 3D Baummodelle - Visualisierung²

¹ Bernd-M. Straub, Institut für Photogrammetrie und GeoInformation, Universität Hannover, Nienburger Straße 1, 30167 Hannover, e-mail: bernd-m.straub@ipi.uni-hannover.de

² Für die Visualisierung wurde der in (SAINT JOHN, 1997) beschriebene VRML Prototyp verwendet.

2 STAND DER FORSCHUNG

Erste Ansätze zur Automatisierung der Extraktion von einzelnen Bäumen aus Luftbildern wurden etwa Mitte der achtziger Jahre des 20. Jahrhunderts entwickelt. In der Regel wurden in diesen frühen Ansätzen lokale Intensitätsmaxima in Farbinfrarotbildern als Hypothesen für Bäume angesehen, siehe beispielweise (PINZ, 1988).

Die Ansätze zur Extraktion von einzelnen Bäumen aus Bildern lassen sich grob in zwei Kategorien einteilen. Bei den *modellgetriebenen (bottom-up)* Ansätzen wird basierend auf einem 3D Modell eines Baumes ein 2D Muster des Modells durch eine geometrische Transformation in die Abbildungsebene generiert. Die Instanzen der 3D Modelle werden durch einen Vergleich des Musters mit den in der Szene sichtbaren Bäumen erzeugt. Ein solcher Ansatz für die Extraktion von Bäumen aus Luftbildern wurde erstmals in (POLLOCK, 1994) vorgestellt. Ein neuerer Ansatz, der Laserscannermessungen und ein 3D Muster verwendet, ist in (ANDERSEN et al., 2002) beschrieben. Ein grundlegender Vorteil dieser Strategie ist, dass bei einer sehr detaillierten Modellierung des gesuchten Objektes, die Bildverarbeitung prinzipiell sehr einfach gehalten werden kann. Dem steht als Nachteil gegenüber, dass sehr viele verschiedene Muster generiert und in den Bildern gesucht werden müssen.

Im Gegensatz dazu steht ein eher *datengetriebenes (top-down)* Vorgehen, bei dem zunächst Merkmale wie Kanten (PERSSON et al., 2002) und/oder Regionen (BRANDTBERG & WALTER, 1998) aus den Bildern extrahiert werden. Die Instanzen des Modells werden in einem zweiten Schritt, durch eine Gruppierung der Merkmale erzeugt. Das eigentliche 3D Modell des Baumes verbirgt sich hier häufig im Prozess der Gruppierung, also in der Art und Weise wie die Merkmale zu Instanzen von Bäumen zusammengesetzt werden. Der Vorteil des datengetriebenen Ansatzes ist, dass der Vergleich zwischen Modell und Bild auf einer symbolischen Ebene stattfindet und somit allgemeiner formuliert werden kann. Nachteilig ist die oftmals schwierige Bewertung der Bildmerkmale und deren anschließende Gruppierung.

Mit den automatischen Verfahren zur Extraktion von Bäumen wird durchschnittlich etwa eine Vollständigkeit von 80% bei einer Korrektheit von über 90% erreicht. Ein hervorragender Überblick über die Arbeiten zur Extraktion einzelner Bäume aus Luftbildern findet sich in (HILL & LECKIE, 1999).

Ein wesentliches Problem bei der Extraktion von Bäumen besteht darin, dass der Durchmesser der einzelnen Baumkronen in der Regel nicht bekannt ist, jedoch für die Extraktion benötigt wird. Zur Lösung dieses Problems verwenden einige der merkmalsbasierten Ansätze eine Repräsentation des Bildmaterials im Linearen Maßstabsraum (KOENDERINK, 1984), (LINDBERG, 1994). In dieser Maßstabsraum-Repräsentation liegen die Bilddaten in verschiedenen Auflösungsstufen vor, in etwa vergleichbar mit einer Bildpyramide. Die Auflösung wird durch Faltung des Bildes mit einer Gaußfunktion reduziert, anders als bei Bildpyramiden wird hier jedoch die Bildgröße nicht verändert. Man spricht dabei von einer Transformation des Bildes im Linearen Maßstabsraum. Ein mit einer Gaußfunktion $G(x, \sigma)$ gefaltetes Bild $H(x)$ wird im Folgenden als Maßstabsebene $H(x, \sigma) = G(x, \sigma) * H(x)$ bezeichnet. Diese Transformation ist allein vom Maßstabsparameter σ abhängig, eine Vergrößerung von σ führt zu einer Verringerung der Auflösung.

In (BRANDTBERG & WALTER, 1998) erfolgt die Extraktion der Baumkronen auf der Basis der über mehrere Maßstabsebenen akkumulierten Krümmungszentren der Kanten im Luftbild. Eine Voraussetzung dafür ist, dass die Bäume in mehreren Maßstabsebenen bedeutsame

Objekte in den Daten darstellen. Dies ist eine grundlegende Idee bei der Verwendung mehrerer Skalen für die Extraktion von Objekten, siehe beispielsweise (MARR, 1982), oder (LINDBERG, 1998). In (SCHARDT et al., 2002) wird vorgeschlagen, eine optimale Maßstabsebene vor der Segmentierung mit dem Wasserscheidenverfahren zu ermitteln. Alternativ dazu kann die Segmentierung in mehreren Maßstabsebenen erfolgen, dies wird in (PERSSON et al., 2002) vorgeschlagen. Die optimale Maßstabsebene ergibt sich dann indirekt nach der Segmentierung. Der Vorteil der zweiten Strategie ist, dass bei der Bewertung der Segmente auch Merkmale herangezogen werden können, die nicht für die Segmentierung genutzt wurden. Eine ähnliche Strategie wird auch hier verwendet.

3 STRATEGIE FÜR DIE BAUMEXTRAKTION

Die Objektextraktion basiert immer auf einem Modell des Objektes und auf einer Strategie zur Extraktion von Merkmalen aus den Bildern und deren Zuordnung zum Modell. Die Strategie ist der „*Plan zur Erkennung von Objekten in Bildern*“ (MAYER, 1998). Die hier verwendete Strategie ist in Abbildung 2 dargestellt. Die Grundidee dieser Strategie zur Extraktion von Bäumen ist es, zunächst die oftmals recht komplexen Feinstrukturen der einzelnen Baumkronen durch eine Tiefpassfilterung zu entfernen, um dann in einem zweiten Schritt einzelne Baumkronen als konvexe Regionen bestimmter Größe im Oberflächenmodell zu identifizieren. Das Hauptproblem dabei ist, dass der Durchmesser eines einzelnen Baumes in der realen Welt einerseits kontinuierlich variabel ist, andererseits aber einen entscheidenden Einfluss auf die Auswahl der optimalen Maßstabsebene hat.

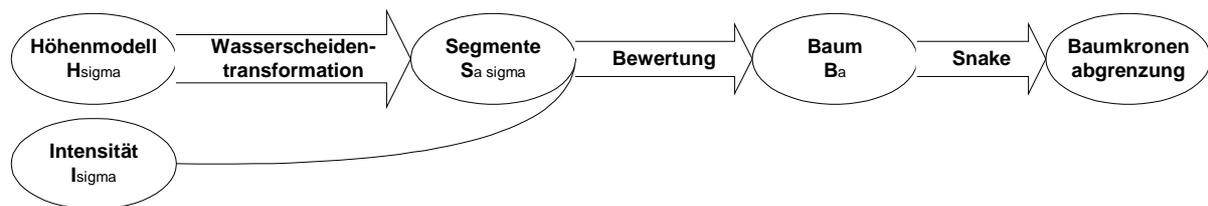


Abbildung 2: Strategie zur Extraktion von Baumbeschreibungen

Es wird davon ausgegangen, dass in mindestens einer der untersuchten Maßstabsebenen die Annahme erfüllt ist, dass es sich bei einer Baumkrone um eine konvexe Region im Oberflächenmodell handelt. Damit wird der Verbindung eines bestimmten Maßstabs mit dem Objekt „Baum“ bei der Segmentierung des Oberflächenmodells aus dem Weg gegangen. Auf einer Maßstabsebene, in der die Feinstrukturen einer sehr großen Baumkrone unterdrückt werden, können kleine Bäume bereits ausgelöscht sein. Deshalb wird eine Reihe von Maßstabsebenen untersucht. Nach der Bewertung aller Hypothesen in allen Maßstabsebenen werden die jeweils besten Hypothesen ausgewählt.

Für die Bewertung werden Eigenschaften eines generischen, geometrischen Modells des Baumes verwendet, das aus einer umhüllenden Funktion zur Beschreibung der Baumkrone besteht. Dabei handelt es um das in (POLLOCK, 1994) hierfür vorgeschlagene Generalisierte Rotationsellipsoid (generalized ellipsoid of revolution). Eine Funktion, die im Reellen in Abhängigkeit von einem Formparameter verschiedene Formen zwischen einem rotationssymmetrischen Ellipsoid und einem Zylinder annehmen kann. Zusätzlich kann der Durchmesser und die Höhe des Modells variiert werden. Basierend auf diesem geometrischen Modell werden einige wenige Merkmale identifiziert, auf deren Basis die Segmente bewertet werden: Der Rand einer Baumkrone ist in der Sicht von oben mehr oder weniger kreisförmig, die Oberfläche der Baumkrone ist eher konvex als konkav und die Größe eines Segments, das einer Baumkrone entspricht, ist nach oben beschränkt, siehe auch (STRAUB, 2003a).

In mehreren Maßstabsebenen des Oberflächenmodells wird zunächst eine Segmentierung mit der Wasserscheidentransformation durchgeführt (SOILLE, 1998). Für jedes dabei entstandene Segment S_{ij} werden Zugehörigkeitswerte $m(a_k)$, basierend auf den Merkmalen Größe, Konvexität, Kreisförmigkeit und Vitalität berechnet. Bei der Berechnung der Vitalität wird auch auf die Information im optischen Bild $I(\bar{x}, \sigma)$ zurückgegriffen (vgl. Abbildung 2). Die Klassifikation der gültigen Hypothesen basiert auf den Zugehörigkeitswerten, Segmente mit hohen Zugehörigkeitswerten stellen Hypothesen für Baumkronen B_a dar.

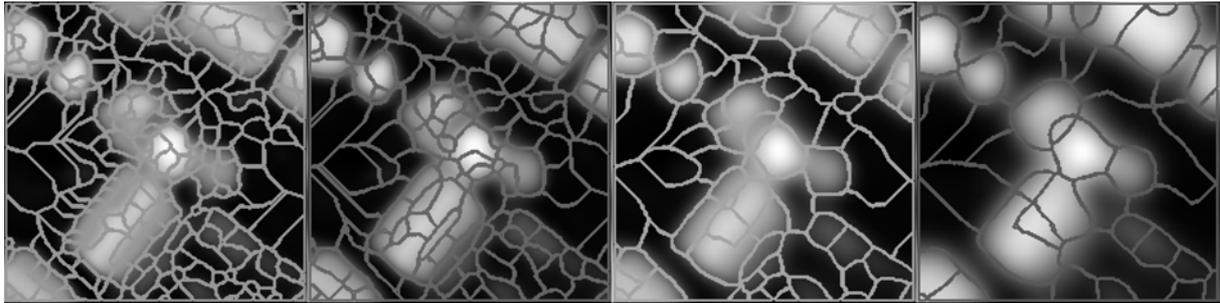


Abbildung 3: Segmentierung in vier unterschiedlichen Maßstabsebenen

Dadurch entstehen an einer Position in der Bildebene mehrere sich eventuell überlappende Segmente. Die Abbildung 3 zeigt beispielhaft vier unterschiedliche Maßstabsebenen, im Vordergrund sind die Ränder der Segmente $S_{\sigma,a}$, in der jeweiligen Maßstabsebene abgebildet. Der kleinste Zugehörigkeitswert der vier Merkmale entspricht der endgültigen Bewertung eines Segmentes. Dies entspricht einem UND der Fuzzy Theorie (BEZDEK, 1992). In Abbildung 4 sind die Segmente mit einem Zugehörigkeitswert von über 0.75 dargestellt. Dieser Wert muss empirisch ermittelt werden.

Bei der Auswahl der besten Hypothesen im Maßstabsraum wird davon ausgegangen, dass das Segment mit der besten Bewertung an einer bestimmten Stelle im Bild die beste Hypothese vor einen Baum darstellt. Hierzu muss zunächst festgestellt werden, welche der Segmente sich in der Bildebene gegenseitig überlappen, einander enthalten, oder gleich sind. Dadurch werden die einzelnen Maßstabsebenen wieder zusammengeführt. Segmente, die in mehreren Maßstabsebenen auftreten, werden als ungültig markiert. Lediglich das Segment mit der besten Bewertung bleibt bestehen und stellt das vorläufige Extraktionsergebnis B_a für einen Baum dar. Diese besten Hypothesen im Maßstabsraum (BHiM) sind in Abbildung 4 mit weißen Pfeilen markiert.

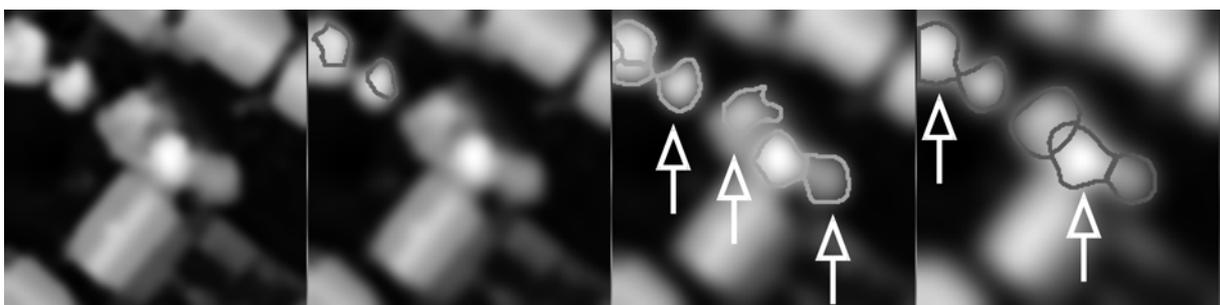


Abbildung 4: Als Baumhypothesen ausgewählte Segmente mit hohem Zugehörigkeitswert. Die weißen Pfeile markieren die Segmente mit der besten Bewertung im Maßstabsraum.

In einem letzten Schritt erfolgt die Bestimmung der endgültigen Baumkronenabgrenzung mittels einer Snake in Form eines geschlossenen Polygons. Snakes wurden erstmals in (Kass et al. 1988) vorgestellt. Die grundlegende Idee des Snake-Algorithmus ist es, ein Bild als eine Art Landschaft zu betrachten, in der sich die Snake, ein deformierbares geometrisches Modell des gesuchten Objektes, bewegt. Bewegung und Form der Snake in der Landschaft wird durch eine virtuelle Schwerkraft verursacht, die Snake bewegt sich in die Täler dieser Landschaft. Die Deformierbarkeit der Snake selbst wird ebenfalls durch physikalisch motivierte Parameter gesteuert. Bei der Bestimmung der Baumkronenabgrenzung mit der Snake kann neben der Geometrie der einzelnen Baumkrone auch die Topologie zwischen den Baumkronen verändert werden. Aus diesem Grund erfolgt die abschließende interne Bewertung (IB) der extrahierten Bäume erst nach der Bestimmung der Baumkronenabgrenzung. Hierzu werden die Zugehörigkeitswerte basierend auf der neuen Geometrie neu berechnet, anschließend werden die topologischen Relationen überprüft und im Falle der Überlappung wird erneut die beste Hypothese gewählt. Eine detaillierte Beschreibung des Algorithmus findet sich in (STRAUB, 2003a).

4 ERGEBNISSE

Der vorgestellte Ansatz zur Extraktion von Bäumen wurde in verschiedenen Testgebieten eingesetzt, und es wurde eine externe Evaluierung durchgeführt. Die Erfassung der hierfür benötigten Referenzdaten erfolgte auf Basis derselben Bilder, die auch für die automatische Extraktion verwendet wurden. Position und Radius werden durch einen Operateur mit einer kreisförmigen, im Durchmesser variablen, Messmarke erfasst. Die Vollständigkeit und die Richtigkeit der Ergebnisse für die einzelnen Projekte ist in Tabelle 1 zusammengefasst. Im Mittel wurde eine Vollständigkeit von 76% und eine Korrektheit der Ergebnisse von 68% bei der ausschließlichen Betrachtung der besten Hypothesen im Maßstabsraum (BHiM) erreicht. Durch die Anwendung der Snakes zur Bestimmung der Baumkronenabgrenzung, auf der Basis der BHiM reduziert sich zwar die Anzahl der Fehlextraktionen, das heißt die Korrektheit nimmt zu, im Mittel auf 79% (Spalte IB in Tabelle 1). Gleichzeitig verschlechtert sich aber auch die Vollständigkeit der Ergebnisse auf 59%.

Das Testgebiet Grangemouth, Schottland wurde im Sommer 2000 im Maßstab 1:5000 auf Farbinfrarotfilm aufgenommen. Basierend auf den gescannten Luftbildern wurde im Rahmen des CROSSES Projektes von der französischen Firma ISTAR ein Oberflächenmodell mit 0.2 m und ein Wahres Orthobild mit 0.1 m Auflösung hergestellt. Befliegungszeitpunkt, Auflösung und Filmmaterial wurden im Rahmen des Projektes im Hinblick auf die automatische Extraktion von Bäumen gewählt. Bei dem Testgebiet handelt es sich um ein Gebiet mit Vorortcharakter, in dem vorwiegend kleinere Einfamilienhäuser und Laubbäume auftreten. In Abbildung 5 [3] sind die Ergebnisse für den Ausschnitt A1 (vgl. Tabelle 1) dargestellt. In der Spalte Grangemouth A3 in Tabelle 1 sind die Ergebnisse desselben Ausschnitts angegeben, allerdings wurde hier nicht der Vegetationsindex verwendet, sondern die lokale Varianz als Texturparameter. Auf einen solchen oder einen ähnlichen Texturparameter muss zurückgegriffen werden, wenn keine Farbinformation zur Verfügung steht, siehe auch (STRAUB, 2002).

Projekt	BHiM		IB	
	V[%]	K[%]	V[%]	K[%]
Grangemouth A1	93	75	78	85
Grangemouth A3	70	46	56	54
Hohentauern	72	86	52	94
Paris	84	59	44	75
Ravensburg	50	58	41	66
Mittel	76	68	59	79

Tabelle 1: Gegenüberstellung der Ergebnisse von vier verschiedenen Projekten

Das zweite Testgebiet, ein Nadelwaldbestand, liegt in den Alpen in Österreich, in der Nähe von Hohentauern. Für die Untersuchungen wurde aus den First-Pulse Messungen eines Laserscanners (TopoSys I) ein rasterförmiges Oberflächenmodell mit 0.25 m Auflösung berechnet. Die Originaldaten haben eine Auflösung von etwa 4-5 Messungen pro Quadratmeter, die Flughöhe betrug etwa 800 m über Grund. Die Ergebnisse sind in Tabelle 1 in der Zeile Hohentauern und in Abbildung 5 [2] dargestellt. Eine detailliertere Diskussion der Ergebnisse für dieses Testgebiet ist in (STRAUB, 2003b) zu finden.

Der Datensatz Paris wurde ebenfalls von der Firma ISTAR aufgenommen und prozessiert. Die Befliegung wurde mit dem Dreizeilenscanner HRSC durchgeführt, die optischen Daten haben eine Bodenauflösung von 0.5 m und das daraus abgeleitete Oberflächenmodell besitzt eine Auflösung von 1 m. Durch die geringe Auflösung des Oberflächenmodells führt die Anwendung der Snakes in diesem Fall zu einer deutlichen Verschlechterung der Ergebnisse (Tabelle 1, Abbildung 5 [4]). Betrachtet man nur die BHiM, dann sind die Ergebnisse jedoch akzeptabel.

Das Testgebiet Ravensburg wurde am 23. April 2001 mit dem TopoSys II Sensor aus einer Flughöhe von 830 m aufgenommen. Das Oberflächenmodell hat eine Bodenauflösung von etwa 1 m, das digitale Farbinfrarotbild 0.5 m. Abgesehen von derzeitig noch etwas zu geringen Auflösung ist ein System wie der TopoSys II Sensor sehr gut geeignet für die Extraktion von Bäumen. Mit dem Laserscanner können Punkte vom Boden und von der Baumoberfläche registriert werden, und mit dem gleichzeitig aufnehmenden optischen Zeilenscanner wird zeitgleich ein Multispektralbild in vier Kanälen (Rot, Grün, Blau, Nahes Infrarot) aufgenommen. Ein Vorteil des Oberflächenmodells aus Laserscannerdaten zeigt sich an einigen Stellen in der Szene. Trotz geringer Belaubung ist die Oberfläche der entsprechenden Baumkronen im (First-Pulse) Oberflächenmodell zu erkennen. An derselben Stelle im optischen Bild weisen allein die Schatten auf den Baum hin, der Baum selbst ist kaum zu erkennen. Der Grund für die eher unbefriedigenden Ergebnisse des Verfahrens zur Baumextraktion (vgl. Tabelle 1, Abbildung 5 [1]) ist im ungünstigen Aufnahmezeitpunkt zu suchen. Im April haben die in der Szene abgebildeten Laubbäume noch kaum Blätter, deswegen ist der NDVI sehr niedrig und demzufolge trifft die Modellannahme NDVI hoch = Baum hier nicht zu.

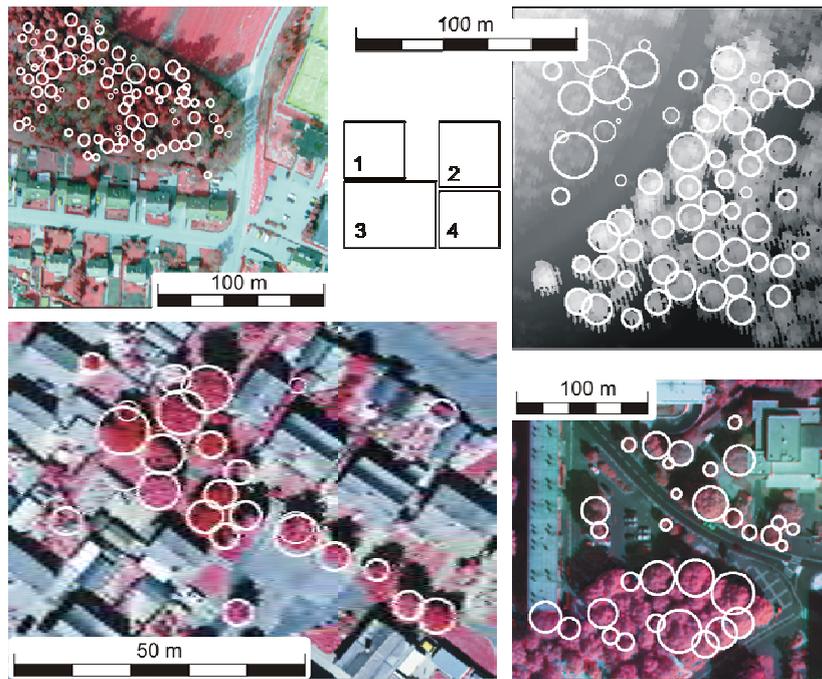


Abbildung 5: Ergebnisse der automatischen Extraktion von Bäumen. Extrahierte Bäume sind als weißer Kreis mit einer breiten weißen Linie dargestellt. Kreise die als dünne weiße Linie dargestellt sind, wurden bei der internen Bewertung verworfen.

DANKSAGUNG

Die hier verwendeten Daten wurden in sehr guter Qualität von ISTAR, dem Joanneum Research und der TopoSys GmbH zur Verfügung gestellt. Der Autor möchte sich für wertvolle Anregungen und natürlich für die Daten bei Frank Bignone, Uwe Lohr, Matthias Schardt und Roland Wack bedanken.

5 LITERATURVERZEICHNIS

- ANDERSEN, H., REUTEBUSCH, S. E., UND SCHREUDER, G. F., 2002. Bayesian Object Recognition for the Analysis of Complex Forest Scenes in Airborne Laser Scanner Data. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Vol. XXXIV. No. 3A. ISPRS. Graz, Austria. pp. 35-41.
- BEZDEK, J. C., 1992. Computing with Uncertainty. *IEEE Communications Magazine*, September(1992), pp. 24-36.
- BRANDTBERG, T., UND WALTER, F., 1998. Automated delineation of individual tree crowns in high spatial resolution aerial images by multiple scale analysis. *Machine Vision and Applications*, 11(1998), pp. 64-73.
- HILL, D. A., UND LECKIE, D. G., 1999. (eds.) *International forum: automated interpretation of high spatial resolution digital imagery for forestry, February 10-12, 1998*. Natural Resources Canada, Canadian Forest Service, Pacific Forestry Centre, Victoria, British Columbia, pp. 395.
- KASS, M., WITKIN, A., UND TERZOPOULUS, D., 1988. Snakes: Active Contour Models. *International Journal of Computer Vision*, 1(1988), pp. 321-331.
- KOENDERINK, J., 1984. The Structure of Images. *Biological Cybernetics*, (50), pp. 363-370.
- LINDEBERG, T., 1994. *Scale-Space Theory in Computer Vision*. Kluwer Academic Publishers, Boston, USA., pp. 423.
- LINDEBERG, T., 1998. Feature Detection with Automatic Scale Selection. *International Journal of Computer Vision*, 2(30), pp. 79-116.

- MARR, D., 1982. *Vision*. Freeman Company, New York.
- MAYER, H., 1998. *Automatische Objektextraktion aus digitalen Luftbildern*. Technische Universität München, München, pp. 132.
- PERSSON, A., HOLMGREN, J., UND SÖDERMAN, U., 2002. Detecting and Measuring Individual Trees Using an Airborne Laser Scanner. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 9(68), pp. 925-932.
- PINZ, A., 1988. *Ein bildverstehendes Expertensystem zur Erkennung von Bäumen auf Farb-Infrarot-Luftbildern*. Technische Universität Wien Technisch Naturwissenschaftliche Fakultät, Wien, pp. 64.
- POLLOCK, R. J., 1994. A model-based approach to automatically locating tree crowns in high spatial resolution images. *Image and Signal Processing for Remote Sensing*. Vol. 2315. SPIE. pp. 526-537.
- SAINT JOHN, R. W., 1997. Building the Perfect Tree A Lesson in Optimization an PROTO. <http://www.vrmlsite.com/jun97/a.cgi/spot2.html>.
- SCHARDT, M., ZIEGLER, M., WIMMER, A., WACK, R., AND HYYPPÄ, R., 2002. Assessment of Forest Parameter by Means of Laser Scanning. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Vol. XXXIV. No. 3A. ISPRS. Graz, Austria. pp. 302-309.
- SOILLE, P., 1998. *Morphologische Bildverarbeitung - Grundlagen, Methoden, Anwendungen*. Springer, Berlin Heidelberg New York Barcelona...., pp. 316.
- STRAUB, B.-M., 2002. Investigation of the MPEG-7 Homogeneous Texture Descriptor for the Automatic Extraction of Trees. *Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung*. Vol. 11. DGPF. Neubrandenburg, Germany. pp. 295-305/295-305.
- STRAUB, B.-M., 2003. Automatic Extraction of Trees from Aerial Images and Surface Models. *Proceedings of ISPRS Conference on Photogrammetric Image Analysis*. ISPRS. München, Germany. pp. (accepted). (a)
- STRAUB, B.-M., 2003. Automatic Extraction of Trees from Height Data using Scale Space and Snakes. *2nd International Forestry Symposium*, . Seattle, USA . pp. (in print). (b)

Ansätze zur servergesteuerten Erfassung und Auswertung von GeoObjekten

ROLF LESSING, REGIN LIPPOLD & FRANK LÜNSMANN¹

Zusammenfassung: Die kosten- und personalintensive Bearbeitung von räumlichen Daten stellt bisher immer noch ein Problem dar. Eine servergestützte Erfassung und Auswertung von GeoObjekten führt unter den Gesichtspunkten der Operationalisierung (Automatisierung, Standardisierung, Übertragbarkeit, Nachvollziehbarkeit) zu einer optimierten Lösung. Das vorgestellte Serverkonzept umfasst die Komponenten Zugriff („FrontEnd“), Kommunikations- und Koordinationsschicht sowie die eigentliche Datenverarbeitungsmodule. Diese setzen sich aus den Elementen Daten, Verfahren und Methoden, Werkzeugen, sowie Metadaten und Dienste zusammen. Bei der servergesteuerten Bearbeitung steht die Generierung von GeoObjekten, bzw. GeoProdukten im Vordergrund. Für die Erfassung (Segmentierung) von GeoObjekten aus Fernerkundungsdaten wird eine etablierte Prozesskette erläutert, wobei die eingesetzten Verfahren und Werkzeuge vorgestellt werden und auf Basis der funktionalen Verknüpfungen der modulare Aufbau analysiert wird. Dabei werden im Vortrag die Ergebnisse erster Auswertungen im Bezug auf eine servergestützte Produktgenerierung von GeoObjekten diskutiert.

1 Ausgangssituation

Die Erhebung und Aktualisierung von räumlichen Daten innerhalb einzelner Fachinformationssysteme ist noch immer ein weitestgehend durch manuelle Interaktion bestimmter und damit kostenintensiver Prozess. Eine Kostensenkung ist prinzipiell durch eine Automatisierung des Prozesses möglich. Die Entwicklungen zur Standardisierung im GIS-Bereich (OpenGIS und ISO) ermöglichen einen nachhaltigen modularen Aufbau von Servern.

Der Ansatz der Firma DELPHI IMM unterstützt den Gedanken der Operationalisierung eines Erfassungs- bzw. Auswertungsprozesses. Dieser ist durch die Aspekte Automatisierung, Standardisierung und Übertragbarkeit gekennzeichnet. Wichtige weitere Aspekte sind in diesem Rahmen die Modularisierung und der Aufbau eines Systems auf den Grundbausteinen 'Verfahren und Methode'. Neben der Nachvollziehbarkeit der einzelnen Arbeitsschritte müssen Aussagen zu Qualitäten integrativer Bestandteil einer produktorientierten Arbeitsweise sein (LESSING, LIPPOLD, LÜNSMANN, 2002). Des Weiteren spielt die frühzeitige Integration des Kunden bzw. Anwenders in den Prozess der Auswertung eine wichtige Rolle für die Sicherung der kundenspezifischen Anforderungen. Somit können Aspekte der Qualitätssicherung sowie externe Kompetenzen für die Prozessierung genutzt werden.

2 Aufbau der servergestützten Auswertung

Das Gesamtkonzept basiert auf der serverseitigen und internetbasierten Bereitstellung von Geodaten und -Informationen (s. Abb.1). Hierbei handelt es sich inhaltlich um fertige GeoProdukte (z.B. digitale Karten) oder auch um Metadaten (z.B. Auskünfte über Datenbestände). Der Zugriff auf den Server kann über einen externen Zugang erfolgen („Front End“) der z.B. an das Intranet, Internet oder via FTP realisiert werden kann. Über eine weitere Schnittstelle (Kommunikations- und Koordinationsschicht) erfolgt die eigentliche Steuerung von

¹ DELPHI IMM GmbH, 14469 Potsdam, Dennis-Gabor-Str. 2, Germany, WWW.DELPHI-IMM.DE

Zugriffen oder das Ausführen von Auswerteprozessen. Hier werden die Zugriffsmöglichkeiten und die bereitgestellten Dienste administriert. Als Dienste werden beispielsweise Kataloge oder Schlagwortlisten angeboten. In einer weiteren Stufe wird auch die Beauftragung von Datenauswertungen bereitgestellt. Diese Auswertung greift auf Verfahren und Methoden zurück, die anhand entsprechender Werkzeuge nach bestimmten Vorschriften auf Geodaten angewendet werden. Die Ergebnisse können dann mit entsprechenden Funktionen (GeoPortal, GeoShop) dem jeweiligen Nutzer, bzw. Kunden bereitgestellt werden.

Der oben beschriebene Ansatz der Firma Delphi IMM gelangt mit dem vorab beschriebenen Servermodell zu einer praxisorientierten Umsetzung. Die Auswertung von Geodaten fokussiert sich dabei auf die Produktion von sogenannten GeoObjekten.

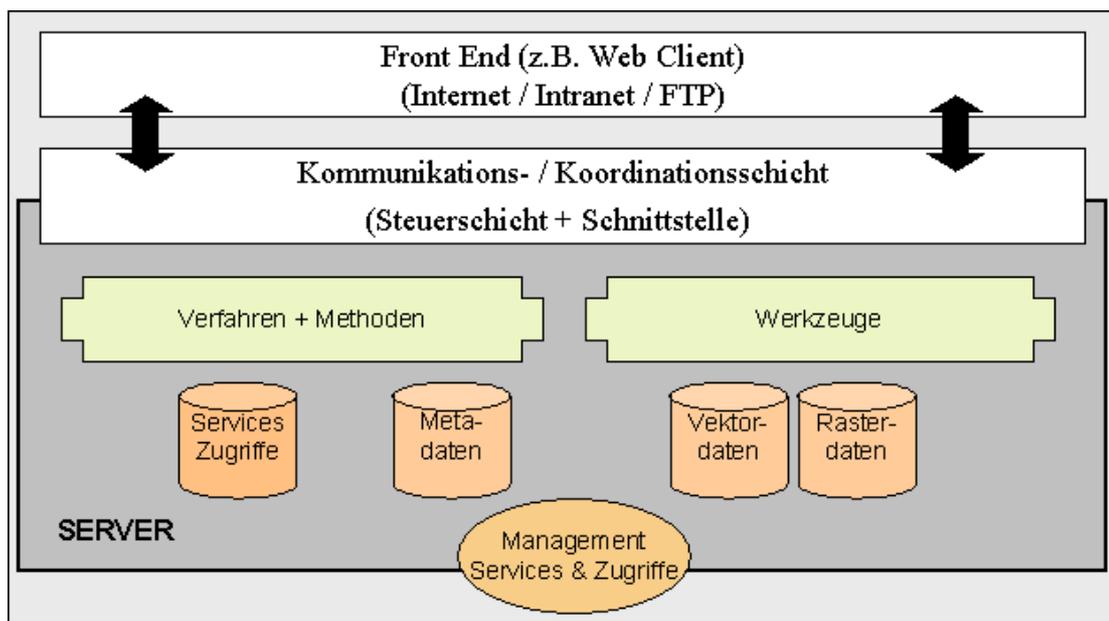


Abb.1: Komponenten Servermodell

Die derzeitige Entwicklung in der Nutzung von Fernerkundungsdaten läuft auf eine Nutzung von Fernerkundungsdaten mittels GeoObjekten hinaus. GeoObjekte werden als die kleinste Einheit verstanden, die eine bestimmte Klasse innerhalb eines Objektartenkataloges abbildet. GeoObjekte werden in der Regel repräsentiert durch Polygone, oftmals in Vereinfachung auch als Linien oder Punkte. Im Hinblick auf die Produktion von GeoObjekten ist eine servergestützte Prozesskette etabliert worden, die eine operationelle Erfassung und Bewertung von GeoObjekten ermöglicht. Neben der Abgrenzung und der Klassifizierung von GeoObjekten auf der Basis von Fernerkundungsdaten nehmen qualitative Aspekte eine zentrale Rolle ein. Grundlage der Qualitätsbewertung bilden dabei sogenannte Zielobjekte, die als Referenz die Steuerung der Prozesskette übernehmen können.

So wird die Produktion von GeoObjekten in die zwei Hauptprozessschritte Segmentierung und Klassifikation (objektorientierte Bearbeitung) unterteilt, wobei der Part Segmentierung die eigentliche Objektfindung bzw. -Erfassung, die Klassifikation dagegen die Objektbildung umfasst (s. Abb. 2). In diesen beiden Abschnitten werden jeweils Objekte generiert und thematisch einer bestimmten Nomenklatur zugeordnet. Einen wichtigen Prozessschritt stellt die

Berücksichtigung von Qualitätsmaßen und –Verfahren (Qualitätsmanagement) dar. Nach jedem Einzel-Prozessschritt muss eine Prüfung der erlangten Qualität erfolgen. Hierfür wurden mehrere Werkzeuge (Tools) von der Fa. DELPHI IMM entwickelt, die sowohl für die projektinterne als auch für die externe Qualitätssicherung einsetzbar sind. Das Tool „SEQ“ ist in der Lage, auf der Basis von vorher definierten Zielobjekten (Geometrien) die erzeugten Segmentierungsergebnisse zu vergleichen.

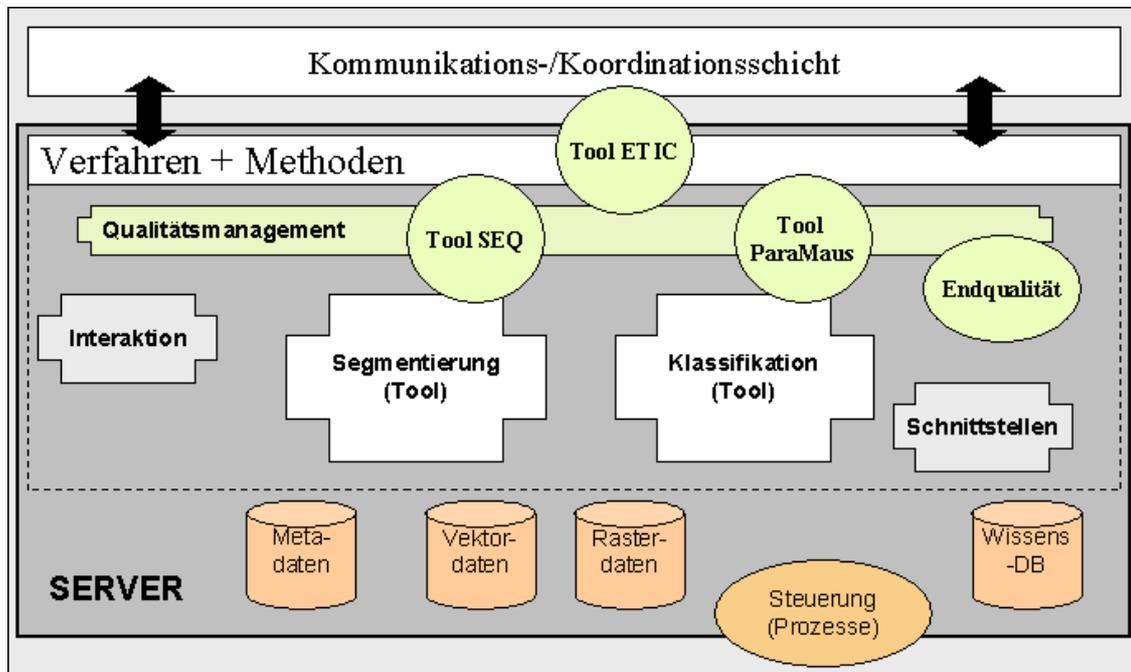


Abb. 2: Server-Komponenten thematische Auswertung

Als Ergebnis werden übertragbare und vergleichbare Parameter (Indexwerte) zur Qualitätsbewertung geliefert. Mit dem Werkzeug „ParaMaus“ wird die Identifizierbarkeit der generierten Segmente im Vergleich zu den Zielobjekten bewertet. Basis bilden dabei ausgewählte Objekteigenschaften (z.B. Standardabweichungen). Die Ergebnisse zeigen eindeutige Ergebnisse im Hinblick auf die Praktikabilität der gewählten Objekteigenschaften. Als übergeordnet kann das Tool ETIC (Evaluation tool for image classification) angesehen werden: Dieses Werkzeug dient sowohl der internen (Server) als auch der externen Validierung von Prozessergebnissen. Mit Hilfe von ETIC können die oben genannten Zielobjekte als Bewertungsbasis erstellt und an den Server übermittelt werden. Weiterhin lassen sich Zwischenergebnisse wie segmentierte Objekte einer bestimmten Zielklasse visuell oder mit Hilfe einfacher geometrischer Parameter bewerten.

Somit sind auch Aspekte der Interaktivität und der Automatisierung integriert: Für bestimmte Bereiche der thematischen Auswertung lassen sich Funktionen automatisieren, die durch Iterationen und automatische Parametervariationen zur Generierung eines Daten-Pools führen. Nach entscheidenden Prozessierungsschritten (z.B. am Ende der Segmentierung) muss die Möglichkeit bestehen, die erzeugten Zwischenergebnisse durch internen (Operator) oder externen Zugriff (z.B. Kunde) zu validieren. Gerade durch das Wechselspiel zwischen Interaktion und umfassender Automatisierung wird eine frühe Qualitätssicherung des Produktes gewährleistet.

Eine große Herausforderung stellen die benötigten Schnittstellen dar, um die Prozesskette zu realisieren. Da verschiedenste Plattformen (Programme, Werkzeuge) in den Prozess integriert sind, muss die Übergabe streng definiert werden. Gleiches gilt für die Dokumentation der durchgeführten Prozesse. Eine kontinuierliche Protokollierung ist für die Nachvollziehbarkeit und Verwaltung komplexer Prozesse unerlässlich. Zusammen mit der Anlage von Metadaten bildet sie eine weitere wichtige Basis der Serverstruktur. Aus technischer Sicht ist die Datenverwaltung (z.B. Rechte) ein essentieller Bestandteil des Servers.

Das vorgestellte Schema, bzw. die einzelnen Bausteine repräsentieren das modulare Konzept der Fa. DELPHI IMM zum Server-Aufbau. Die einzelnen Komponenten können entsprechend ihrer Funktion variabel in der Gesamt-Prozesskette implementiert werden. So kann beispielsweise das Tool ETIC zur Definition von Zielobjekten (Inputdaten) als auch zur Bewertung der generierten Segmente eingesetzt werden.

Das Ziel der serverbasierten Erfassung und Bewertung ist die Etablierung definierter Prozessketten für ausgewählte GeoObjekte bzw. GeoProdukte. Bei den GeoProdukten handelt es sich um fest definierte Prozessergebnisse, die sich aus mehreren Informationsebenen zusammensetzen können. So kann das GeoProdukt „Landbedeckung“ den eigentlichen Informationsschicht (z.B. Vektordaten), aber auch Angaben zum Generierungsvorgang oder zur kartographischen Darstellung umfassen. Dabei ergibt sich der Inhalt immer aus der vorher aufgestellten Produktdefinition. Die übergeordnete Steuerung der gesamten Prozessierung ist für die Ausführung und Überwachung der Generierung von GeoProdukten verantwortlich.

3 Servergesteuerte Erfassung von GeoObjekten aus Fernerkundungsdaten

Die Erfassung von GeoObjekten aus Fernerkundungsdaten stellt einen essentiellen Bestandteil zur Generierung von GeoProdukten dar. Die inhaltliche Komplexität dieser GeoObjekte im Kontext der Operationalisierung wurde z.B. im Projekt OFULSA untersucht (OFULSA, 2002). In diesem Verbundforschungsprojekt wurde auf Basis der visuellen Interpretation und der pixelbasierten automatischen Auswertung von Fernerkundungsdaten Methoden und Verfahren zur Generierung zuvor definierter GeoObjekte und damit verbunden auch zur Etablierung von GeoProdukten definiert, beschrieben und dokumentiert (www.delphi-imm.de/ofulsa). Hier konnten wichtige Erfahrungen im Hinblick auf eine künftige servergestützte Auswertung von Fernerkundungsdaten auf der Basis von GeoObjekten gemacht werden.

Eine erste Umsetzung servergestützter Methoden wurde anhand der Prozesskette Segmentierung (Erfassung von GeoObjekten) realisiert. Dabei stellt die Qualitätssicherung, bzw. das Qualitätsmanagement einen zentralen Gesichtspunkt nach jedem Bearbeitungsschritt dar.

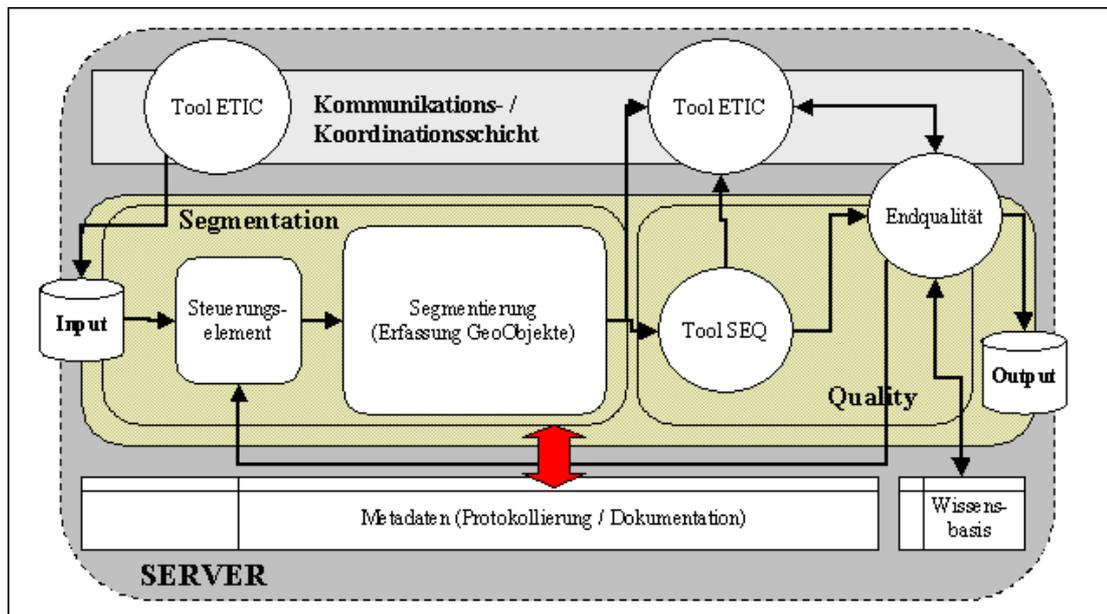
Der exemplarisch umgesetzte Prozess startet mit der automatischen Erfassung der Objekte über eine **Segmentierung** von Rasterdaten. Nachfolgend werden die Abgrenzungen der generierten Objekte durch einen Vergleich mit den Zielobjekten bewertet. Hierfür steht ein weiterer automatischer Prozessschritt zur Verfügung. Dieser basiert auf einer Softwareentwicklung (SEQ-Tool) der Firma DELPHI IMM und bietet die Möglichkeit der nutzerunabhängigen und standardisierten Qualitätsbewertung der Geometrie von GeoObjekten.

Die Prozessschritte der Erfassung und Bewertung von GeoObjekten sind in einer iterativen Prozesskette gekoppelt worden. Die Steuerung des Gesamtprozesses wird über die Festle-

gung von relevanten Qualitätsparametern vorgenommen. Dafür steht ein Werkzeug zur Prozesssteuerung in Form einer Eingabemaske zur Verfügung.

Eine standardisierte Abfolge der Prozesskette (s. Abb. 3) beginnt mit der Eingabe von Zielobjekten mit Hilfe des Tools ETIC. Hier kann der Kunde für die zu generierenden GeoProdukte repräsentative Objekte erstellen bzw. übermitteln, die dann in den Daten-Pool des Servers (Input) übertragen werden. Im Verbund mit den Basisdaten (Fernerkundungsdaten) bilden sie die Auswertungsbasis. Das Steuerungselement der Segmentierung bietet die Möglichkeit, sowohl die zu bearbeitenden Basisdaten als auch die gewünschten Parameter für die anschließende Segmentierung zu definieren und die Ausführung der Objekterfassung zu starten. Der Ablauf der Prozesskette inklusive einer notwendigen Parametervariation (z.B. Größenvariation der Segmente) wurde automatisiert, so dass Iterationen und Parameterbereiche

Abb. 3: Servergestützter Prozessablauf: Segmentierung



(z.B. Größenvariation der Segmente) automatisch variiert werden können. Dies ist besonders bei der Analyse neuer Datensätze mit wenig oder geringer Vorinformation von Bedeutung. Die Vorgaben für das Segmentierungssteuerelement werden vom Operator entweder interaktiv oder über Skripte bestimmt. Nach der Generierung der Segmente ist eine erste Qualitätsprüfung implementiert. Das Tool SEQ vergleicht dabei die erzeugten Geometrien der Segmente mit den vorgegebenen Zielobjekten. Diese Prüfung lässt sich gekoppelt mit der eigentlichen Segmentierung ausführen. Die resultierenden Qualitätsmaße (Indexwerte) liefern eine erste Entscheidungsbasis für den weiteren Prozessierungsweg. Im Hinblick auf die frühe Einbindung des Kunden in den Prozess der Qualitätsfindung kann wiederum das Tool ETIC genutzt werden. Als Schnittstelle und externes Kommunikationswerkzeug (Kunde) dient es dem Informationsaustausch bzw. der direkten Bewertung von Zwischenergebnissen. Der Kunde kann somit die Ergebnisse direkt oder im Kontext mit den ausgegebenen Qualitätsmaßen des SEQ-Tools bewerten. Am Ende dieser Prozesskette steht die abschließende Entscheidung über die Produktqualität. Hier werden alle Qualitätsmaße, bzw. interne und externe Qualitätsbewertungen zusammengefasst und bewertet. Aufgrund der Ergebnisse innerhalb dieses Vorgangs kann entschieden werden,

- a) ob die generierten Daten für die weitere thematische Auswertung (Klassifizierung) verwendet werden können (Output),
- b) ob zusätzliche Iterationsläufe sinnvoll und notwendig sind,
- c) oder ob die angewandte Strategie zur Objektgenerierung überdacht werden muss.

Der Aspekt Nachvollziehbarkeit wird innerhalb der servergestützten Auswertung auf zweifache Weise berücksichtigt: Aufgrund der vorgegebenen Modulstruktur lassen sich thematische Schritte übersichtlich verfolgen. Darüber hinaus werden alle durchgeführten Operationen kontinuierlich in Skriptform protokolliert, sowie Teil- und Endergebnisse in Metadaten-Files abgelegt. Diese Dokumentationen können somit wieder als Vorlage für neue Prozess-Zyklen dienen. Sie sind ebenfalls essentiell als Input-Parameter für das übergeordnete Prozess-Steuerungstool. Die Automatisierung findet sich in den einzelnen Werkzeugen zur Generierung und Qualitätsprüfung wieder. Es werden nicht nur definierte lineare Prozessläufe sondern auch komplexere Abläufe (z.B. Iterationen) ausgeführt. Diese angelegten Ketten können auf einer übergeordneten Ebene produktorientiert genutzt werden. Durch die Verfolgung von Standardisierungsvorgaben (OGC, ISO) wird die Übertragbarkeit des Konzeptes untermauert.

Am exemplarischen Einsatz des Tools ETIC wird die Notwendigkeit einer servergestützten Lösung zur Generierung von GeoProdukten, bzw. von GeoObjekten deutlich: In der Praxis der Auswertung von GeoDaten fehlt oftmals die entsprechende lokale Kenntnis der Bearbeiter. Dies hat meistens eine umfangreiche Beschaffung von Ground-Truth-Daten zur Folge, obwohl potentiell vorliegende Wissenskompetenzen über

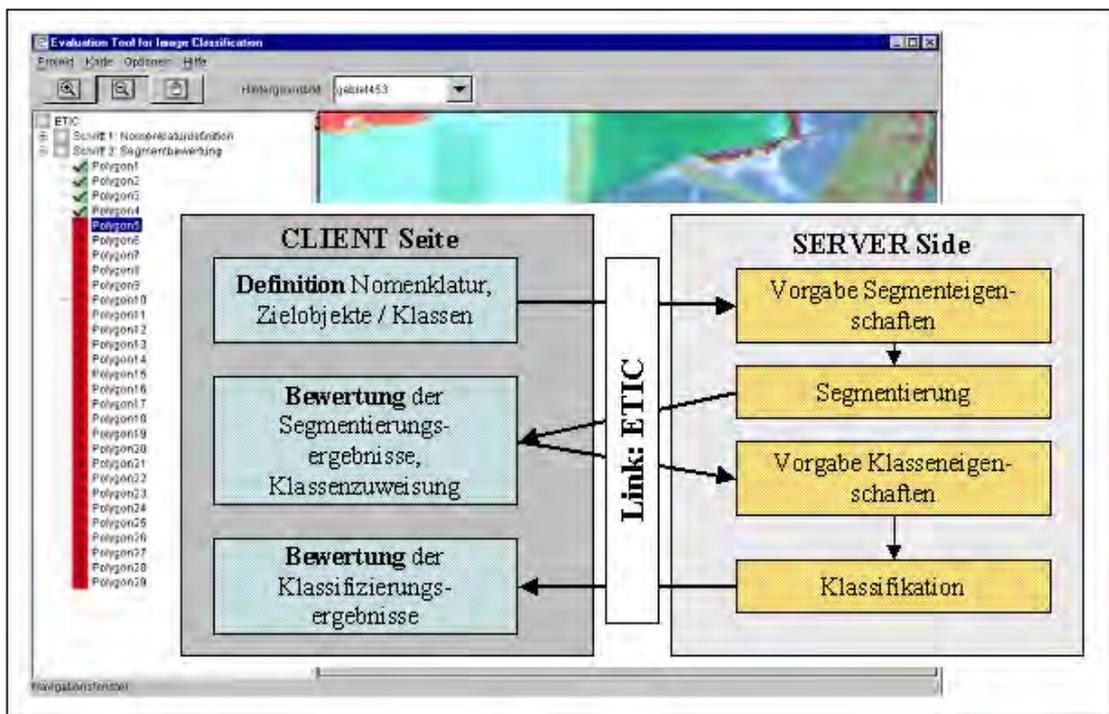


Abb.4: Servermodul ETIC (Nutzung verteilter Kompetenzen)

bestimmte Objekte (z.B. Wald) oft nur unzureichend genutzt werden. Um eine strukturierte Einbindung dieser verteilten Kompetenzen zu ermöglichen, kann das Tool ETIC eingesetzt

werden (s. Abb. 4). Über das Internet lassen sich Startinformationen (z.B. definierte Zielobjekte) schnell in den Auswertungsprozess integrieren oder Zwischenergebnisse bewerten. Diese Möglichkeit der Interaktion stellt eine neue Herangehensweise der Qualitätssicherung und somit der Prozessoptimierung dar.

Die Ergebnisse erster Auswertungen auf der Basis der vorgestellten serverbasierten Prozesskette werden im wesentlichen im Hinblick auf Modularisierung, Nutzbarkeit über das Internet sowie auf Anforderungen an die Qualitätsbeschreibung von GeoObjekten im Vortrag diskutiert.

4 Ausblick

Für die servergestützte Bearbeitung von GeoObjekten werden künftig weitere Aspekte der Automatisierung, der Nachvollziehbarkeit und der Übertragbarkeit verfolgt. Nach umfangreichen Testläufen werden die aufgestellten Qualitätsmaße einer Validierung im Hinblick auf Robustheit und Aussagekraft unterzogen. Darauf aufbauend wird die Generierung einer zusammenfassenden Bewertung der Qualität wichtiger Zwischenprodukte (z.B. nach dem Segmentierungsprozess) weiterentwickelt, um eine Entscheidungsgrundlage für den weiteren Prozessverlauf zu gewährleisten. Um die funktionalen Eingriffe in die Prozesskette zu minimieren, wird aufgrund der Testergebnisse ein Katalog der notwendigen und der entbehrlichen Interaktionen aufgestellt und bewertet. Demzufolge werden die Automatisierungsroutinen ausgebaut und getestet werden. Die Protokollierung der durchgeführten Prozessschritte im Verbund mit den genutzten Daten wird in ein Konzept zur Archivierung von Metainformationen einfließen. Basierend auf den automatisierten Abläufen und der kontinuierlichen Dokumentation wird die Entwicklung einer übergeordneten Steuerung von aufgesetzten Prozessketten einen Schwerpunkt bilden. Zur Komplettierung der Prozesskette wird der Bereich Klassifikation (Objektbewertung) als zweiter wichtiger Schritt der Auswertung von GeoObjekten implementiert werden. Produktbezogen wird der Schwerpunkt generell auf die servergesteuerte Auswertung von GeoObjekten aus Fernerkundungsdaten gesetzt. Die resultierenden Produkte werden in erster Linie robuste Maskierungen (z.B. für Wolken) oder Landbedeckungsklassen umfassen.

5 Literaturverzeichnis

- Haubrock, S.; Lessing, R., 2002: ETIC – Ein modulares Klassifikationsverfahren zur Nutzung von verteiltem Wissen. In: Strobl/Blaschke/Griesebner (Hrsg.): Angewandte Geographische Informationsverarbeitung XIV. Beiträge zum AGIT-Symposium Salzburg 2002, 148-155.
- Lessing, R., Lippold, R. & F. Lünsmann, 2002: Operationalisierung der Fernerkundung – Erfahrungsbericht aus zwei Forschungsvorhaben. In: Strobl/Blaschke/Griesebner (Hrsg.): Angewandte Geographische Informationsverarbeitung XIV. Beiträge zum AGIT-Symposium Salzburg 2002, 328-334.
- OFULSA - Operationalisierung von Fernerkundungsdaten für die Umweltverwaltung des Landes Sachsen-Anhalt / Jörg-Michael Günther [Red.], Ursula Ruge [Red.], Regin Lippold [Red.]. - Halle, 2002. - 80 S.- (Berichte des Landesamtes für Umweltschutz Sachsen-Anhalt, 37). - ISSN 0941-7281

GIS-Forschung über Waldökosysteme im Nationalpark Bayerischer Wald

STEFAN SCHEUGENPFLUG¹

Zusammenfassung: Im Rahmen der High-Tech-Offensive Bayern (HTO), einem Förderprogramm der Staatsregierung zur Stärkung der Schlüsseltechnologien wie Informations-, Kommunikationstechnologie und Umwelttechnik forschen fakultätsübergreifend verschiedene Institute und Lehrstühle der Technischen Universität München in Kooperation mit der Nationalparkverwaltung Bayerischer Wald. Das interdisziplinäre Verbundprojekt „Forschung über Waldökosysteme“ umfasst insgesamt acht Teilprojekte unterschiedlichster Forschungsfelder mit dem Schwerpunkt der Grundlagenforschung. Es werden somit eine Reihe verschiedener Fachbereiche abgedeckt wie Datenbankmodellierung, mobile Datenerfassung, Entwicklung von Simulations- und Visualisierungsroutinen, Tourismus und Landentwicklung, Laserscanning oder Chemie und Naturschutz. Die Region Nationalpark Bayerischer Wald soll durch die Projekte wirtschaftliche Innovationen erfahren und nachhaltig von den Ergebnissen profitieren.

1 Der Nationalpark Bayerischer Wald als Testgebiet für interdisziplinäre Forschung

Der Nationalpark Bayerischer Wald im Grenzgebiet Deutschland, Tschechien, Österreich ist mit mehr als 24.000 ha eines der größten Waldökosysteme Mitteleuropas. Im ältesten Nationalpark Deutschlands kann sich der Wald seit über drei Jahrzehnten weitgehend unbeeinflusst vom Menschen entwickeln. Der Nationalpark Bayerischer Wald bietet damit der Wissenschaft die einmalige Chance, großflächige Naturwälder zu untersuchen.

Die komplexen Wechselwirkungen in der Natur und die durch die Borkenkäferproblematik hervorgerufenen Bestandesstörungen können dabei oft nur interdisziplinär und durch den Einsatz innovativer Informations- und Kommunikationstechnologie erfolgreich untersucht werden. Gerade bei solch umfassenden Ökosystemen wie dem Wald ist die intensive Vernetzung der verschiedenen Wissenschaften unverzichtbar.

Forschung und wissenschaftliche Beobachtung haben im Nationalpark Bayerischer Wald eine lange Tradition. Sie sind wichtiger Bestandteil im Aufgabenspektrum des Nationalparks, schon kurz nach der Gründung im Jahr 1970 begannen die ersten Untersuchungen. Neben der Beobachtung und Kartierung des artenreichen Pflanzen- und Tierbestandes und Erforschung der Walddynamik liegt das Hauptaugenmerk der Nationalparkforschung v.a. auf der Analyse des Beziehungsgeflechts Mensch – Natur.

1.1 Chronologie einer Forschungsplattform für die Geoinformatik

1.1.1 Referenz-GIS „Nationalpark Bayerischer Wald“

Der Aufbau geeigneter Basisdatenbestände für Lehrzwecke und neue Forschungsvorhaben in GIS haben sich schon immer als zeitlich und finanziell aufwendig herausgestellt. Aus diesem

¹Dipl.-Ing. Stefan Scheugenpflug, Fachgebiet Geoinformationssysteme, Institut für Geodäsie, GIS und Landmanagement, Technische Universität München, Arcisstraße 21, 80290 München, fon: +49 89 289 / 22975, fax: +49 89 289 / 22878, e-mail: scheugenpflug@bv.tum.de

Grund wurde von 1996 bis 2002 am Fachgebiet Geoinformationssysteme der Technischen Universität München das sogenannte Referenz-Geoinformationssystem „Nationalpark Bayerischer Wald“ entwickelt, das bis heute die GIS-Ausbildung an der Hochschule massiv unterstützt und zukünftigen Forschungsprojekten als wertvolle Basis dient.

Dieser international bedeutsame, fachübergreifende Referenz-Datenbestand hat für zukünftige GIS-Projekte u.a. die Möglichkeit geschaffen, moderne GIS-Architekturen, die Nutzung neuer Datentypen für 3D und 4D-Anwendungen sowie Modellierungskonzepte zur Informationsabbildung – und Verarbeitung in GIS zu untersuchen, ohne zuerst aufwendige Vorarbeiten zur Datenakquisition durchführen zu müssen.

Die Herausforderung beim Aufbau des Referenz-GIS „Nationalpark Bayerischer Wald“ bestand vor allem in der Heterogenität und den Datenvolumina an Basis- und Fachdaten aus unterschiedlichen Informationssystemen, die recherchiert, integriert, aufbereitet, bereinigt, ergänzt und modelliert werden mussten. Am Aufbau des Referenz-GIS „Nationalpark Bayerischer Wald“ waren 8 Institutionen und damit Datenquellen direkt oder indirekt beteiligt. Die Fülle und die damit einhergehende Unüberschaubarkeit der verfügbaren Daten machte die Entwicklung eines Metadatenkonzeptes als Kernkomponente des Referenz-GIS unabdingbar. Nur mit Hilfe eines Metainformationssystems konnte der enorme Datenschatz mit mehr als 800 amtlichen, behördlichen, privatwirtschaftlichen und internationalen Geodaten-sätzen aus 85 verschiedenen Datenquellen katalogisiert, dokumentiert, fortgeführt und somit die nachhaltige Nutzung der Forschungsplattform gewährleistet werden.

Das Referenz-GIS basiert mit der dualen Datenhaltung auf dem klassischen Modellierungsansatz für Desktop-GIS und weist daher eine relativ einfache logische Architektur auf. Geometrie- und Sachdaten werden getrennt voneinander gespeichert und verwaltet. Während Geometrie-Daten in proprietären, für die schnelle grafische Darstellung optimierten Datenformaten gespeichert und vom Anwender interaktiv mit Hilfe des Betriebssystems verwaltet werden, sind komplexe Sachdaten nach dem relationalen Modell in einem gängigen RDBMS abgebildet. Geometrie- und Sachinformationen sind über gemeinsame Schlüsselfelder verknüpfbar.

1.1.2 Aufbau eines webbasierten, objektrelationalen Geodatenservers

Im Rahmen des Projektes Referenz-GIS „Nationalpark Bayerischer Wald“ konnten verschiedenste GIS-Produkte, Methoden, Dienste und 2D-, 3D-, 4D-Anwendungen realisiert werden, die eindrucksvoll belegen, dass das gewählte Systemkonzept und speziell der zugrunde liegende georelationale Modellierungsansatz eine tragfähige Lösung für den Aufbau der Forschungsplattform darstellt. Dennoch sind hier einige Defizite zu nennen, insbesondere die üblichen Konsistenzprobleme zwischen Geometrie- und Sachdaten, das fehlende Transaktionskonzept für Geometriedaten sowie der enorme Fortführungsaufwand. Jüngste Entwicklungen der GIS-Industrie sowie neuartige Modellierungstechniken, speziell die Nutzung objektrelationaler Strukturen und integrierter Datenhaltungskonzepte sind vielversprechend und fordern, Berücksichtigung innerhalb der Forschungsplattform zu finden.

Gegenstand des Projektes „Geodatenserver für forstwirtschaftliche und touristische Anwendungen“ ist demnach, das Referenz-GIS „Nationalpark Bayerischer Wald“ unter Wahrung seines bereits bestehenden Potenzials in eine objektrelational (OR) erweiterte Modellstruktur überzuführen, auf den gesicherten webbasierten Mehrbenutzerbetrieb auszurichten und somit die nachhaltige, breite und interdisziplinäre Nutzung der Forschungsplattform zu fördern.

1.1.3 Ausbau zur grenzüberschreitenden Geodateninfrastruktur

Das langfristige Konzept der Forschungsplattform sieht den Ausbau zur grenzüberschreitenden Geodateninfrastruktur (GDI) z.B. mittels OGC-WEB-Services vor, um die flexible Ad-Hoc-Nutzung verteilter, auch jenseits der Testregionsgrenzen verfügbarer Geodaten über das Internet zu ermöglichen. In diesem Zusammenhang kommt insbesondere der Registrierung und Beschreibung vorhandener Geodaten- und -dienste über standardisierte Metadaten zum intuitiven Auffinden geeigneter Geoinformationen und der Entwicklung qualitativ hochwertiger Transformationsservices zentrale Bedeutung zu. Mittels Nutzung von OGC-Schnittstellen und der Verkettung spezifischer Geodienste können somit vorhandene, internationale Geodaten detektiert, transformiert, integriert und mit lokalen Datenbeständen überlagert werden. Obwohl die dazu nötigen Techniken und Verfahren schon geraume Zeit verfügbar sind, verhindern vor allem politische und strategische Umstände die Mehrfachnutzung eigentlich vorhandener Geodaten und implizieren somit das Risiko der zeit- und kostenintensiven Mehrfacherfassungen und der Nutzung veralteter Daten.

Die Forderung nach internationaler Erweiterung der Testregion ergibt sich neben der grenznahen Lage des Nationalparks Bayerischer Wald v.a. aus dem Umstand, dass mit dem tschechischen Nationalpark Šumava ein ähnlich schützenswerter Lebensraum mit vergleichbaren Szenarien und Aufgaben direkt an den Nationalpark Bayerischer Wald angrenzt. Viele Anwendungen (z.B. Tourismus) verlangen aufgrund ihrer großräumlichen Einflussfaktoren und ihrer überregionalen Bedeutung eine transnationale Betrachtung. Neben tschechischen Daten des Šumava ist auch die Erschließung österreichischer Geodaten des Inn- und Mühlviertels vorgesehen.

2 Das Verbundprojekt „Forschung über Waldökosysteme“

Der oben erwähnte Geodatenserver für forstwirtschaftliche und touristische Anwendungen ist zentrales Teilprojekt des Verbundprojekts „Forschung über Waldökosysteme“, das im Rahmen der High-Tech-Offensive Bayern, einem Förderprogramm der Bayerischen Staatsregierung, durchgeführt wird und auf interdisziplinäre Grundlagenforschung ausgerichtet ist.

Über den Geodatenserver wird die Verknüpfung der einzelnen Teilprojekte des Verbundprojektes sichergestellt. Die verschiedenen Applikationen greifen für ihre Entwicklungen auf die Datenbestände des Geodatenservers zu und bringen die selbst erfassten Daten oder Analyseergebnisse anschließend wieder in die Forschungsplattform ein. Diese Informationen können dann mit bereits vorhandenen Daten verschnitten werden und stehen den Anwendungen erneut für Analysen zur Verfügung. Auf diese Weise ist das stetige Fortschreiben der gewonnenen Erkenntnisse in Bezug auf das Waldökosystem des Nationalparks gewährleistet.



Abb. 1: Vernetzung der Teilprojekte

Am Verbundprojekt „Forschung über Waldökosysteme“ beteiligen sich insgesamt acht Lehrstühle, Fachgebiete und Institute mit ganz unterschiedlichen, sich aber hervorragend ergänzenden Forschungsfeldern rund um die Entwicklung eines sich selbst überlassenen Ökosystems.

Projekt	Institution	Fachdisziplinen	Innovation
Geodatenserver für forstwirtschaftliche und touristische Anwendungen	Fachgebiet GIS	WEB-GIS, Geo-Datenbanken	DB-Modellierung, Integrierte Datenhaltung WEB-GIS
Sensorgestütztes Mobiles GIS	Lehrstuhl für Geodäsie	Messtechnik, mobile GIS	GPS im Wald
Dynamisches Informationssystem für Naturwälder	Lehrstuhl für Waldwachstumskunde	Visualisierung	Simulation, Prognose der Waldentwicklung
Anwendungsentwicklung „Künstliche Nase“	Institut für Atmosphärische Umweltforschung	Atmosphärische Umweltforschung	Früherkennung von Borkenkäferbefall
Entwicklung von innovativen Methoden zur Erfassung von Waldstrukturen	Fachbereich Forsteinrichtung	Laserscanning, optische Scanner	Unterstützung von Inventur und Begang im Forstwesen
Webbasiertes Touristisches Informationssystem für die Nationalparkregion	Lehrstuhl für Bodenordnung und Landentwicklung	Tourismus, Landentwicklung	Regionaler Nutzen
Wasser- und Stoffhaushalt einer sich wandelnden Naturlandschaft im Nationalpark Bayerischer Wald	Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft	Chemie, Naturschutz	Prognose und Steuerung der Auswirkungen von Bestandesstörungen auf Wassermenge und Wasserqualität

Umsetzung und Speicherung von Kohlenstoff in Waldböden des Nationalparks Bayerischer Wald	Lehrstuhl für Bodenkunde	Chemie, Bodenkunde	Potential von C-Speicherung in Böden / Naturwäldern
---	--------------------------	--------------------	---

Tab. 1: Anwendungsschwerpunkte und Innovationen des Verbundprojektes

2.1 Geodatenserver für forstwirtschaftliche und touristische Anwendungen

Das integrierte Datenhaltungskonzept des Geodatenservers basiert auf einer 3-tier GIS-Architektur mit Oracle 8i als Datenbank und der GIS-Produktpalette von ESRI. Der GIS-Client unterstützt die Konvertierung von dateibasierten Geo-Datenbeständen in ein herstellereinspezifisches, auf gewöhnlichen Datenbank-Tabellen basierendes Datenformat (Geodatabase), das zur Speicherung der Geometriedaten auf binäre (BLOB, LONG RAW) oder objektrelationale (SDO_GEOMETRY) Datentypen der Datenbank zurückgreift.

Während forstbezogene Daten des Geodatenservers für Fachanwendungen und Analysen zur Verfügung stehen, können geographische und multimediale Daten mittels WEB-Map-Server auch an Internetanwendungen weitergegeben werden, um z.B. Touristen einen Informationsservice über die Region anzubieten.

Oberste Priorität bei der Entwicklung des Zugriffskonzepts des Geodatenservers ist, dass die physikalische Trennung von forstbezogenen und touristischen Daten nach Abschluss des Projektes ohne großen Aufwand vollzogen werden kann. Sollten die im Rahmen des Projektes „WEB-GIS Tourismus“ (2.5) akquirierten und in den Geodatenserver integrierten Daten nach Abschluss der HTO-Projekte durch einen externen Betreiber verwaltet und fortgeführt werden, so muss gewährleistet sein, dass für die weitere touristische Nutzung irrelevante forstliche Daten leicht aus der Geodatenbank eliminiert werden können. Entsprechend anders verhält es sich bei einer auf forstliche Anwendungen ausgelegten späteren Nutzung des Geodatenservers.

Die Trennung zwischen forstbezogenen und touristischen Daten erfolgt durch unterschiedliche User-Schemata zweier Benutzer *FORST* bzw. *TOURISMUS*, die durch ihre Funktion als Daten-Besitzer den anwendungsspezifisch getrennten Zugriff auf die Geodatenbank aus dem GIS ermöglichen.

Für jedes der 7 mit dem Geodatenserver vernetzten Teilprojekte steht ein eigenes Datenbankschema zur Verfügung. Durch Zuweisung nutzerspezifischer Objektberechtigungen auf die Geo- und Sachdaten des Geodatenservers, wird ein feingranulares Lese- und Schreibkonzept erreicht.

Dank datensatzbegleitender Metadaten, die vom jeweiligen Nutzer nach erfolgten Analysen zusammen mit den Geodaten zurückgeschrieben werden, ist die Transparenz aller Geodatensätze für nachfolgende Zugriffe zu jeder Zeit gewährleistet. Diese Metainformation ist nach FGDC (Federal Geographic Data Committee) standardisiert und wird auf Basis von XML binär in der Datenbank gespeichert.

Neben datensatzbegleitenden Metadaten steht im Geodatenserver zur Navigation nach geeigneten Geodaten ein zentrales Metadaten-Repository zur Dokumentation des Gesamtdatenbestandes zur Verfügung. Die objektrelationalen Erweiterungen von Oracle werden genutzt, um Automatismen zur Konsistenzsicherung zwischen Geo- und Metadaten zu realisieren. Werden neue raumbezogene Objekte auf den Geodatenserver geschrieben, werden diese automatisch im Metadaten-Repository des Geodatenservers registriert.

2.2 Sensorgestütztes mobiles Geoinformationssystem

Das Sensorgestützte mobile GIS (SmobGIS) stellt ein vielseitig einsetzbares, feldtaugliches, mobiles Erfassungs- und Auskunftssystem dar, das selbst unter schwierigen Messbedingungen (Abschattung im Wald) eine Online-Positionierung sowie Visualisierung und Erfassung von grafischen und thematischen Informationen erlaubt. Dazu sind modernste Sensoren (GPS, Laser-Range-Finder, Tachymeter), Rechner (Belt-PC), Kommunikationsmittel (GPRS-Handy) und Softwarekomponenten so zu einem mobilen Gesamtsystem zu integrieren, dass gleichzeitig eine einfache Handhabung und ein verlässlicher Betrieb gewährleistet sind. Drei Anwendungsbeispiele wurden spezifiziert, um die flexiblen Einsatzmöglichkeiten aufzuzeigen: Neben der Erfassung von Dauerbeobachtungsflächen (Langfristige Beobachtung von Windwürfen) und topographischer Objekte (Punkt, Linie und Fläche) sollen vor allem Inventurdaten (Erhebung des Ist-Zustands des Waldes) mit SmobGIS bearbeitet werden. Dabei kann das mobile GIS auch als ArcIMS-Client via GPRS/UMTS-Mobilfunktechnologie auf Datenbestände des Geodatenservers zugreifen, um örtlich relevante Datenbankinhalte mit den gesamten fachübergreifenden Informationen im Feld zu bearbeiten. Nach erfolgter Datenerfassung werden die Daten an den Geodatenserver zurückgegeben. Als Applikationssoftware für SmobGIS kommt ArcPad und Application Builder 6.0 von ESRI zum Einsatz.

2.3 Dynamisches Informationssystem für Naturwälder

Die Entwicklung eines „Dynamischen Informationssystems für Naturwälder“ erlaubt eine möglichst realistische dreidimensionale Darstellung der Auflösungsebenen Einzelbaum, Bestand und Waldlandschaft. Das Informationssystem liest relevante Daten vom zentralen Geodatenserver und verarbeitet diese weiter. Die Daten werden ergänzt und so aufbereitet, dass sie durch zu entwickelnde Visualisierungsroutinen in dreidimensionale Bestandes- und Landschaftsbilder umgesetzt werden können. Über die Anbindung an den Wachstumssimulator SILVA ist es zudem möglich, die Walddaten auszuwerten und das Wachstum fortzuschreiben. Diese Kopplung lässt eine visuelle Verfolgung des Wachstums von Beständen und der Entwicklung der Waldlandschaft als dreidimensionale Abbildung zu. Darüber hinaus können für die Naturwälder über den Wachstumssimulator SILVA Indizes berechnet werden, die zusammen mit den erstellten Bildern Aussagen über die ökologische und sozioökonomische Funktion des Naturwalds erlauben.

2.4 Entwicklung eines mobilen Sensors zur punktgenauen Früherkennung von Borkenkäferbefall (Künstliche Nase)

Fichtenwälder erleiden durch den immer wiederkehrenden Borkenkäferbefall erheblichen Schaden. Der Buchdrucker besiedelt seinen Wirtsbaum in einem mehrstufigen Prozess (Primärbesiedlung, Massenbefall, Ablenkung), an dem Signalstoffe (Pheromone) wesentlich beteiligt sind.

Ziel des Teilprojektes ist es, neue Techniken auf dem Gebiet der Analyse von gasförmigen Spurenstoffen, kombiniert mit Neuentwicklungen aus der Computer, Informations- und Geoinformationstechnik zu nutzen und ein integriertes System zu entwickeln, das operationell im Freiland zur

- schnellen, positionsgenauen Früherkennung von Borkenkäferbefall,
- zur rechnergestützten Aktualisierung von Befallskarten

- zum Erstellen von schnellen Prognosen über das Ausbreitungsmuster
- zum Erkennen von resistenten Forstflächen

eingesetzt werden kann. Zur GIS-gestützten Visualisierung und weiteren Analyse werden die Daten z.B. über GPRS an den zentralen Geodatenserver übermittelt.

2.5 Entwicklung eines Webbasierten Touristischen Geoinformationssystems für die Nationalparkregion

Anhand der Konzeption und Entwicklung eines webbasierten touristischen Geoinformationssystems sollen die Vorteile und der Nutzen dieser Technologie für Fremdenverkehrsregionen am Beispiel der Nationalparkregion Bayerischer Wald aufgezeigt werden. Dabei werden Methoden der Landentwicklung eingesetzt, um den Tourismus und die Region im Zusammenhang mit anderen Strukturmaßnahmen zu stärken. Das Teilprojekt nützt dabei das für die Region Bayerischer Wald bereits vorhandene Informationsangebot im Internet durch geeignete Konzepte.

Aktuell verfügbare Tourismus-Portale bieten zwar z.B. Computer-gestützte Buchungs- und Reservierungssysteme an, können derzeit jedoch noch keinen Anspruch auf Vollständigkeit erheben, da Defizite entweder hinsichtlich interaktiver GIS-Funktionalität, oder des Detailreichtums der dargebotenen Information bestehen. Bestandteil des Projekts ist ferner die Erarbeitung eines regionalen Betreiberkonzepts, um die Einführung des entwickelten Systems in der Region nach Projektende zu begünstigen.

2.6 Umsetzung und Speicherung von Kohlenstoff in Waldböden des Nationalpark Bayerischer Wald

In diesem Projekt werden in enger Zusammenarbeit mit der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, der Nationalparkverwaltung und dem Fachgebiet Geoinformationssysteme der TUM die Auswirkungen von starkem Borkenkäferbefall sowie von unterschiedlicher forstlicher Nutzungsintensität auf die Umsetzung und Speicherung von Kohlenstoff in Waldböden des Nationalparks Bayerischer Wald untersucht. Hierbei werden modernste chemische Analysemethoden zur Charakterisierung und Quantifizierung unterschiedlicher Boden-Humus-pools mit verschiedenartiger Struktur und Umsetzungsbereitschaft eingesetzt. Die an repräsentativen Bodenprofilen erhobenen Ergebnisse werden unter Einsatz von GPS und GIS regionalisiert, d.h. in flächenbezogene Information umgesetzt.

2.7 Wasser- und Stoffhaushalt einer sich wandelnden Naturlandschaft im Nationalpark Bayerischer Wald

Aufbauend auf den bestehenden hydrologischen Untersuchungsprogrammen im Nationalparkgebiet werden die umfangreichen experimentellen Ansätze und die daraus abgeleiteten Ergebnisse und Prognosen zum Wasser- und Stoffhaushalt auf Bestandes- bzw. Einzugsgebietsebene konzeptionell ergänzt bzw. erweitert, um eine Regionalisierung biogeo- und hydrochemischer Prozesse auf Landschaftsebene realisieren und damit Aussagen und Prognosen zu Wasserhaushalt und Wasserqualität für das gesamte Nationalparkgebiet ableiten zu können. Damit greift das Teilprojekt eine wegen der möglichen negativen Auswirkungen des Absterbens von Beständen auf Menge und Qualität der Trinkwasserressourcen aktuelle und für den Nationalpark und sein Umland zentrale Fragestellung auf.

Das Nationalparkgebiet besitzt somit Modellcharakter für die Entwicklung von hydrologischen Regionalisierungsmethoden, deren Ergebnisse für den Wasserschutz in den Wäldern des Nationalparks wie auch für die forstlich bewirtschafteten Mittelgebirgswälder des Bayerischen Waldes zunehmend Bedeutung gewinnen werden, nicht zuletzt auch in Hinblick auf zukünftige Änderungen im Wasserregime infolge der zu erwartenden Klimaveränderungen.

2.8 Entwicklung von innovativen Methoden zur Erfassung von Waldstrukturen im Nationalpark Bayerischer Wald

Die Entwicklung neuer Technologien hat Produkte auf den Markt gebracht, deren Einsatz revolutionierende neue Möglichkeiten bei der Erfassung von Waldstrukturen erwarten lassen. Vor allem der Einsatz von flugzeuggetragenen Laserscannern, die in der Lage sind 80.000 Entfernungsmessungen pro Sekunde auszuführen, scheint eine ideale Methode für die Gewinnung waldkundlicher Daten wie Baumart und -schäden. Während man mit dem Luftbild nur die Oberfläche der Bestände analysieren kann, dringen die Laserstrahlen in die Bestände ein und erlauben eine Interpretation der Bestandsstrukturen, evtl. sogar der Verjüngungssituation. Durch Kombination mit optischen Scannern soll die Leistungsfähigkeit des Verfahrens noch weiter gesteigert werden.

Ziel des Projektes ist es, die Wälder in einem Testgebiet des Nationalparks sowohl mit herkömmlichen, als auch mit den neuen Methoden genau zu untersuchen und die Ergebnisse durch den Einsatz von GIS zu vergleichen. Basierend auf diesen Vergleichen und durch Kombination verschiedener Methoden sollen neue Verfahren für Inventuren in Naturwäldern entwickelt werden.

3 Zusammenfassung und Ausblick

Durch das Verbundprojekt „Forschung über Waldökosysteme“ können für die Region bedeutsame Geodaten, die seit langem mit erheblichem finanziellen und personellen Aufwand erhoben bzw. verwaltet werden, erstmalig einem breiten Nutzerkreis zugänglich gemacht werden.

Das Projekt beinhaltet anwendungsorientierte Forschung und Entwicklung im Bereich der Informations- und Kommunikationstechnologien. Zu den wesentlichen Innovationen zählen u.a. die webbasierte, fachübergreifende Integration und Nutzbarmachung von Vektor-, Raster- und Metadaten sowie die applikationsspezifische Vergabe von Nutzungsrechten für den Mehrbenutzerbetrieb.

Das Projekt hat einen signifikanten Anteil an Forschung im Bereich der Geoinformatik, des Forstwesens und dem Tourismus, welche durch die übergreifende Kooperation von Informatik, Geoinformatik/GIS, Forstwissenschaft, Geodäsie und Landmanagement abgedeckt wird. Damit wird dem Ziel der Förderung von Kooperationsprojekten zwischen Unternehmen und Hochschulen und deren intensiven Vernetzung zur gemeinsamen Grundlagenforschung Rechnung getragen.

Neben dem sukzessiven Ausbau zur grenzüberschreitenden Forschungsplattform sind als Nachfolgeprojekte Initiativen zur mobilen Nutzung der akquirierten Daten für touristische und naturschutzrelevante Anwendungen geplant.

Literaturverzeichnis

- CZAJA, J., 2003: HTO-Teilprojekt 33-2: „Sensorgestütztes mobiles Geoinformationssystem“, Zwischenbericht
- CZAJA, J., 2003: Positionierung mit Qualitätskontrolle beim Einsatz mobiler GIS im Nationalpark Bayerischer Wald
- HEURICH, M., 2003: HTO-Teilprojekt 33-8: „Entwicklung von innovativen Methoden zur Erfassung von Waldstrukturen“, Zwischenbericht
- HUBER, U., 2002: Das Referenz-Geoinformationssystem „Nationalpark Bayerischer Wald“, eine fachübergreifende Forschungsplattform für die Geoinformatik, Dissertation
- KLÖCKING, B., 2003: HTO-Teilprojekt 33-7: „Wasser- und Stoffhaushalt einer sich verändernden Naturlandschaft im Nationalpark Bayerischer Wald“, Zwischenbericht
- NEUMEIER, S., 2003: HTO-Teilprojekt 33-5: „Implementierung eines webbasierten touristischen Geoinformationssystems mit Methoden und Instrumenten der Landentwicklung für die Nationalparkregion Bayerischer Wald“, Zwischenbericht
- PRETZSCH, H., SEIFERT, S., 2003: Modellierung des Waldwachstums und Visualisierung von Waldlandschaften auf Einzelbaumbasis, 8. Münchner Fortbildungsseminar Geoinformationssysteme
- SCHEUGENPFLUG, S., 2003: HTO-Teilprojekt 33-1: „Geodatenserver für forstwirtschaftliche und touristische Anwendungen“, Zwischenbericht
- SCHEUGENPFLUG, S., 2002: Forschung über Waldökosysteme, 7. Münchner Fortbildungsseminar Geoinformationssysteme, TU München
- SCHEUGENPFLUG, S., 2003: Wissenschaftlich-Technische Dokumentation: Geodatenserver für forstwirtschaftliche und touristische Anwendungen, interne Dokumentation
- SEIFERT, S., 2003: HTO-Teilprojekt 33-3: „Dynamisches Informationssystem für Naturwälder“, Zwischenbericht
- SPIELVOGEL, S., 2003: HTO-Teilprojekt 33-6: „Umsetzung und Speicherung von Kohlenstoff in Waldböden des Nationalpark Bayerischer Wald“, Zwischenbericht
- STEINBRECHER, R., 2003: HTO-Teilprojekt 33-4: „Entwicklung eines mobilen Sensors zur punktgenauen Früherkennung von Borkenkäferbefall durch *Ips typographus*“, Zwischenbericht

Laser-Geländemodelle: Zusammenspiel von Filterung und Datenreduktion

CHRISTIAN BRIESE¹ & KARL KRAUS¹

Zusammenfassung: Das flugzeuggetragene Laserscanning ermöglicht eine sehr detaillierte Abtastung von Oberflächen. Die sehr große Punktdichte, die das Laserscanning liefert, ist ein sehr großer Vorteil für die Genauigkeitssteigerung und für die Elimination der Nicht-Geländepunkte, aber andererseits ein großer Nachteil für das Datenmanagement. Daher sind qualifizierte Methoden zur Datenreduktion notwendig. Der Schwerpunkt dieser Publikation liegt in der Präsentation einer Methode zur Datenreduktion dichter rasterförmiger Geländemodelle. Es werden jene Rasterpunkte ausgewählt, die zur Oberflächenbeschreibung mit einer gewünschten Approximationsgenauigkeit notwendig sind. Das Verfahren ist an die in der Photogrammetrie benutzte stufenweise Datenerfassung (progressiv sampling) angelehnt. Anhand praktischer Beispiele werden die Ergebnisse der Datenreduktion vorgestellt und diskutiert.

1 Einleitung

Seit etwas mehr als 10 Jahren werden Laser in Flugzeugen zur Erfassung topographischer Daten eingesetzt. Der Durchbruch der Aufnahmemethode wurde vor allem durch die Erweiterung des Abtastmechanismus (Strahlableitung quer zur Flugrichtung) erreicht. Es wurde dadurch möglich, Oberflächen sehr detailliert mit einer sehr großen Punktdichte flächenhaft (feine Diskretisierung) zu erfassen.

Zur Erstellung digitaler Geländemodelle aus Laser-Scanner-Daten ist allerdings eine Klassifizierung der gemessenen Punkte in Gelände- und Nicht-Geländepunkte notwendig. Auf Basis dieser Klassifizierung (Filterung) kann in der Folge mit Hilfe der klassifizierten Geländepunkte ein digitales Geländemodell (DGM) berechnet werden. Im Rahmen dieses Prozesses sollen redundante Messungen (lagemäßig eng benachbarte Oberflächenpunkte) zu einer Verbesserung des Klassifikationsergebnisses und auch zu einer Genauigkeitssteigerung (durch weitgehende Elimination zufälliger Fehler) beitragen. Durch die feine Oberflächenerfassung wird die Berechnung engmaschiger, detailreicher Geländemodelle ermöglicht. Die dabei anfallende große Datenmenge der DGMs stellt allerdings einen großen Nachteil für das Datenmanagement und für weiterführende Analysemethoden (z.B. in der Hydrologie) dar. Es sind daher neben Methoden zur DGM-Berechnung auch Algorithmen zur qualifizierten Datenreduktion des DGMs gefragt. Die Datenreduktion - nach einer vom Benutzer vorgebbaren Approximationsgenauigkeit - soll erst nach der DGM-Berechnung, bei der die gesamte zur Verfügung stehende Information genutzt wird, angewandt werden.

2 Filterung zur Erstellung digitaler Geländemodelle aus Laser-Scanner-Daten

Unser Ziel im Rahmen der DGM Erstellung ist die Berechnung einer Oberfläche unter der Berücksichtigung *zufälliger Fehler*². Das berechnete DGM soll keine durch das Messrau-

¹ DI Christian Briese und Prof. Dr. Karl Kraus, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, Technische Universität Wien, Gußhausstr. 27-29, 1040 Wien, e-mail: {cb, kk}@ipf.tuwien.ac.at

schen bedingte Rauigkeit aufweisen. Neben diesen zufälligen Fehlern sollen aber im Rahmen der möglichst automatischen Auswertung auch *grobe Fehler* (Nicht-Geländepunkte in den Laser-Scanner-Daten) erkannt und eliminiert werden. *Systematische Fehler* (z.B. Synchronisationsfehler während einer Laser-Scanner-Befliegung) und eventuell vorhandene La-gefehler sollten mit geeigneten Methoden vor der DGM-Berechnung korrigiert werden, da es im Rahmen der Oberflächenmodellierung auf Basis einer Punktwolke schwierig ist systematische Fehler - ohne zu Hilfenahme zusätzlicher Information - zu eliminieren.

Zufällige Fehler: Die Punkte auf der Geländeoberfläche haben in Abhängigkeit vom Messsystem eine mehr oder weniger zufällige Verteilung in Bezug zur „wahren“ Geländeoberfläche. Im allgemeinen wird diese zufällige Fehlerverteilung durch die Standardabweichung des Messsystems bestimmt und sollte im Rahmen der DGM-Berechnung berücksichtigt werden.

Grobe Fehler: Grobe Fehler können in allen Datensätzen auftreten. Vor allem automatische Systeme – wie z.B. Laserscanner oder *matching*-Methoden in der digitalen Photogrammetrie – produzieren eine große Anzahl grober Fehler in Bezug zur „wahren“ Geländeoberfläche. Eine automatische Methode zur Elimination oder zumindest zur Reduktion dieser groben Fehler im Rahmen der DGM-Modellierung ist daher notwendig.

Systematische Fehler: Im Fall der systematischen Fehlern kann zwischen großen systematischen Fehlern (z.B. Fehler in der Trajektorie) und kleinen systematischen Fehlern (z.B. zu kurz gemessene Distanzen verursacht durch Reflexionen in niedriger Vegetation) unterschieden werden. Große systematische Fehler zeigen ein ähnliches Verhalten wie grobe Fehler und können auf ähnliche Art und Weise eliminiert werden, während kleine systematische Fehler sich ähnlich wie zufällige Fehler verhalten. Diese kleinen Fehler – oftmals beim Laserscanning in Streifenüberlappungszonen erkennbar - können (v.a. wenn keine redundanten Beobachtungen vorliegen) nicht vollständig eliminiert werden.

Zur Elimination von Nicht-Geländepunkten in Laser-Scanner-Daten existiert eine Vielzahl unterschiedlicher Methoden (z.B. AXELSSON, 2000; ELMQUIST ET AL, 2001; VOSSELMANN und MAAS, 2001). Im Gegensatz zu diesen Methoden zeichnet sich die in KRAUS und PFEIFER (1998) präsentierte Methode der *Robusten Interpolation* auf Basis der *Linearen Prädiktion* (KRAUS, 2000) dahingehend aus, dass sie neben der Elimination von groben Fehlern auch die Möglichkeit bietet, zufällige Fehler zu berücksichtigen. Durch ihre Erweiterung zu einem hierarchischen Ansatz (BRIESE und PFEIFER, 2001) können auch in großen Bereichen ohne Geländepunkte (z.B. im Stadtgebiet) DGMe berechnet werden. Die Berücksichtigung zufälliger Messfehler im Rahmen der Linearen Prädiktion wird durch Subtraktion der a priori bekannten Varianz der gemessenen Punkte von der Varianz der gemessenen Höhen erreicht (Details siehe KRAUS (2000)). Die Elimination von Nicht-Geländepunkten erfolgt in einem iterativen Prozess unter der Berücksichtigung individueller Gewichte für jeden gemessenen Punkt. Die Gewichte für die jeweilige Iteration werden auf Basis der Filterwerte der vorangehenden Berechnung mit Hilfe einer adaptiv berechneten schiefen und exzentrischen Gewichtsfunktion bestimmt.

Mit Hilfe dieser Methoden, die in dem Geländemodellprogramm SCOP (SCOP, 2003) implementiert sind, können großräumige digitale Geländemodelle aus Laser-Scanner-Daten abge-

² Im Rahmen dieser Publikation gelten folgende Definitionen: Der Begriff *Fehler* dient als Bezeichnung für die Diskrepanz zwischen dem z-Wert des gemessenen Punktes und der „wahren“ Geländehöhe. Unter dem *Residuum* verstehen wir die „wahre“ Geländehöhe (t) minus der beobachteten Höhe (z). Als *Filterwert* (f) wird das negative *Residuum* ($t + f = z$) bezeichnet. Wir beschränken uns auf 2.5D-Anwendungen. Die *Fehler* werden nur in z-Richtung gemessen.

leitet werden. Als Datenstruktur zur Verspeicherung des interpolierten DGMs verwendet SCOP ein enges regelmäßiges Gitter (bzw. Raster). Stehen für die Oberflächenbeschreibung zusätzliche Strukturinformationen zur Verfügung, kann diese zusätzliche Vektorinformation in das Gittermodell integriert werden. Das Ergebnis dieser Integration ist ein hybrides Oberflächenmodell, das neben den regelmäßigen Gitterlinien auch aus (vektoriellen) Geländekanten aufgebaut ist (siehe Abb. 1). Aufgrund der angewandten Filtermethoden zur Elimination von Nicht-Geländepunkten und den zufälligen Messfehlern wird durch dieses Modell eine glatte – von den Messfehlern bereinigte – Fläche festgelegt.

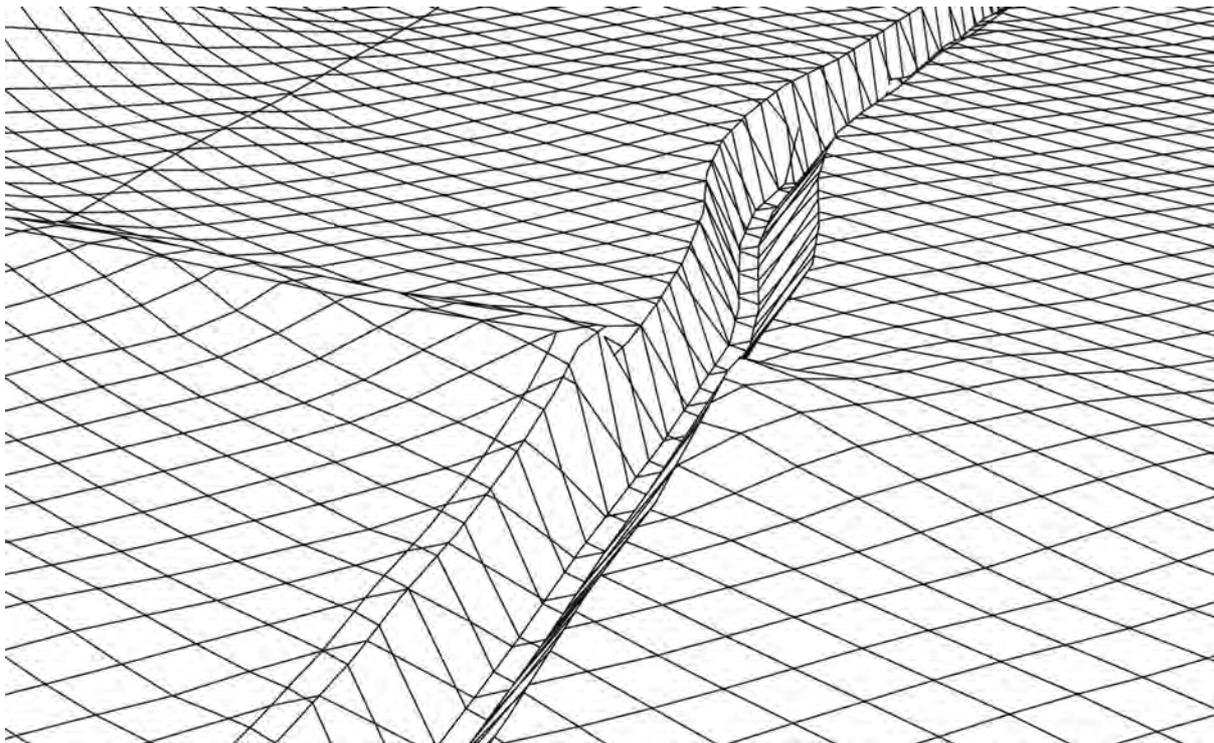


Abb. 1: Hybrides Geländemodell bestehend aus Gitterlinien und integrierten Geländekanten

3 Datenreduktion des gefilterten Geländemodells

Zur Datenreduktion existieren bereits einige Verfahren (vgl. KOBBELT ET AL., 1998) auf Basis von Triangulationen, die sehr rechenintensiv sind. Eine weniger rechenintensive Methode zur Ausdünnung unregelmäßig verteilter Massenpunkte auf Basis von Triangulationen, die die Charakteristika der Datenerfassung mit einem Laserscanner und mit dem Fächerecholot berücksichtigt, hat LENK (2003) präsentiert. Mit Hilfe dieser Methode können ansprechende Ergebnisse in einer verhältnismäßig kurzen Zeit erzielt werden. Aus Sicht der Autoren dieses Beitrags gibt es aber zum Lenk'schen und ähnlichen Vorschlägen den Einwand, dass im Rahmen dieser Ausdünnung unregelmäßig verteilter Massenpunkte Originalmessungen ohne eine Verwertung für das Endergebnis eliminiert werden. Wie bereits erwähnt, verschenkt man dadurch jene beachtliche Genauigkeitssteigerung, die mit redundanten Messungen erreicht werden kann. Außerdem sind die Filterverfahren zur Elimination von Nicht-Geländepunkten umso leistungsfähiger, je mehr redundante Messungen vorliegen. Besonders Punkte mit identischen bzw. nahezu identischen XY-Koordinaten – keine Seltenheit in den Überlappungszonen der Laserscanner-Streifen – sind für die Filterung besonders wertvoll, da sie aus

sie aus unterschiedlichen Richtungen aufgenommen wurden (in einer Richtung kann es ein Geländepunkt sein, in der anderen ein Vegetationspunkt).

Als Alternative zu den auf Triangulationen basierenden Ansätzen soll nun im Folgenden ein rasterbasierter Ansatz präsentiert werden (eine weitere Publikation dieser Methode wurde zur Veröffentlichung in der *Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement* des Deutschen Vereins für Vermessungswesen eingereicht (BRIESE UND KRAUS, 2003)). Diese Methode führt keine Reduktion der Originalpunktswolke durch, sondern reduziert das aus allen Originaldaten abgeleitete gefilterte Geländemodell.

3.1 Der Reduktionsprozess

Der hier vorgestellte Prozess zur Datenreduktion von rasterbasierten Geländemodellen ist auf die in der Photogrammetrie benutzte stufenweise Datenerfassung (progressive sampling, MAKAROVIC, 1976, KRAUS, 2000) angelehnt. Es werden vom Groben ins Feine jene Rasterpunkte selektiert, die zur Beschreibung der Geländeoberfläche mit einer gewünschten Approximationsgenauigkeit notwendig sind. Die Reduktion erfolgt in folgenden Schritten:

- a) Zunächst werden in jedem Punkt des engmaschigen Gitters aus den drei benachbarten Punkten – in X- und Y-Richtung getrennt – die Krümmungsradien R_X und R_Y sowie die Geländeneigungen $\tan\alpha_X$ und $\tan\alpha_Y$ berechnet.
- b) Anschließend wird mit den Krümmungsradien R_X und R_Y sowie den Neigungswinkeln α_X und α_Y berechnet, wie weit der nächste Oberflächenpunkt entfernt sein darf, um den Approximationsfehler kleiner als den Schwellwert dZ_{\max} zu halten (in Abb. 2 wurde ein X-Profil gewählt). Diese Entfernungen E_X und E_Y bekommt man aus den folgenden Beziehungen (die Ableitung findet man unter anderem bei KRAUS (2003)):

$$E_X \approx \sqrt{dZ_{\max} 8R_x \cdot \cos^3 \alpha_x} \quad E_Y \approx \sqrt{dZ_{\max} 8R_y \cdot \cos^3 \alpha_y} \quad (1)$$

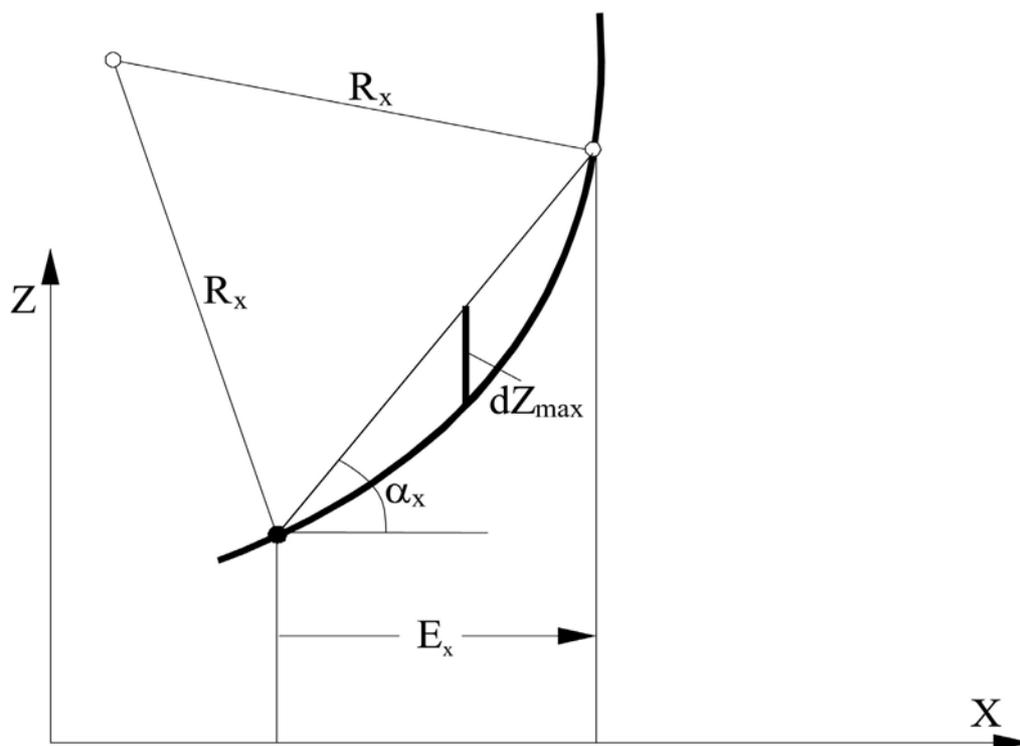


Abb. 2: Krümmungsradius und Approximationsfehler in einem ZX-Profil

- c) Für die Elimination der überflüssigen Punkte im dichten regelmäßigen Gitter wird die kleinere Entfernung E gewählt.
- d) Um eine Entfernungsobergrenze der verbleibenden Gitterpunkte zum nächsten Nachbarn zu garantieren, wird der Ausdünnungsprozess mit einer sehr groben Gitterweite begonnen.
- e) Es wird geprüft, ob alle feinen Gitterpunkte innerhalb des groben Gitters das Kriterium E *größer grobe Gitterweite* erfüllen. Ist dies der Fall, dann genügt es die Oberfläche mit dem groben Gitter unter der Einhaltung des maximalen Approximationsfehlers dZ_{\max} zu repräsentieren. Im anderen Fall ist es notwendig das grobe Gitter solange zu verfeinern bis das Kriterium erfüllt ist oder die feinste Auflösung erreicht ist.

3.2 Simuliertes Beispiel

Der Ablauf der Datenreduktion anhand eines dichten regelmäßigen Gitters, das in der Folge als Ausgangsgitter bezeichnet wird, wird nun im Detail an dem in der Abbildung 3 dargestellten simulierten Beispiels demonstriert:

Für die maximale Entfernungsobergrenze wurde die Gitterweite Δ^0 gewählt. Damit werden 9 Gitterpunkte festgelegt ($P_{1,1}, P_{1,9}, P_{1,17}, P_{9,1}, \dots$). In jeder Gittermasche (einschließlich der Begrenzungslinien der jeweiligen Gittermasche) im Δ^0 -Niveau wird anschließend untersucht, ob es mindestens einen Punkt im Ausgangsgitter mit einer Entfernung E gibt, die kleiner als die Gitterweite Δ^0 ist. In unserem Beispiel trifft diese Aussage für die Gittermaschen $\Delta_{11}^0, \Delta_{12}^0$ und Δ_{21}^0 zu; in diesen Gittermaschen ist deshalb das Δ^1 -Niveau einzuziehen und die Gitterpunkte $P_{1,5}, P_{1,13}, P_{5,1}, P_{5,5}, P_{5,9}, P_{5,13}, P_{5,17}, P_{9,5}, \dots$ werden hinzugefügt. In den Gittermaschen des Δ^1 -Niveaus wird in der Fortsetzung untersucht, ob es mindestens einen Punkt im Ausgangsgitter mit einer Entfernung E gibt, die kleiner als die Gitterweite Δ^1 ist. In unserem Fall trifft diese Aussage für die Gittermaschen $\Delta_{22}^1, \Delta_{23}^1$ und Δ_{32}^1 zu; in diesen Gittermaschen

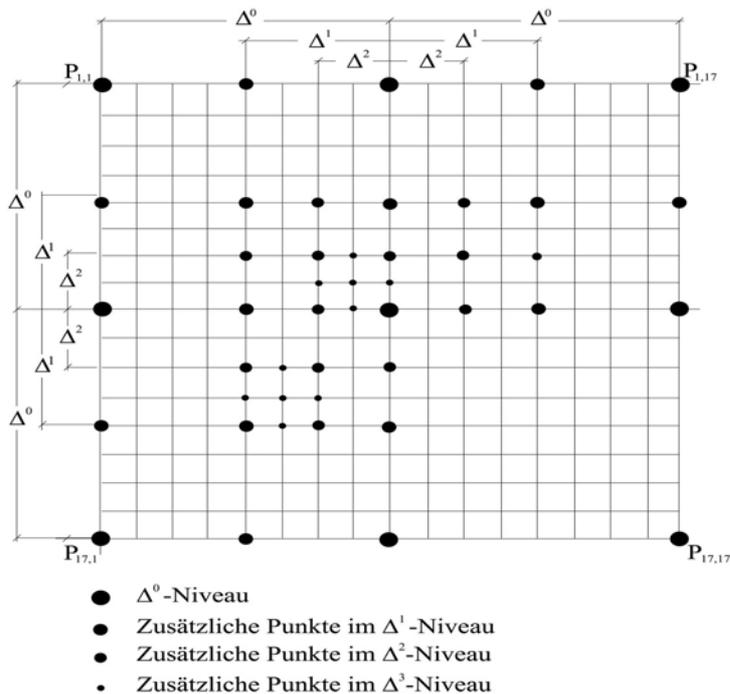


Abb. 3:
Engmaschiges Ausgangsgitter
und Markierung der Punkte nach
der Ausdünnung

ist deshalb das Δ^2 -Niveau einzuziehen und die Gitterpunkte $P_{5,7}$, $P_{5,11}$, $P_{7,5}$, etc. sind festzulegen. In den Gittermaschen des Δ^2 -Niveaus wird zum Schluss untersucht, ob es mindestens einen Punkt im Ausgangsdatenmaterial mit einer Entfernung E gibt, die kleiner als die Gitterweite Δ^2 ist. In unserem Fall trifft diese Aussage für die Gittermaschen Δ_{44}^2 und Δ_{63}^2 zu; in diesen Gittermaschen sind jeweils fünf weitere Gitterpunkte hinzuzufügen. Insgesamt reduziert sich in diesem Ausdünnungsprozess die Anzahl der Gitterpunkte von 289 ($=17^2$) auf 45.

4 Praktische Beispiele

In der Abbildung 4 ist das Ergebnis des Ausdünnungsprozesses eines kleinen Beispiels (Ausschnitt von 110m x 130m) visualisiert. Das Ausgangsgitter hat eine Weite von 1m. Für die Entfernungsobergrenze wurde die Gitterweite $\Delta^0 = 4m$ gewählt. Das dazwischen liegende Δ^1 -Niveau beträgt 2m. Der Schwellwert dZ_{\max} für die Approximation beträgt 25cm. In Bereichen mit geringer Krümmung – aus der Schummerung ersichtlich – ist die Punktdichte reduziert, in Bereichen mit starker Krümmung bleibt das Ausgangsgitter erhalten. Am Gebietsrand, an dem die Krümmung schwer abzuschätzen ist, belässt der implementierte Prozess das Ausgangsgitter.

Anhand großräumiger praktischer Beispiele sollen nun weitere Ergebnisse des Ausdünnungsprozesses präsentiert werden.

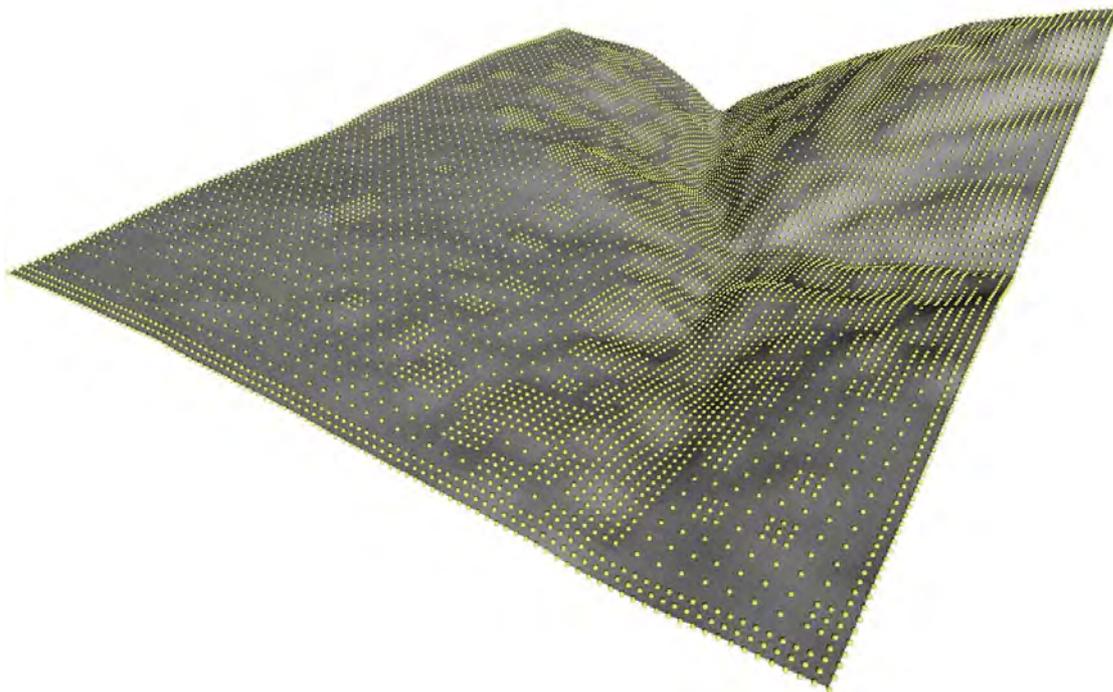


Abb. 4: Geschummetes Gelände mit den ausgedünnten Punkten

4.1 Flugzeuggetragenes Laserscanning

Bewaldendes Gebiet: Wienerwald

An einem $\sim 1.5\text{km} \times 1\text{km}$ großen Beispiel im Wienerwald wurde die Auswirkung unterschiedlicher Approximationsgenauigkeiten getestet. Die Ergebnisse für unterschiedliche Schwellwerte dZ_{\max} sind in der folgenden Tabelle zusammengefasst:

Tab. 1: Ergebnisse der Datenreduktion für unterschiedliche Schwellwerte dZ_{\max}

Ausgangsgitterpunkte	dZ_{\max} [m]	Reduzierte Punktmenge
1 500 101	0.25	622 881 (41%)
1 500 101	0.50	386 412 (26 %)
1 500 101	1.00	225 411 (15 %)

DGM entlang eines Flusslaufes: Donau bei Hainburg

Ein weiteres Beispiel stammt aus einem Pilotprojekt, das im Auftrag der Wasserstraßendirektion an der Donau bei Hainburg vom I.P.F. bearbeitet wurde (KÖLBL ET AL. 2002). In einem Ausschnitt von $2\text{km} \times 2\text{km}$ liegt ein Laser-Geländemodell mit einer Weite des Ausgangsgitters von 1m vor, d.h. mit insgesamt ca. 4 Millionen Gitterpunkten. Diese Punktmenge wurde – unter Einhaltung eines Schwellwertes dZ_{\max} für die Approximation von 25cm – auf ca. 1.3 Millionen Punkte reduziert. Beeindruckend ist, dass mit der verhältnismäßig großen Datenmenge diese 68-prozentige Reduktion inklusive der ASCII-Datenausgabe mit einem 2GHz -Rechner in 4.75 Minuten erreicht werden konnte.

4.2 Terrestrisches Laserscanning

Für kleinräumige Geländemodelle ist aufgrund größerer Flexibilität und leichter Einsetzbarkeit das terrestrische Laserscanning dem flugzeuggetragenen vorzuziehen. Terrestrisches Laserscanning produziert ebenfalls wie das flugzeuggetragene Laserscanning innerhalb kurzer Zeit sehr große Datenmengen. Im Gegensatz zum flugzeuggetragenen Laserscanning hat man es hier aber mit einer verhältnismäßig viel größeren Inhomogenität der Geländepunktdichte zu tun, wodurch die Ableitung der Geländemodelle zusätzlich erschwert wird. Neben Bereichen mit sehr hoher Punktdichte (mehr als 100 Punkte pro m^2) treten aufgrund von Abschattungen durch Vegetation oder anderen künstlichen Objekten große Datenlücken auf. Besonders für diese Aufgabenstellung eignet sich der Ansatz der Hierarchischen Robusten Interpolation. Ein Ergebnis einer solchen DGM-Berechnung ($360m \times 280m$) entlang eines Flusslaufes ist in der folgenden Abbildung dargestellt.

Der Reduktionsprozess wurde auch auf das in der Abbildung 5 dargestellte DGM erfolgreich angewandt. Das feine 25cm-Gittermodell konnte unter Einhaltung einer Approximationsgenauigkeit von 10cm von ursprünglich 1.1 Mio. Gitterpunkten auf ~316 500 Punkte (~29%) reduziert werden. Diese große Reduktion ist vor allem dadurch möglich, da das ursprüngliche DGM in einigen Bereichen ohne Datenpunkte aufgrund der fehlenden Geländeinformation sehr glatt ist.

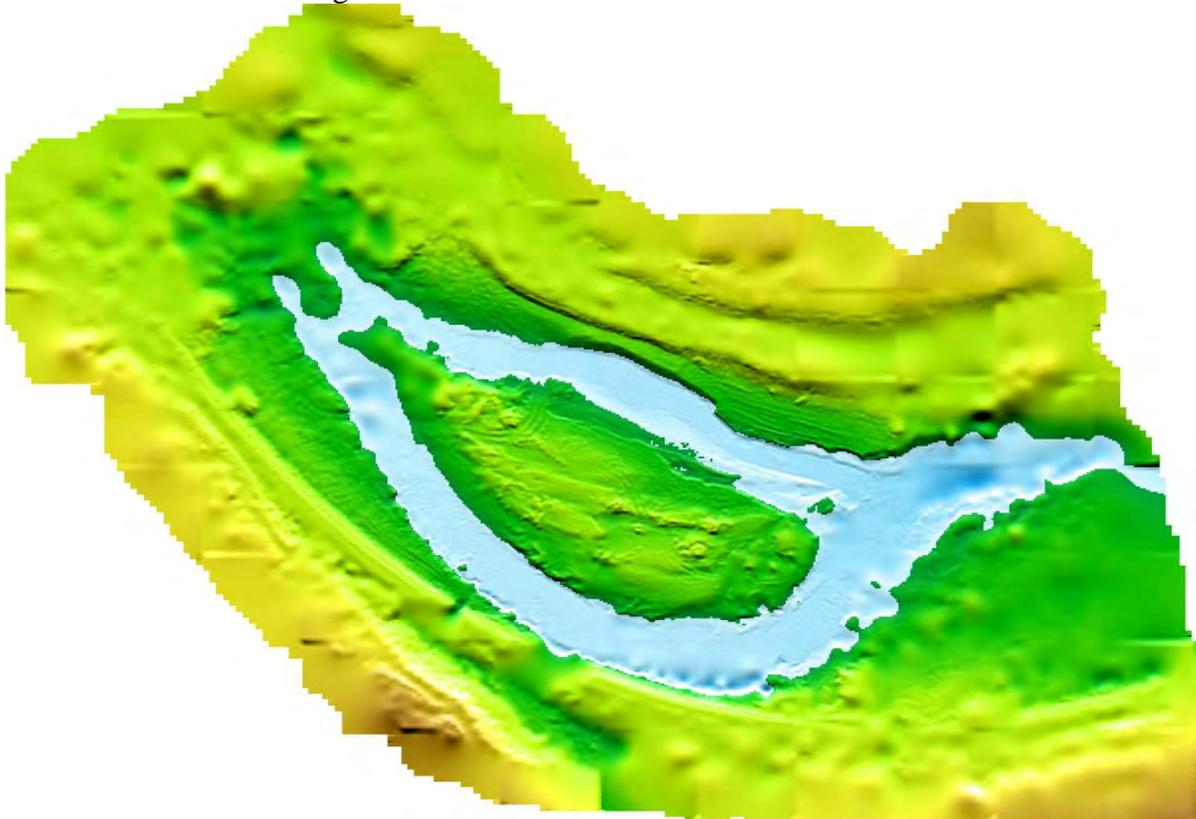


Abb. 5: Höhencodiertes mit einer Schummerung überlagertes DGM aus terrestrischen Laser-Daten

5 Ausblick

Der vorgestellte Prozess zur Ausdünnung sehr engmaschiger Geländemodelle setzt nach Ausschöpfung der gesamten Information ein, die in den Originaldaten einer Laserscanner-

Aufnahme oder einem vergleichbaren Datenerfassungsverfahren enthalten ist. Der hier vorgestellte Datenreduktionsprozess liefert eine Punktverteilung in Abhängigkeit von der Geländekrümmung unter der Einhaltung einer benutzerdefinierten Approximationsgenauigkeit. Mit diesen Punkten kann man eine Triangulation (zum Beispiel nach den Delaunay-Kriterien) aufbauen. Da die zufälligen Höhenfehler der Originalpunkte im Rahmen der Interpolation herausgefiltert wurden, beschreiben die reduzierten Punkte in hohem Maße eine glatte Oberfläche. Führt man dagegen die Datenreduktion mit den Originaldaten durch und verwendet man die reduzierten Punkte für eine Triangulation, so überträgt man die unvermeidlichen zufälligen Höhenfehler in das Oberflächenmodell.

An dem im Rahmen dieser Publikation vorgestellten Algorithmus zur Datenreduktion dichter Geländemodelle ist noch anzumerken, dass die Ausdünnungsrate noch weiter erhöht werden kann, wenn man

- die ohnehin in beiden Koordinatenrichtungen anfallenden Entfernungen E_X und E_Y auch für die Ausdünnung konsequent nützen würde (eventuell auch mit den Hauptkrümmungsrichtungen) und
- eine Unterscheidung der Ausgangsgitterpunkte in Punkte, die in der jeweiligen Δ^i -Gittermasche oder auf ihren Begrenzungslinien liegen, machen würde.

Kritisch anzumerken ist, dass die Ausdünnung des DGMs ohne Berücksichtigung von Geländekanten erfolgt. Die Geländekanten, die im hybriden Geländemodell integriert sind (Abb. 1), können in eine Dreiecksvermaschung nachträglich als Zwangskanten eingeführt werden. Vorher könnte allerdings auch entlang der Geländekanten eine Reduktion der Linienpunkte – sowohl in Lage als auch in Höhe – erfolgen. Damit an den Geländekanten keine schlecht geformten Dreiecke entstehen, sollte man mit einer Pufferfunktion Gitterpunkte im reduzierten Datensatz eliminieren, die innerhalb einer gewissen Bandbreite den Geländekanten benachbart sind. Für sehr hohe Qualitätsansprüche sollte man die erwähnte Bandbreite in Abhängigkeit von der Krümmung des Oberflächenmodells senkrecht zur Geländekante – auf beiden Seiten der jeweiligen Geländekante unterschiedlich – variieren.

Die im Rahmen dieser Publikation vorgestellte rasterbasierte Methode ermöglicht eine starke Reduktion der Datenmenge unter Einhaltung einer gewünschten Approximationsgenauigkeit bei einer relativ geringen Rechenzeit. Weitere Untersuchungen v.a. zur Datenreduktion unter Einbeziehung von zusätzlicher Vektorinformation des hybriden DGMs sind noch ausständig.

6 Literaturverzeichnis

- AXELSSON, P., 2000: DEM generation from laser scanner data using adaptive TIN models. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXXIII, Part B4, Amsterdam, Netherlands.
- BRIESE, CH., KRAUS, K., 2003: Datenreduktion dichter Laser-Geländemodelle. Zur Veröffentlichung in der Zeitschrift *Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement* des Deutschen Vereins für Vermessungswesen (DVW) e.V. - Gesellschaft für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement eingereicht.
- BRIESE, CH., PEIFER, N., 2001: Airborne Laser Scanning and Derivation of Digital Terrain Models. In: *Optical 3-D Measurement Techniques V* (Eds.: Grün/Kahmen), pp. 80-87, Wichmann-Verlag.
- ELMQVIST, M., JUNGERT, E., LANTZ, F., PERSSON, A., SÖDERMANN, U., 2001: Terrain Modelling and analysis using laser scanner data. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Volume XXXIV-3/W4, Annapolis, Maryland, USA.

- KOBBELT, L., CAMPAGNA, S., SEIDEL, H.-P., 1998: A General Framework for Mesh Decimation. Proceedings of Graphics Interface, pp. 43-50.
- KÖLBL, CH., KRAUS, K., OBERHOFER, A., 2002: Hochgenaues Geländemodell aus Laser-Scanner-Daten: Aufbau und Anwendung. Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, 54. Jahrgang, Heft 1, S. 17 – 23.
- Kraus, K., 2000: Photogrammetrie, Band 3 (Topographische Informationssysteme). - 1. Aufl., Dümmler-Verlag.
- KRAUS, K., 2003: Photogrammetrie, Band 1 (Geometrische Informationen aus Photographien und Laserscanneraufnahmen), 7. Auflage, Walter-de-Gruyter-Verlag, voraussichtlich noch 2003.
- KRAUS, K., PFEIFER, N., 1998. Determination of terrain models in wooded areas with aerial laser scanner data. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 53, pp. 193-203.
- LENK, U., 2003: Triangulationen und Adaptive Triangulationen – ein Verfahren zur Ausdünnung unregelmäßig verteilter Massenpunkte in der Geländemodellierung. zfv 128, S. 47 – 56.
- MAKAROVIC, B., 1976: Digital terrain model system. ITC-Journal, Heft 1, pp. 57 – 83.
- SCOP, 2003: Das Geländemodellprogramm SCOP, <http://www.ipf.tuwien.ac.at/> (16. Juni 2003) bzw. <http://www.inpho.de/> (16. Juni 2003).
- VOSSELMANN, G., MAAS, H., 2001: Adjustment and Filtering of Raw Laser Altimetry Data. Proceedings of OEEPE Workshop on Airborne Laserscanning and Interferometric SAR for Detailed Digital Terrain Models, Stockholm, Sweden.

Danksagung

Das Projekt wird vom Österreichischen Fonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung finanziell unterstützt (Projekt Nr. 15789).

Interpretation und Generalisierung dichter digitaler Geländemodelle

CARSTEN HATGER & KATRIN KREMEIKE

Zusammenfassung: In diesem Beitrag werden zwei Ansätze beschrieben, die sich mit der Problematik der Interpretation und Generalisierung dichter digitaler Geländemodelle (DGM) beschäftigen. Zunächst wird ein GIS basierter Ansatz zur Straßenextraktion aus Laserscannerdaten vorgestellt, des weiteren ein Verfahren, welches – ausgehend von einer gegebenen Straßenachse – diese in einem DGM derart generalisiert, dass sie auch aus größerer Entfernung noch sichtbar sind. Erste Ergebnisse beider Verfahren werden vorgestellt. Das Ziel weiterer Arbeit besteht darin die Ansätze zu integrieren.

1 Einleitung und Motivation

Mit der heute zur Verfügung stehenden modernen Datenerfassungsmethode des Laserscannings können kostengünstig sehr dichte digitale Geländemodelle für die detaillierte Repräsentation der Erdoberfläche gewonnen werden. Eine unmittelbare und effiziente Nutzung dieser Datensätze ist aus verschiedenen Gründen zunächst nicht möglich. U.a. gelingt die Interpretation des Geländes auf Grund fehlender Textur in den zugrunde liegenden Daten im Vergleich mit den Verfahren der Photogrammetrie nur sehr schwer. Eine Lösung für dieses Problem kann in der Integration von bestehenden zweidimensionalen Geoinformationen bestehen.

Auf der anderen Seite behindert das enorme Datenvolumen der dreidimensionalen Information eine effiziente graphische Repräsentation in verschiedenen Auflösungen, so dass der Einsatz von Datenreduktionsverfahren gegeben erscheint. In der Kartographie wird versucht, das Problem der zu hohen graphischen Dichte vorhandener zweidimensionaler Geodaten durch Methoden der Generalisierung zu lösen. Um bei der Generalisierung der Geländemodelle bedeutende topographische Objekte zu erhalten, schließen sich der Identifikation durch Dateninterpretationsverfahren dem Zweck des topographischen Objektes entsprechend unterschiedliche Methoden der Generalisierung an. Die Identifikation der Straßenobjekte im DGM soll durch die Integration von zweidimensionalen Straßendaten mit dem Geländemodell vorgenommen werden. Hierzu werden die 2D-Straßendaten mit dem DGM kombiniert und die Höhenwerte in diskreten Abständen im Längs- und Querprofil betrachtet. Hypothesen über die Breite der Querprofile werden durch die Klasse der Straße sowie die im Straßendatensatz angegebene Breite bestimmt und anschließend im Datensatz verifiziert.

Bei einer Geländevisualisierung ist besondere Sorgfalt bei der Betonung und Generalisierung von topographischen Objekten wie beispielsweise Straßen anzuwenden. Um die extrahierten Objekte im Zuge der Generalisierung gut erkennbar zu erhalten, sind sie durch Betonung hervorzuheben. Im Falle der Straßen ist dies beispielsweise durch eine Verbreiterung um die Mittelachse möglich. Innerhalb des digitalen Geländemodells sind die betroffenen Geländehöhen zur Anpassung der an die verbreiterten Objekte angrenzenden Bereiche neu zu ermitteln.

¹Dipl.-Ing. Carsten Hatger, Dipl.-Geogr. Katrin Kremeike, Institut für Kartographie und Geoinformatik, Universität Hannover, Appelstraße 9a, 30167 Hannover, e-mail: {Carsten.Hatger, Katrin.Kremeike}@ikg.uni-hannover.de

2 Verwandte Arbeiten

Die Interpretation digitaler Geländemodelle ist bereits seit geraumer Zeit Gegenstand wissenschaftlicher Forschung. Allerdings wurde der Interpretation von Straßen bisher jedoch nur untergeordnete Bedeutung beigemessen. Dies mag daran liegen, dass ein Großteil der heute verfügbaren Geländemodelle mit einer derart geringen Auflösung und Genauigkeit vorliegen, dass eine Analyse hinsichtlich verkehrlicher Objekte nicht sinnvoll erscheint. Diese Situation verhält sich quasi komplementär zu den Datenquellen aus denen digitale Geländemodelle mittels Verfahren der Stereophotogrammetrie oder digitaler Bildzuordnung gewonnen werden. Die Interpretation von Luftbildern hinsichtlich der Extraktion von Straßen ist Gegenstand zahlreicher Publikationen, vgl. WIEDEMANN 2001.

Die automatisierte kartographische Generalisierung gehört zu den schwierigsten Aufgaben der digitalen Kartographie und steht seit vielen Jahren im Mittelpunkt verschiedenster Forschungen (BUTTENFIELD & MCMASTER, 1991; MÜLLER ET AL., 1995). Mit der Generalisierung 2-dimensionaler Datenbestände befassen sich zahlreiche Arbeiten (BEARD, 1991; WARE & JONES, 1998; SESTER, 2000). Bei der Generalisierung linienhafter Objekte werden hier hauptsächlich Straßen und Flussnetze betrachtet (RUSAK MAZUR & CASTNER, 1990; THOMPSON & RICHARDSON, 1995). Eine weitere elementare Operation der Generalisierung stellt die Betonung dar, wobei es sich um das Vergrößern oder Verbreitern von Objekten handelt (HAKE ET AL., 2002). Diese Operationen dienen hauptsächlich der Erhaltung der Lesbarkeit, wobei es maßstabsbedingte Mindestgrößen von Strecken und Flächen zu beachten gilt (HAKE ET AL., 2002). Bei BISCONDI & MOREAU (1995) sowie MOREAU ET AL. (1997) wird eine generische Methode zur Verbreiterung von Straßen um deren Mittelachsen vorgestellt. Die Generalisierung 3-dimensionaler Datenbestände wird vornehmlich am Beispiel von Gebäudegeneralisierung untersucht (SESTER & KLEIN, 1999; LAL & MENG, 2001). Andere Arbeiten beschäftigen sich mit der Reliefgeneralisierung (WU, 1981; WEIBEL, 1989).

3 Datenquellen

3.1 ATKIS DLM

Mit dem Amtlich Topographisch-Kartographischen Informationssystem (ATKIS) ist in der Bundesrepublik Deutschland eine flächendeckende Datenquelle für den Bezug zwei- und dreidimensionaler räumlicher Information gegeben (ADV 1998). Innerhalb des digitalen Landschaftsmodells (DLM) werden die topographischen Objekte nach sachlogischen Zusammenhängen gruppiert. Die konkreten geometrischen Eigenschaften der ATKIS Objekte wie beispielsweise Lage, Größe und Form werden in Form zweidimensionaler vektorbasierter Beschreibungen mittels Primitiver wie Punkt, Linie oder Fläche ausgedrückt. Sachinformationen werden durch Attribute und Beziehungen zu anderen Objekten bzw. Objektteilen formuliert. Objektteile werden zu einem Objekt zusammengefasst, die ihrerseits zu einem komplexen Objekt aggregiert werden können. In diesem Beitrag wird das Basis DLM im Maßstab 1:10.000 bis 1:30.000 verwendet. Die Lagegenauigkeit wird mit besser als drei Meter angegeben.

Im Hinblick auf die Interpretation digitaler Geländemodelle am Beispiel von Straßen sind die Merkmale von besonderer Bedeutung, die den Interpretationsprozess in geeigneter Weise unterstützen können. Der ATKIS Objektartenkatalog des Basis DLM hält im Objektbereich Verkehr zu diesem Zweck die Objektgruppe Straßenverkehr bereit, in der mit Hilfe von Ob-

jektarten wie beispielsweise Straße, Weg oder Fahrbahn der Verkehrsraum Straße im wesentlichen in Form linienförmiger Objekte beschrieben wird. Attribute wie die Funktion, die Widmung (Autobahn, Bundesstrasse, Landstraße, etc.), die Breite des Verkehrsweges bzw. der Fahrbahn und die Anzahl der Fahrstreifen beschreiben weitere relevante Eigenschaften. Beziehungen zwischen verkehrlichem Objekt und Gewässern, Brücken- sowie Tunnelbauwerken charakterisieren die relative Lage der betroffenen Objekte zueinander.

3.2 Geographic Data Files

Geographic Data Files (GDF) stellen heute den Europäischen Standard für navigationsfähige Straßendaten dar (CEN 1995). Die flächendeckende räumliche Information wird ähnlich dem Objektartenkatalog des ATKIS DLM klassifiziert, strukturiert und beschrieben. Wesentlicher Bestandteil des Datenmodells ist die detaillierte Beschreibung der Straßenverkehrsnetze. Die Genauigkeit der GDF Daten ist abhängig von der zugrundeliegenden Datenquelle und variiert zwischen 15 m in offenem Gelände und 3 m in städtischem Gebiet. Ein Alleinstellungsmerkmal der GDF Daten ist die Bereitstellung einer besonderen Topologie, die die Verwendung der Datenquelle im Kontext der Fahrzeugnavigation zur Routenplanung und Zielführung gestattet.

Geographic Data Files halten für die Interpretation des DGM durch Integration von Straßen in das digitale Geländemodell Objekte, Attribute und Relationen ähnlich denen des ATKIS Basis DLM vor. Zusätzliche Eigenschaften des Datenmodells bestehen in der Möglichkeit der Angabe von Höheninformation zu jedem lagemäßig gegebenen Punkt. Des weiteren sind Attribute mit Angaben zur Längs- und Querneigung vorhanden. Hierbei ist allerdings anzumerken, dass die heute verfügbaren Datensätze mit gerade diesen zusätzlichen Attributwerten nicht aufwarten können.

3.3 Digitale Gelände- und Oberflächenmodelle

Während das ATKIS-DLM und auch die Geographic Data Files topographische Objekte der Erdoberfläche ausschließlich der Lage nach beschreiben, wird das Relief durch digitale Geländemodelle (DGM) erfasst und beschrieben. Die Höheninformation des Geländes wird hier in Form eines regelmäßigen Gitters, also durch regularisierte dreidimensionale Information repräsentiert. In der Bundesrepublik Deutschland ist mit dem DGM50 ein flächendeckendes Geländemodell verfügbar, dessen Rasterweite und Genauigkeit mit etwa 25 Meter angegeben sind. Jedoch muss für die Interpretation und Generalisierung im Kontext von Straßen im Gelände diese Auflösung als nicht ausreichend angesehen werden. Aus diesem Grund wird für diesen Aufsatz auf eine höher auflösende Datenquelle zurückgegriffen.

Das Laserscanning-Verfahren stellt im Vergleich zur klassischen Stereophotogrammetrie eine leistungsfähige Alternative für die Erfassung dreidimensionaler Geländeinformation dar (KNABENSCHUH 1999). Für eine nähere Beschreibung dieser Methode siehe BALSAVIAS (1999a). Aus den gemessenen Rohdaten werden nach mehreren Verarbeitungsschritten verschiedene Produkte abgeleitet, unter anderem das digitale Oberflächenmodell (DOM), welches neben gemessenen Bodenpunkten auch Höheninformation der Vegetation oder der Gebäude beinhaltet. Nach der Klassifikation und Selektion der Bodenpunkte steht ein hochauflösendes digitales Geländemodell (DGM) zur Verfügung. Die Auflösung beträgt in der Regel vier Punkte pro Quadratmeter. Während die Lagegenauigkeit dieser Daten ca. 0,5 m beträgt (BALSAVIAS 1999b, LOHR 1999), wird die Höhengenaugkeit mit 0,15 m angegeben (BRIESE ET. AL. 2001, WEVER 1999). Die in dieser Arbeit verwendeten Datensätze stellen einen Teil der Stadt Stuttgart sowie einen Teil der Stadt Castrop-Rauxel dar. Die Daten wurden mit ei-

ner Auflösung von 1 m, respektive 0,5 m regularisiert. Abb. 1 zeigt einen der verwendeten Datensätze der Stadt Stuttgart, überlagert mit Straßen aus dem ATKIS-Datensatz.



Abb. 1: Das Testgebiet Stuttgart, 1 m Raster, Querprofil vgl. Abschnitt 5.2.

4 Interpretation

In den durch Laserscanning gewonnenen Geländemodellen ist originär keinerlei Strukturinformation, etwa in Form von Bruchkanten oder Geländelinien enthalten, denn bedingt durch das zu Grunde liegende Messverfahren wird das Gelände zunächst ausschließlich durch eine unstrukturierte dreidimensionale Punktwolke repräsentiert. Aus diesem Grund wird zur Unterstützung auf Vorinformation in Form zweidimensionaler vektorbasierter Datensätze zurückgegriffen (vgl. Abs. 1 und Abs. 3).

Im folgenden werden die verkehrlichen Objekte an Hand eines von Vorinformationen gestützten sowohl generischen als auch spezifischen und Modells beschrieben (Abschnitt 4.1). Im Anschluss daran werden im digitalen Geländemodell Instanzen gemäß des zuvor definierten Modells gesucht und extrahiert (Abschnitt 4.2).

4.1 Modelldefinition

Die Definition eines geeigneten Modells ist eine wesentliche Voraussetzung für den erfolgreichen Interpretationsprozess. Im Bezug auf Straßen lässt sich ein solches Modell heuristisch durch offensichtliche Eigenschaften verkehrlicher Objekte in der realen Welt ableiten (WIEDEMANN 2001). Eine weitere Möglichkeit besteht darin, Eigenschaften von Straßen, die bereits beim Planungs- und Konstruktionsprozess von wesentlicher Bedeutung sind, zu berücksichtigen. In FGSV (1996) sind solche wesentlichen Merkmale festgelegt, dies betrifft neben der Vorgabe von geometrischen Planungselementen wie Geradenabschnitten, Kreisbögen und Klotoiden unter anderem die Eigenschaften maximaler Längs- und Querneigung, der Anzahl der Fahrstreifen, die Fahrbahnbreite, die Krümmung und die Funktion des Verkehrsweges.

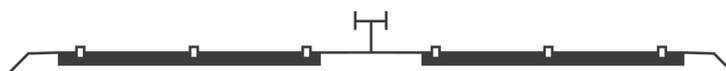


Abb. 2: Regelquerschnitt für den Bau vierspuriger Straßen.

Abb. 2 zeigt ein Beispiel für einen Regelquerschnitt zur Anlage einer vierspurigen Straße mit baulich getrennten Fahrstreifen für jede Richtung, wie er bei Planung und Bau von Autobahnen verwendet wird. Teile dieser Eigenschaften sind bereits als Attribute in den zuvor vorgestellten Datenquellen gespeichert. Dies betrifft bis zu einem gewissen Grad an Vollständig-

keit und Genauigkeit die Funktion der Straße, die ebene Lage, die Anzahl der Fahrstreifen sowie die Breite des verkehrlichen Objektes. Exakte Straßenbreiten, Längs- und Querneigungen sowie Höhenangaben sind aus diesen Quellen zurzeit nicht ableitbar.

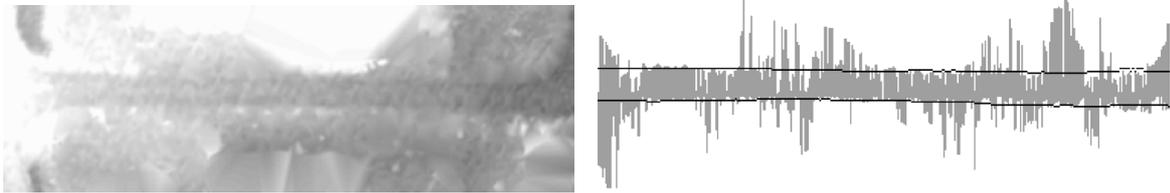


Abb. 3: Situation im Geländemodell (li.), Ergebnis der Segmentierung unter Anwendung des Medianfilters (re.)

4.2 Suche und Extraktion

Das Auffinden der zuvor modellierten Objekte im digitalen Geländemodell erfordert prinzipiell eine erschöpfende Suche über den gesamten Datenbestand. Das Verfahren kann bei Verwendung von Vorinformation in Form von Straßendaten allerdings auf Gebiete nahe der gegebenen Straßenachsen beschränkt werden. Allerdings ergibt sich der Nachteil, dass zunächst keine weiteren als die bereits im Vektordatenbestand vorhandenen Straßenobjekte extrahiert werden können. Das Ergebnis der Suche ist somit stark von der Qualität der zugrundeliegenden Vorinformation geprägt.

Zunächst werden entlang der gegebenen Straßenachsen Querprofile in diskreten Abständen mit vorgegebener Breite erzeugt. Die so erzeugten Querprofile werden mit einem Verfahren segmentiert, das den RANSAC Algorithmus von FISCHLER ET. AL. (1981) nutzt. Für jedes Querprofil werden durch ein zufälliges Auswahlverfahren jeweils zwei Punkte zur Erzeugung eines Liniensegmentes herangezogen. Jedes dieser Liniensegmente ist definiert durch eine Gerade mit den Parametern a , b , c . Der gesuchte Konsens für das jeweilige Querprofil ist gegeben durch

$$ax + bz + c < \varepsilon . \quad (1)$$



Abb. 4: Ergebnis der Extraktion und Geländemodell für das Gebiet Castrop-Rauxel, Auflösung 0,5 m. Das Ergebnis der Segmentierung ist in weißer Farbe dargestellt.

Das Verfahren kann allerdings nur dort sinnvolle Ergebnisse liefern, wo der Straßenkörper beidseitig durch C^0 bzw. C^1 Diskontinuitäten begrenzt wird. Aus diesem Grund wird von den berechneten und verbundenen Segmenten das Beste in der Form ausgewählt, das es neben maximalen Konsens die Mittelachse der Straße schneiden muss. Mittels eines Medianfilters vorgegebener Größe erfolgt eine Glättung der aneinandergereihten Liniensegmente längs der Straßenachse hinsichtlich ihres Start- und Endpunktes. Abb. 3 gibt einen Überblick über die Situation im Geländemodell und stellt das Ergebnis der Segmentierung vor und nach der Anwendung des Medianfilters dar. Abb. 4 stellt das bis hier erreichte Interpretationsergebnis graphisch dar.

5 Generalisierung des Geländemodells

Die Generalisierung von digitalen Geländemodellen/Oberflächen kann mittels einfacher Glättungsverfahren erfolgen. Dies würde jedoch über die topographischen Objekte hinwegglätten, so dass diese ab einem bestimmten Abstand nicht mehr sichtbar wären. Aus diesem Grund werden Straßen während der Generalisierung betont. Dieser Vorgang und die sich daraus ergebenden Probleme sollen im folgenden beschrieben werden. Die Betonung erfolgt durch Verbreiterung, sodass sie für die Betrachtung aus vorgegebenen Abstand noch wahrgenommen werden. Die einzustellende Breite hängt daher vom „Maßstab“, d.h. von der Entfernung des Betrachters zum Objekt ab.

5.1 Verbreiterung der Straßen

Nachdem die Straßenachsen aus der Integration der zweidimensionalen Straßendaten mit dem Geländemodell zur Verfügung stehen und als zugehöriges Attribut ihre Breite sowie Quer- und Längsneigung bekannt sind, werden die Straßen im DGM mittels eines vorgegebenen Abstandes um ihre Mittelachse verbreitert.

Hierzu wird einerseits das Programmsystem TASH (Topographisches Auswertesystem der Universität Hannover) verwendet (BUZIEK ET AL., 1992). Die Straßen begrenzenden Linien werden als Bruchkanten eingefügt und alle Gitterpunkte innerhalb des entstehenden Puffers gelöscht. Die Höhen innerhalb des Puffers werden somit ausschließlich durch den Höhenverlauf der Straßenachse bestimmt. Unter Berücksichtigung dieser Bruchkanten kann das DGM anschließend neu berechnet werden. Des Weiteren wird die Verbreiterung der Straßen um ihre Achsen mit dem Programm ArcGIS der Firma ESRI durchgeführt. Ein Löschen innerhalb des Puffers gelegener Punkte findet nicht statt, vielmehr wird der Höhenwert für jede Rasterzelle im Puffer anhand des Verlaufs der Straßenachse neu berechnet. Eine Anpassung der Randbe-

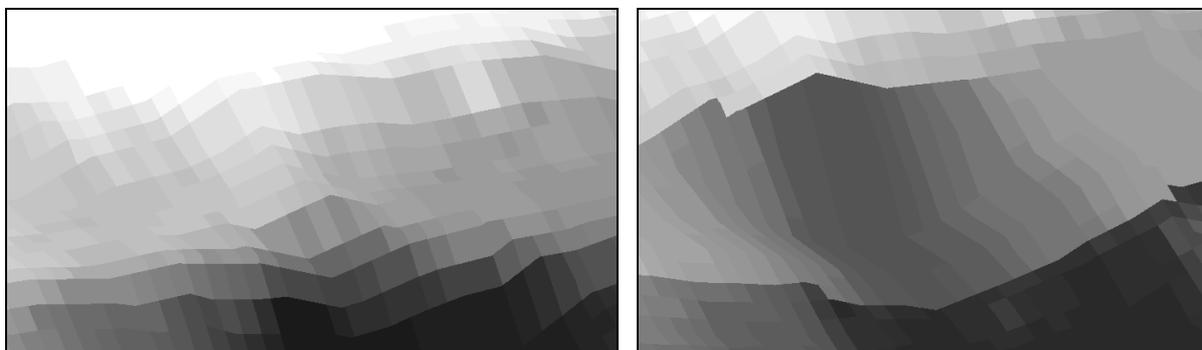


Abb. 5: Perspektive Darstellung des Verlaufs einer Straße im DGM vor (li.) und nach der Verbreiterung (re.)

reiche wird nicht vorgenommen. Abb. 5 zeigt mittels perspektiver Darstellungen das Ergebnis dieses Verfahrens unter Verwendung von ArcGIS. Die Straßenachse verläuft hier vom unteren linken Drittel zum rechten oberen Drittel der Abbildung. Aus der rechten Abbildung wird deutlich, dass die verbreiterte Straße besser zu erkennen ist. Es ergeben sich jedoch einige Fragestellungen, die im folgenden näher erläutert werden.

5.2 Problematik

Aus der Veränderung der Höhenwerte im Bereich der verbreiterten Straßen resultiert, dass zwischen diesen Zellen und den angrenzenden Bereichen eine Diskontinuität entsteht. Das Problem wird bei der Betrachtung eines quer zur Straße gelegten Profils deutlich (s. Abb. 6). Die Straßenachse, welche durch das Quadrat symbolisiert wird, befindet sich hier bei etwa 12 m Profillänge. Die vor der Straßenverbreiterung gerundeten Übergänge zwischen Plateaus und Böschung stellen sich nach der Verbreiterung der Straße sehr abrupt dar. Dies ist bei Profillänge 16 m deutlich zu erkennen. Die durch die Straßenverbreiterung im DGM entstehen-

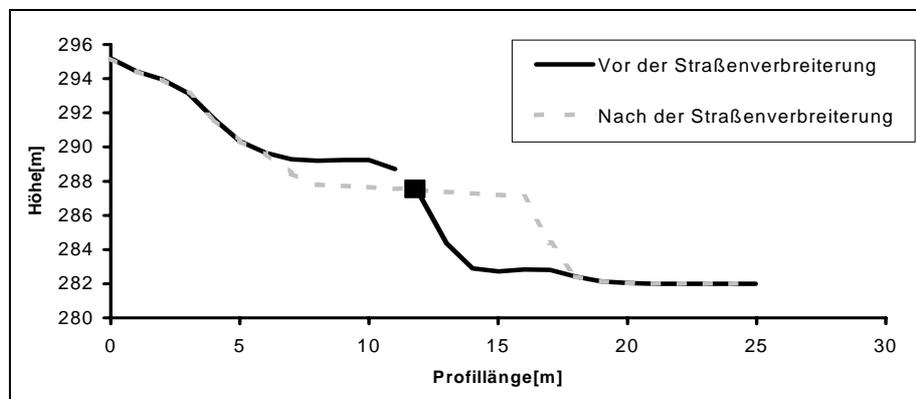


Abb. 6: Querprofil

den Diskontinuitäten gilt es auszugleichen. Zudem zeigt sich in diesem Profil ein weiteres Problem. In der Mitte der nun verbreiterten Straße findet sich im Originaldatensatz kein Plateau. Allerdings sind im Profil links bzw. rechts von der Mitte der im neuen Profil erkennbaren Straße zwei Plateaus zu erkennen. Vermutlich findet sich die Straße im DGM an einer dieser Stellen; die Straßenachse aus den Vektordaten stimmt somit nicht mit dem DGM überein.

5.3 Lösungsansätze

Eine Möglichkeit der Berechnung der Höhenwerte in dem angesprochenen Bereich ist mit dem Verfahren der linearen Interpolation gegeben. Hierbei wird ein Einflussbereich festgelegt, in dem die Werte aus der Differenz zwischen Straßenhöhe und Geländehöhe linear neu berechnet werden. Im Profil entstehen hierbei zum Teil abrupte Übergänge zwischen generalisierter Straße und ursprünglicher Geländeoberfläche. Um diese Sprünge zu vermeiden, ist zu überlegen, welche Gewichtsfunktion angewendet werden kann. Eine Möglichkeit zur Neuberechnung der Höhenwerte im Übergangsbereich ist mit der inversen Distanzgewichtung gegeben. Hierbei wird das gewichtete Mittel unter Berücksichtigung der Entfernung zwischen zu interpolierendem Punkt und den vorhandenen Höhenpunkten berechnet. Die

$$z(u_0) = \sum \left(\frac{1}{s_t} * \frac{z(u_t)}{\sum \frac{1}{s_t}} \right) \quad (2)$$

Gewichte des linearen Schätzers verhalten sich mit proportional zu den Inversen des Abstands s_i zwischen dem unbekanntem Punkt und dem verwendeten gemessenen Punkt. Die lineare Interpolation und die Interpolation mittels entfernungsabhängiger Gewichte stellen zwei verschiedene Interpolationsverfahren dar, von denen jedoch nicht eindeutig zu sagen ist, welches sinnvollere Ergebnisse liefert. Das Ergebnis wird in jedem Fall auch von der Gestalt der Oberfläche vor der Verbreiterung der Straßenobjekte abhängen.

6 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurde für die Generalisierung von Geländemodellen ein Verfahren vorgestellt, das – durch eine auf dem RANSAC Prinzip beruhenden Segmentierung – Straßen aus hochauflösenden Geländemodellen extrahiert. Die Methode ist auf die Verwendung von Vorinformation angewiesen und kann daher keinen Beitrag für das Auffinden weiterer – als der im zweidimensionalen Datenbestand vorhandenen – Straßen liefern. Die sich in der Netztopologie ausdrückende Verbindungsfunktion der Straßen wird nicht ausgenutzt, in Verbindung mit einem globalen Segmentierungsverfahren könnten zusätzliche Objekte identifiziert werden. Weitere vorhandene Vorinformationen wie die Breite und die Funktion des verkehrlichen Objektes könnten in einem erweiterten Verfahren dazu genutzt werden, das Interpretationsergebnis gerade in solchen Gebieten zu verbessern, an denen die an den Straßenrändern auftretenden Diskontinuitäten nur schwach bis gar nicht ausgeprägt sind. Quantitative Analysen und der Vergleich der Ergebnisse mit einer unabhängig gewonnenen Datenquelle müssen das Ergebnis qualifizieren.

Im Zuge der Generalisierung eines DGM wird deutlich, dass die Betonung bedeutender topographischer Objekte erforderlich ist. Hierzu sind die entsprechenden Objekte zu vergrößern, was jedoch zu Diskontinuitäten in den angrenzenden Bereichen führt. Um eine geeignete Methode zur Anpassung dieser Bereiche an die Betonung zu finden, sind verschiedene Interpolationsansätze hinsichtlich ihrer Eignung zu untersuchen. Ein geeigneter Ansatz sollte die Morphologie des DGM erhalten. Ein Problem stellt die Wahl der Größe des Wirkungsbereiches dar. Diese wird zunächst manuell vorgegeben. In weiteren Untersuchungen ist zu klären, in welchem Abstand vom Verlauf der Straße noch eine Anpassung der Höhenwerte vorzunehmen ist. Bei der Profildarstellung in Abb. 6 zeigt sich, dass die Straßenachsen und das DGM nicht übereinstimmen. Die Integration der beiden vorgestellten Ansätze wird dazu führen, dass die Straße in Lage und Verlauf genau bekannt ist und somit exakt mit dem Gelände verschnitten wird. Des Weiteren ist die Integration zusätzlicher Generalisierungsoperationen sinnvoll, etwa die dreidimensionale Glättung des Straßenverlaufs oder die Verdrängung benachbarter Gebäude.

7 Literaturverzeichnis

- ADV (1998): Amtliches Topographisch-Kartographisches Informationssystem (ATKIS). Technischer Bericht, Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland.
- BALTASAVIAS, E. P. (1999a): Airborne laser scanning - Basic relation and formulas. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing **54** (2-3): 199-214.
- BALTASAVIAS, E. P. (1999b): A comparison between photogrammetry and laser scanning. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing **54** (2-3): 83-94.
- BEARD, K. (1991): Generalization operations and supporting structures. Proc. Auto-Carto **10**, Baltimore: 29 – 45.

- BISCONDI, P. & MOREAU, J-M.(1995): Computer-Aided road network design. Proceedings of the 7th Canadian Conference on Computational Geometry, Quebec, Canada: 229-234.
- BRIESE, CH. AND KRAUS, K. AND MANDLBURGER, G. AND PFEIFER, N.2001: Einsatzmöglichkeiten der flugzeuggetragenen Laser Scanner. Tagungsband der 11. Internationalen Geodätischen Woche, Obergurgl, Innsbruck, Austria: 17-26.
- BRUNNER, K. (2001): Kartographik am Bildschirm – Einschränkungen und Probleme. Kartographische Nachrichten 5/2001: 233-239.
- BUTTENFIELD, B. P. & R. B. MCMASTER (1991): Map Generalization: Making Rules for Knowledge Representation. Longman, Scientific & Technical.
- BUZIEK, G., D. GRÜNREICH, I. KRUSE (1992): Digitale Landschaftsmodellierung – Stand und Entwicklung der Digitalen Landschaftsmodellierung mit dem Topographischen Auswertesystem der Universität Hannover (TASH). Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik 2/92: 84-88.
- CEN TC 287 (1995): Geographic data files version 3.0, GDF for road traffic and transportation telematics. Technischer Bericht, CEN.
- FISCHLER, M. A., BOLLES, R. (1981): Random sample consensus: A paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. Communications of the ACM 24(6): 381-395.
- FGSV (1996): Richtlinien für die Anlage von Straßen (RAS), Teil Querschnitte (RAS-Q 96). Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Straßenentwurf, Bonn.
- HAKE, G., GRÜNREICH, D., MENG, L., 2002: Kartographie. de Gruyter Lehrbuch. 8. Aufl.
- KNABENSCHUH, M.(1999): Data post-processing of laser scan data for countrywide DTM production. In: FRITSCH, D. UND SPILLER, E. H. (HRSG.): Photogrammetrische Woche, Universität Stuttgart, Institut für Photogrammetrie, Stuttgart: 233-240.
- LAL, J. & MENG, L. (2001): Rules and constraints for 3D generalization of urban area. Journal of Geographical Sciences, Acta Geographica Sinica, Vol.11 Supplement 2001, Beijing: 17-28.
- LOHR, U. (1999): High Resolution Laserscanning, not only for 3D-City Models. In: FRITSCH, D. UND SPILLER, E. H. (HRSG.): Photogrammetrische Woche, Universität Stuttgart, Institut für Photogrammetrie, Stuttgart: 133-138.
- MOREAU, J-M., B. PROCHE Y. BOUDAUD, S. ROUILLARD E.M.S.E. (1997): Computer Aided Design Of Road Networks. Actes de DSC'97, Lyons (France), September 8-9 1997: 70-77.
- MÜLLER, J. C., J. P. LAGRANGE & R. WEIBEL (EDS.) (1995): GIS and Generalization: Methodology and Practice. Taylor and Francis, London.
- RUSAK MAZUR, E. & H. W. CASTNER (1990): Horton's ordering scheme and the generalisation of river networks. The Cartographic Journal 27: 102-12.
- SESTER, M. 2000. Generalization based on Least Squares Adjustment, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. Amsterdam, the Netherlands, 16-23 July 2000, Vol. XXXIII, Part B4/3, Commission IV: 931-938.
- SESTER, M. & A. KLEIN, 1999. Rule Based Generalization of Buildings for 3D-Visualization. 19 th International Cartographic Conference, Conference Proceedings, August 14-21,1999, Ottawa, Canada, Volume 1: 773-783.
- THOMPSON, R. C. & D. E. RICHARDSON (1995): A graph theory approach to road network generalization. Cartography crossing borders (Proceedings Seventeenth International Cartographic Conference). Barcelona, Institut Cartogràfic de Catalunya: 1871-80.
- WARE, J. & JONES, C. (1998), Conflict Reduction in Map Generalization Using Iterative Improvement. GeoInformatica 2(4): 383-407.

- WEIBEL, R. (1989): Konzepte und Experimente zur Automatisierung der Reliefgeneralisierung. Geoprocessing 15; Zürich, Dissertation, Universität Zürich.
- WEVER, CH., LINDENBERGER, J (1999): Experiences of 10 years laser scanning. In: FRITSCH, D. UND SPILLER, E. H. (HRSG.): Photogrammetrische Woche, Universität Stuttgart, Institut für Photogrammetrie, Stuttgart: 125-132.
- WIEDEMANN, C (2001): Extraktion von Straßennetzen aus optischen Satellitenbilddaten. Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Nr. 551.
- WU, H.-H.(1981): Prinzip und Methode der automatischen Generalisierung der Reliefform. Nachr. Karten- und Vermessungswesen, I 85, Frankfurt/M.: 163-174.

Dank

Teile der Forschungsarbeiten wurden aus Mitteln der Technion-Niedersachsen-Gesellschaft finanziert. Ein Teil der Daten wurde von TopScan GmbH, Steinfurt & Emschergenossenschaft, Essen zur Verfügung gestellt. ATKIS-DLM: © Geobasisdaten, Landesvermessungsamt NRW, 1116/2002, © Landesvermessungsamt Badenwürttemberg.

Einführung fester Transformationsparameter vom ETRS'89 zum Gauß-Krüger-Koordinatensystem über NWREF-Punkte zur einheitlichen Führung der Koordinaten und GIS-Datenbestände der Deutschen Steinkohle AG (DSK AG)

VOLKER SPRECKELS¹

Zusammenfassung: Die Deutsche Steinkohle AG (DSK) ist verpflichtet, die Auswirkungen des untertägigen Abbaus an der Tagesoberfläche zu überwachen und zu analysieren. Veränderungen, die durch bergbaubedingte Bodenbewegungen, z.B. an Oberflächengewässern entstehen, können durch Baumaßnahmen reguliert werden. Tagesanlagen und Bergehalden unterliegen ständigen, nachzuführenden baulichen Veränderungen, Altstandorte sind für die Nachnutzung aufzuarbeiten. In Forschungs- und Entwicklungsprojekten (FuE) sind Digitale Geländemodelle (DGM) untersucht worden, deren Transformationsstützpunkte im Anschluss an unterschiedliche Generationen von Trigonometrischen Punktnetzen (TP-Netz) und unterschiedlichen Bezugssystemen zur Transformation der GPS Messungen zum Gauß-Krüger-Koordinatensystem (GK) bestimmt wurden. Diese DGM weisen untereinander Lage- und Höhendifferenzen im dm-Bereich auf. Der Vergleich der Koordinaten identischer Punkte in TP-Netzen und Aufnahmepunktnetzen (AP-Netz) der Katasterämter zeigte noch größere Abweichungen. Im Frühjahr 2003 wurde für den Bereich der DSK-Ruhr ein über 23 NWREF-Punkte des Landesvermessungsamtes Nordrhein-Westfalen definierter Transformationsparametersatz zwischen dem European Terrestrial Reference System 1989 (ETRS89) und dem Deutschen Hauptdreiecksnetz (DHDN90) als System „DSK-Ruhr-23“ (RUHR'23) festgelegt. Hiermit ist ein fester Rahmen geschaffen worden, der einen Austausch zwischen den unterschiedlichen Systemen ermöglicht, und mit dem bei einer ausreichenden Anzahl identischer Punkte auch ältere Messungen und DGM mit einer annehmbaren Genauigkeit in ein einheitliches Bezugssystem zu transformieren sind.

1 Einleitung

Dieser Beitrag baut auf den Ergebnissen einer Reihe von FuE-Projekten der DSK, in Zusammenarbeit mit dem *Institut für Photogrammetrie und GeoInformation* (IPI) der Universität Hannover auf, in denen die Potentiale und Grenzen moderner satelliten- und flugzeuggestützter Aufnahmesysteme zur Ableitung von Digitalen Geländemodellen (DGM) zum großflächigen Monitoring von Bodenbewegungen im Ruhrgebiet untersucht wurden [IPI 2000, 2001, 2003; SPRECKELS 1999, 2000, 2001, 2002]. Einige Untersuchungen deckten systematische Abweichungen zwischen den betrachteten DGM auf [KOCH 1999; SPRECKELS 2002]. Nachfolgende Untersuchungen und Transformationsberechnungen über die Stützpunkte der DGM ergaben, daß die Lage- und Höhendifferenzen zwischen den auf unterschiedliche Bezugssystemen, wie z.B. *World Geodetic System 1984* (WGS84), *European Terrestrial Reference System 1989* (ETRS89), *Trigonometrische Punktnetze* (TP-Netz) unterschiedlicher Entstehungs-

¹ Volker Spreckels, Deutsche Steinkohle AG, Dienstleistungsbereich Ingenieurvermessung/Geoinformation (DSK-DIG), Karlstr. 37-39, 45661 Recklinghausen. Tel.: 02361 - 308 450, e-mail: volker.spreckels@deutsche-steinkohle.de

zeit, wie das System *Preußische Landesaufnahme* (PrLa) und das System *Netz'77* (Netz77), basierenden DGM zwar vorhanden waren, jedoch nicht in den Größenordnungen der vorliegenden systematischen Abweichungen. Somit scheinen die DGM auch innere Instabilitäten zu enthalten, die allerdings nicht mehr mit einem annehmbaren Aufwand rekonstruiert werden können. Es können nur Vermutungen darüber angestellt werden, ob diese Inkonsistenzen auf ungenauen Messungen von Verknüpfungspunkten und Auswertungenauigkeiten bei der Erstellung der photogrammetrischen DGM, sowie dem zeitweiligen Verlust der L2-Phase bei der Aufnahme der Laser DGM beruhen.

Die Abweichungen, sowohl zwischen den TP-Netzen der Landesvermessung, als auch zu und zwischen den AP-Netzen der Katasterämter, weisen so große Beträge auf, dass Überlegungen zu einem einheitlichen Bezugssystem angestellt wurden, um Lage- und Höhendaten einheitlich führen zu können. Die Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland (AdV) beschloß 1995 die Einführung des Bezugssystems ETRS89 für die Bereiche Landesvermessung und Liegenschaftskataster [ADV 1995]. Weitere Informationen und Erfahrungsberichte wurden [JAHN 2001] und [LVA-NRW 2001] entnommen.

Damit alle für die DSK relevanten Informationen nach einheitlichen Kriterien in dem Geo-Informationssystem (GIS) geführt und in der zentralen Datenbank (GDZB) vorgehalten werden können, wurde im Frühjahr 2003 ein über 23 NWREF-Punkte des Landesvermessungsamtes Nordrhein-Westfalen (LVA-NRW) definierter Transformationsparametersatz als Datum „DSK-Ruhr-23“ für die Interessengebiete der DSK-Ruhr festgelegt. Die GPS Messungen werden gemäß den GPS-Richtlinien [MI 2003], [MI 1997] durchgeführt.

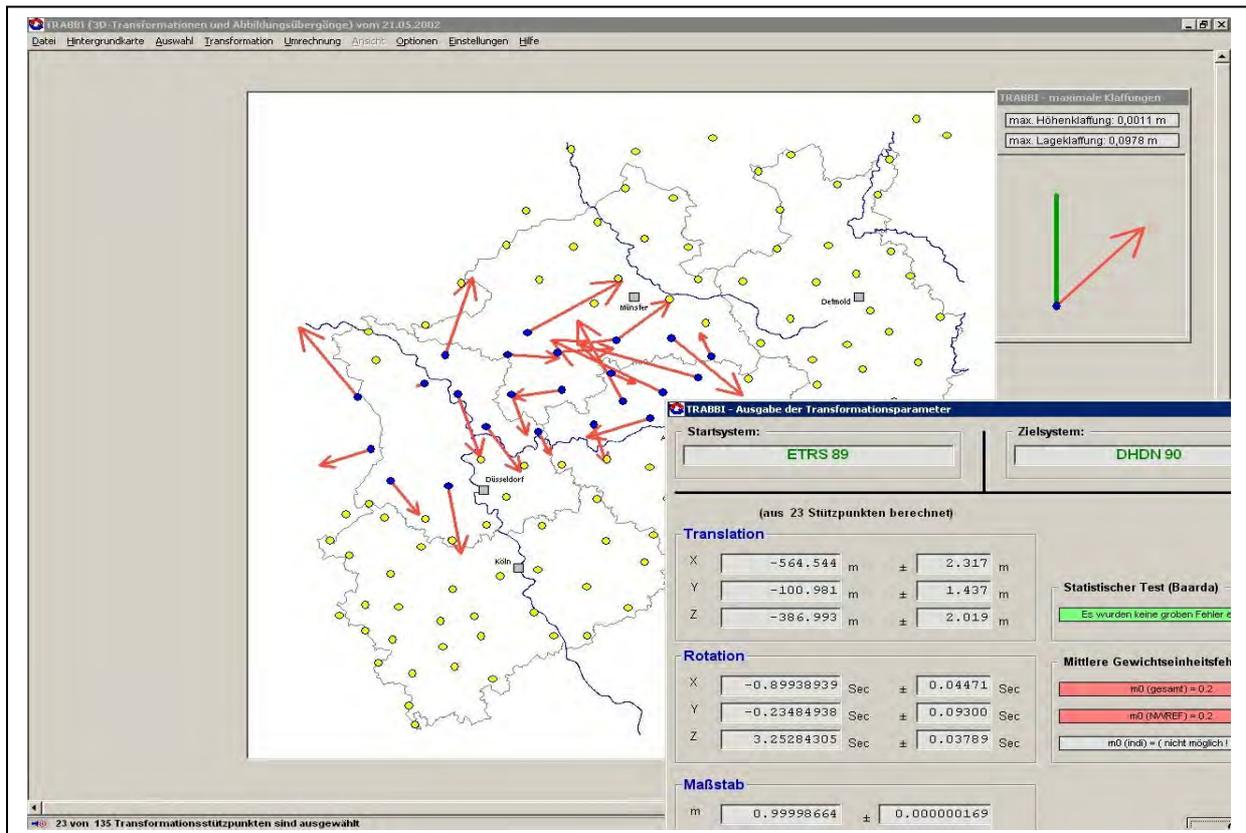


Abb. 1: Definition des Systems „DSK-Ruhr-23“ über 23 NWREF-Punkte: Lage der NWREF Punkte, Transformationsparameter vom ETRS'89 zum DHDN'90, Restklaffungen.

Bildflüge für photogrammetrische Auswertungen wurden bis zum Jahr 2002 über signalisierte Passpunkte (PP) orientiert. Die PP wurden über Trigonometrische Punkte in das jeweilige TP-Netz der Landesvermessung überführt. Somit liegen die photogrammetrischen Auswertungen zu Halden und Werksgeländen, und die Erfassung von DGM in Systemen der Landesvermessung vor.

Terrestrische Vermessungen hingegen werden in der Regel an die Aufnahmepunkte (AP) der jeweiligen Katasterämter angeschlossen. Da sowohl die TP-Netze, als auch die AP-Netze große Abweichungen im dm-Bereich zueinander aufweisen, kommt es bei der gemeinsamen Bearbeitung terrestrischer und photogrammetrischer Daten, sowie bei benachbarten DGM zu Lage- und Höhenabweichungen.

Abbildung 1 zeigt die Lage, Transformationsparameter und Restklaffungen der 23 NWREF Punkte im Transformationsprogramm TRABBI-3D der Landesvermessung Nordrhein-Westfalen [LVA-NRW 2002]. Somit können sowohl ältere DGM, photogrammetrische Auswertungen, Lagepläne, terrestrische Vermessungen, als auch die digitalen Daten moderner Sensoren über eine erneute Messung der zur Transformation der TP und PP verwendeten Punkte - oder auch über die Bestimmung zahlreicher identischer Punkte - per GPS, an SAPOS im ETRS89 angeschlossen, in das jeweilig zu betrachtende Aufnahmesystem transformiert und mit Auswertungen neueren Datums verknüpft werden. Zudem wird mit den flexiblen Transformationsmöglichkeiten über das einheitliche Bezugssystem der Datenaustausch mit Behörden, Verbänden und Ingenieurbüros erleichtert.

2 Vergleich: photogrammetrisches DGM'96 und Laser DGM'98

Im Dezember 2002 erfolgte die GPS-Nachmessung der ETRS89 Koordinaten auf neun TP, die für das DGM'96 als Transformationspunkte der 1996er GPS-Messungen zum GK-System dienten. Alle TP waren noch auffindbar und in gutem Zustand, sodass die Transformationsgeometrie wiederhergestellt werden konnte. Die TP liegen im TP-Netz „PrLa“ vor und sind, bis auf einen TP mit $-1,1$ cm, nicht von bergbaubedingten Senkungen betroffen. Die ETRS89 Koordinaten wurden mit TRABBI-3D in das System RUHR'23 transformiert. Anschließend wurden die Passpunkte mit dem Modul „TRAN3D“ aus dem Programmsystem BLUH in das System RUHR'23 transformiert [BLUH 2003]. Abbildung 2 zeigt im linken Bild eine Übersicht der TP und PP, im rechten Bild die Koordinatendifferenzen der TP und PP aus dem BLUH-Modul BLAN, nach der TRAN3D Berechnung.

Dem Protokoll zur Laser Befliegung 1998 zufolge, wurde der Flug über zwei frei im Gelände stationierte GPS-Empfänger gestützt aufgezeichnet. Eine Kontrolle der GPS-Punkte erfolgte über den Anschluss an eine SAPOS Station. Die GPS-Daten sind anschließend mit DREF-Transformationsparametern zum GK-System transformiert worden. In der weiteren Bearbeitung wurde das DGM'98 jedoch auf die Deutsche Grundkarte 1:5000 (DGK5) angepasst, wobei Offsets von $-1,35$ m in der Höhe, $-2,1$ m im Rechtswert und $-1,3$ m im Hochwert angebracht wurden.

Um das DGM'98 in das System RUHR'23 zu transformieren, wurden die Offsets wieder rückgängig gemacht. 64 gleichmäßig über das DGM'98 verteilte Punkte wurden mit DREF-Parametern vom GK-System zum GPS-Aufnahmesystem zurück gerechnet und dann mit dem neuen Parametersatz zum System RUHR'23 transformiert. Beide DGM sollten nun in einem einheitlichen System vorliegen.

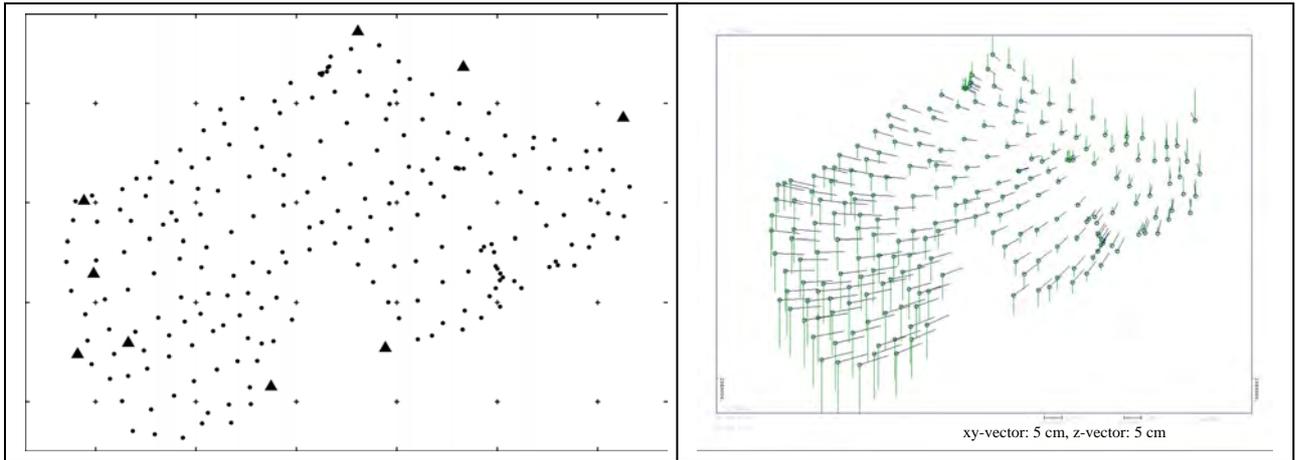


Abb. 2: Links: DGM'96: Übersicht der TP (▲) und PP (●). Gitterkreuzabstand: 5 km.
 Rechts: Differenzen der TP und PP zwischen TP-Netz (PrLa) und System RUHR'23.

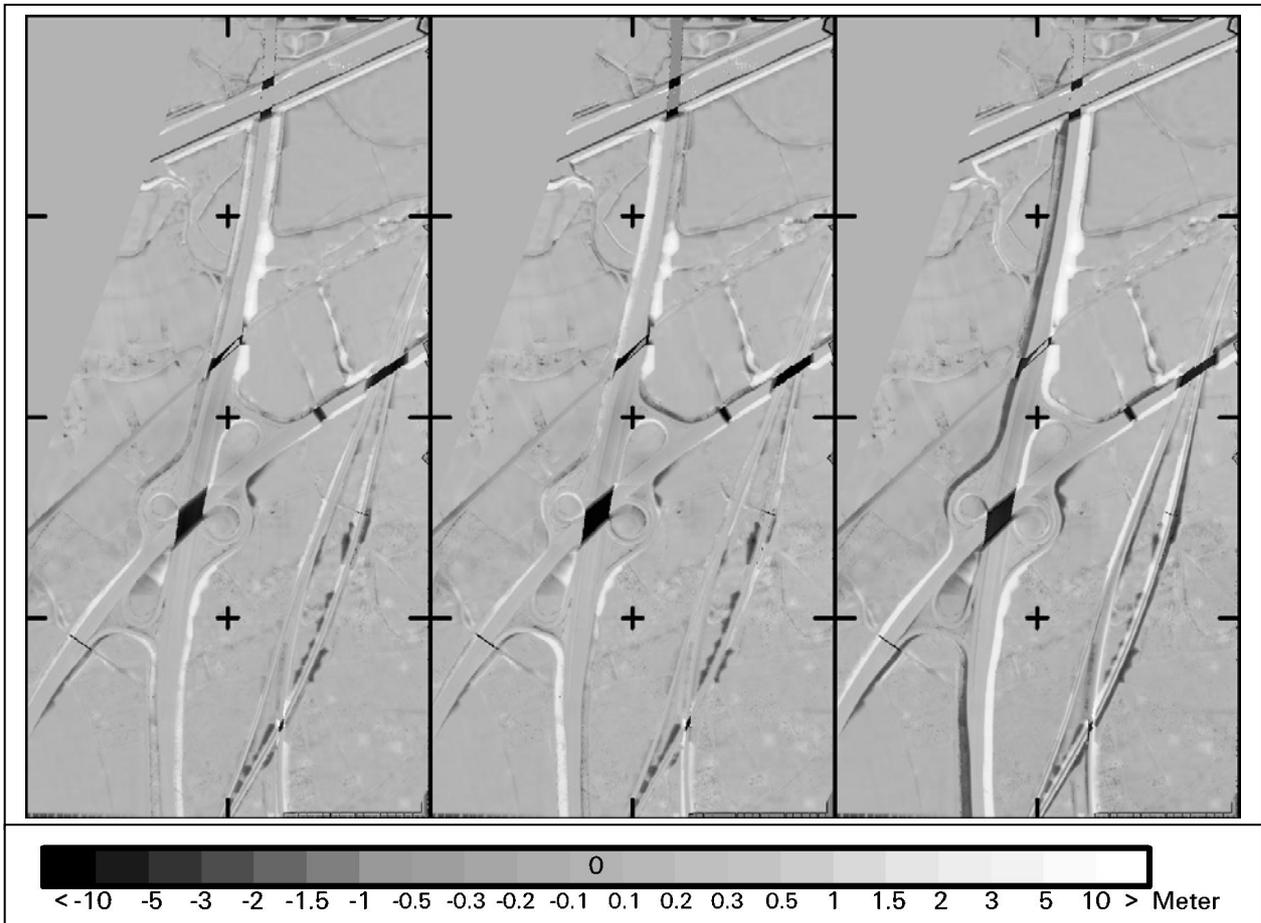


Abb. 3: Höhendifferenzen zwischen photogrammetrischem DGM'96 und dem Laser DGM'98.
 Links: Differenz der ursprünglichen DGM'96 und DGM'98.
 Mitte: Differenz des DGM'96 zum lagekorrigierten Laser DGM'98.
 Rechts: Differenzen zwischen DGM'96 und DGM'98 im System „DSK-Ruhr-23“.
 Gitterkreuzabstand: 500 Meter.

Abbildung 3 zeigt im linken Bild die Differenz der ursprünglich vorliegenden DGM'96 und DGM'98. Es sind eindeutig die durch Lageabweichungen bedingten Höhenunterschiede an Deichen und Böschungen zu erkennen. Das mittlere Bild zeigt die Differenz des photogrammetrischen DGM'96 zu dem, um die Offsets korrigierten, Laser DGM'98. Die Höhendifferenzen sind in einigen Bereichen geringer, in anderen größer geworden. Das rechte Bild zeigt mit der Differenz des DGM'96 zu dem in das System RUHR'23 transformierten Laser DGM'98 noch größere Höhendifferenzen und somit eine noch geringere Übereinstimmung der DGM.

Es ist nicht bekannt, ob zur Transformation des Laser DGM'98 die Verwendung eines Transformationsmodells über ein bestanpassendes Ellipsoid (z.B. Bursa-Wolf oder Molodensky-Badekas) mit einem vom Geozentrum unterschiedlichen Fundamentalpunkt erfolgte. Jedoch lassen die Differenzen der DGM auf die Verwendung eines solchen Transformationsmodells schließen, so dass in diesem Fall die RUHR'23 Parameter nicht zur Transformation verwendet werden können. Die zur endgültigen Beurteilung dieses Sachverhaltes nötigen Informationen sind jedoch nicht mehr vorhanden.

Zur Ermittlung, ob die DGM systematische Abweichungen enthalten oder nicht, wurden das DGM'96 und das DGM'98 in sieben kleinere Gebiete aufgeteilt. Für jedes dieser Gebiete wurde der Lage- und Höhenshift über eine 7-Parameter-Transformation berechnet. Die ermittelten Offsets wichen jedoch in Betrag und Richtung so stark voneinander ab, dass für den vorliegenden Überlappungsbereich der DGM keine flächendeckenden Systematiken ermittelt werden konnten. Die Annahme, dass innere Inkonsistenzen der beiden DGM vorliegen, wird durch das Protokoll zur Laser Befliegung gestützt, wo der Verlust der L2-Phase für Teile des Flugpfades erwähnt wird. Weiterhin gibt es für das photogrammetrische DGM'96 Anzeichen auf eine unzureichende Genauigkeit des DGM im Bereich des Autobahnkreuzes, die durch eine schlechte Verknüpfungspunktmessung entstanden sein könnte. Um diese inneren Ungenauigkeiten der einzelnen DGM noch weiter aufdecken zu können, ist jedoch ein hoher, nicht mehr vertretbarer Aufwand nötig.

Folglich sollten DGM Aufnahmen, die mit unterschiedlichen Aufnahmesystemen erfolgen, von vornherein an identische Punkte, oder mit vergleichbaren, nachvollziehbar protokollierten Verfahren an ein einheitliches Bezugssystem angeschlossen werden. Nur so ist es möglich, Aussagen über die innere und äußere Genauigkeit der Systeme und letztendlich des Produktes, dem DGM, machen zu können. Ein einheitliches Bezugssystem legt für alle Aufnahmesysteme bereits den äußeren Genauigkeitsrahmen fest, so dass eine bessere Beurteilung der inneren Genauigkeit erfolgen kann.

3 Überführung von DGM der DSK in das System „DSK Ruhr-23“

Die Einführung des Systems RUHR'23 erfolgte im Frühjahr 2003. Zu diesem Zeitpunkt sollte mit der photogrammetrischen Auswertung eines Bildfluges aus dem Jahr 2002 (DGM'02) zur Erstellung des sogenannten DGM 2. Stufe begonnen werden. Das DGM 1. Stufe wird automatisch aus digitalen Luftbildern, die in der Regel im Bildmaßstab 1:4000 vorliegen, mit einer Bodenauflösung von 5 Metern berechnet. Anschließend wird das DGM an einer digitalen Stereo-Auswertestation bereinigt und die Messung von Kunstbruchkanten mit einer Höhe von über 1 m durchgeführt. Das DGM 2. Stufe baut mit der Verdichtungsmessung von Böschungen und dem Gewässernetz auf dem DGM 1. Stufe auf, wobei auch terrestrische Vermessungen in Bereichen, die im Luftbild nicht einsehbar sind, eingearbeitet werden.

Im Frühjahr 2003 wurde der Bildflug zur Erstellung des DGM'03 durchgeführt, das direkt an das DGM'02 grenzt. Die Passpunkte zum DGM'03 wurden erstmals im System RUHR'23 aufgenommen, das DGM'02 jedoch wurde im Jahr 2002 noch an das TP-Netz angeschlossen. Damit die benachbarten DGM in einem System vorliegen, mussten die Linienpunkte des DGM 1. Stufe aus dem Jahr 2002 in das System RUHR'23 überführt werden.

Die Passpunkte der Befliegung im Jahr 2002 sind über sieben TP und über zwei Passpunkte einer Befliegung aus dem Jahr 2000 in das GK System transformiert worden und liegen somit im TP-System vor. Allerdings wurde die Passpunktbestimmung 2002 auch mit dem Anschluss an SAPOS-Stationen durchgeführt, so dass aus den Rohdaten der GPS Messungen die Passpunktkoordinaten in das System „DSK Ruhr-23“ übertragen werden konnten.

Da die Triangulation, DGM-Berechnung sowie die Aufnahme der Kunstbruchkanten bereits im TP-Netz erfolgte, mussten zusätzlich zu den Passpunkten etwa 27.000 Objektpunktkoordinaten und etwa 105.000 Linienpunkte zum System „DSK Ruhr-23“ transformiert werden, damit eine Stereo-Auswertung an analytischen Stationen im neuen System erfolgen konnte. Die maximalen Differenzen lagen im Rechtswert zwischen $-5,2$ cm und $+3,5$ cm ($s_x: \pm 1,9$ cm), für den Hochwert zwischen $+1,5$ cm und $+10,8$ cm ($s_y: \pm 6,5$ cm) und in der Höhe zwischen $-13,7$ cm und $+0,3$ cm ($s_z: \pm 6,1$ cm). Die Abweichungen liegen noch innerhalb der photogrammetrischen Messgenauigkeit für topographische Punkte, so dass vorerst auf eine Transformation der Höhenrasterpunktmessung verzichtet wurde.

Abbildung 4 zeigt eine Übersicht der TP, PP und Linienmessung, sowie die Differenzen der Gauß-Krüger Koordinaten zwischen dem TP-Netz und dem System „DSK Ruhr-23“. Die größten Abweichungen sind in den zur Transformation verwendeten Passpunkten zu sehen.

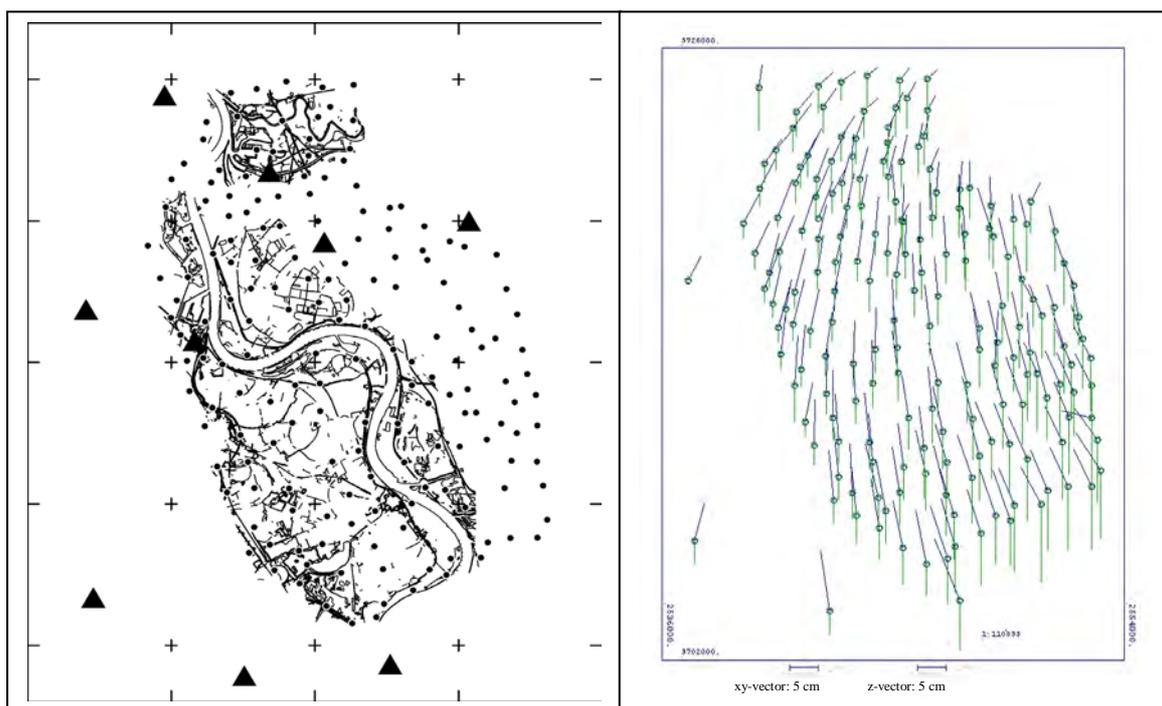


Abb. 4: DGM'02: Übersicht der TP (▲), PP (●) und Linienmessungen (links), Gitterkreuzabstand: 5 km. Differenzen zwischen TP-Netz und System „DSK Ruhr-23“ (rechts).

Diese PP sind bereits einer Ausgleichung in einem TP-Netz zu einer vorhergehenden photogrammetrischen Auswertung unterzogen worden (DGM'00), so dass die GK-Koordinaten der PP noch den Netzspannungen der älteren, benachbarten Netzkonfiguration unterliegen (siehe Abbildung 5, links).

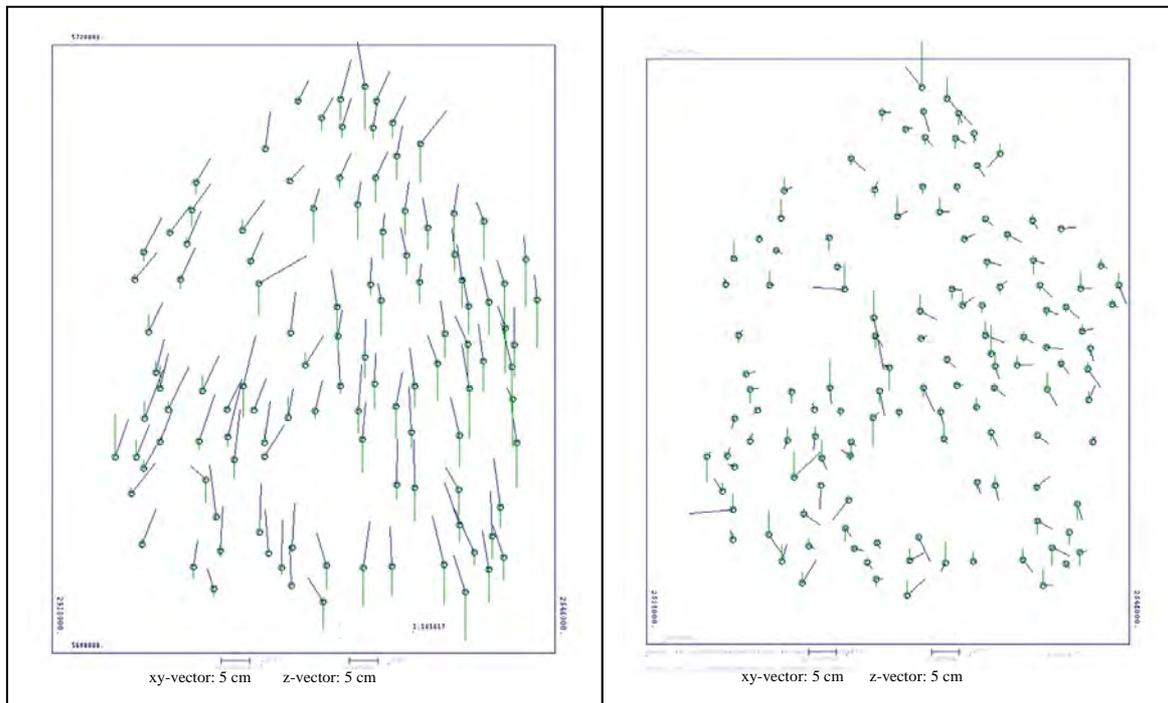


Abb. 5: Differenzen der PP des DGM'03 zu den PP des DGM'00, TP-Netz (links).
Differenzen der PP des DGM'03 zu den PP des DGM'00, System RUHR'23 (rechts).

Da das Gebiet des DGM'00 und des DGM'03 in großen Teilen übereinstimmen, wurden die GPS-Messungen aus dem Jahr 2000, damals noch mit einem Transformationsmodell nach Molodensky-Badekas und somit über die Verwendung eines Fundamentalpunktes, zurück zum geozentrischen System und von dort in das System RUHR'23 transformiert. Abbildung 5 zeigt im linken Bild die Differenzen der PP zwischen dem TP-Netz und dem System RUHR'23 und im rechten Bild die Differenzen der identischen PP 2000 und 2003 im System RUHR'23. Die maximalen Differenzen für den Vergleich der Punkte im System RUHR'23 liegen im Rechtswert zwischen $-1,6$ cm und $+4,4$ cm ($s_x: \pm 1,5$ cm), für den Hochwert zwischen $-4,7$ cm und $+3,0$ cm ($s_y: \pm 1,6$ cm) und in der Höhe zwischen $-5,2$ cm und $+5,0$ cm ($s_z: \pm 2,0$ cm). Somit stimmen die Koordinaten der im System RUHR'23 gemessenen und der in das System RUHR'23 transformierten Punkte, bis auf wenige Punkte, die noch Bodenbewegungen unterlagen, im Rahmen der Meßgenauigkeit [MI 2003] überein.

4 Überführung terrestrischer Vermessungen im AP-System in das System „DSK-Ruhr-23“

Neben den DGM erfolgen bei DSK-DIG Auswertungen zu Halden und Werksgeländen, aus denen z.B. Lagepläne und Flächenpläne der Tagesanlagen und Begrünungspläne zur Haldenbewirtschaftung erstellt werden. Diese Gebiete werden nicht in allen Fällen regelmäßig beflogen, so dass Veränderungen kleineren Ausmaßes über terrestrische Vermessungen fortge-

führt und in den GIS Datenbestand der GDZB übertragen werden. Zu Beginn des Jahres 2003 standen umfangreiche Bauarbeiten im Bereich einer Tagesanlage an, wobei die Erstellung eines aktuellen Lageplanes erforderlich war. Ein Bildflug konnte erst im März erfolgen, so dass vorab umfangreiche terrestrische Vermessungen stattfanden.

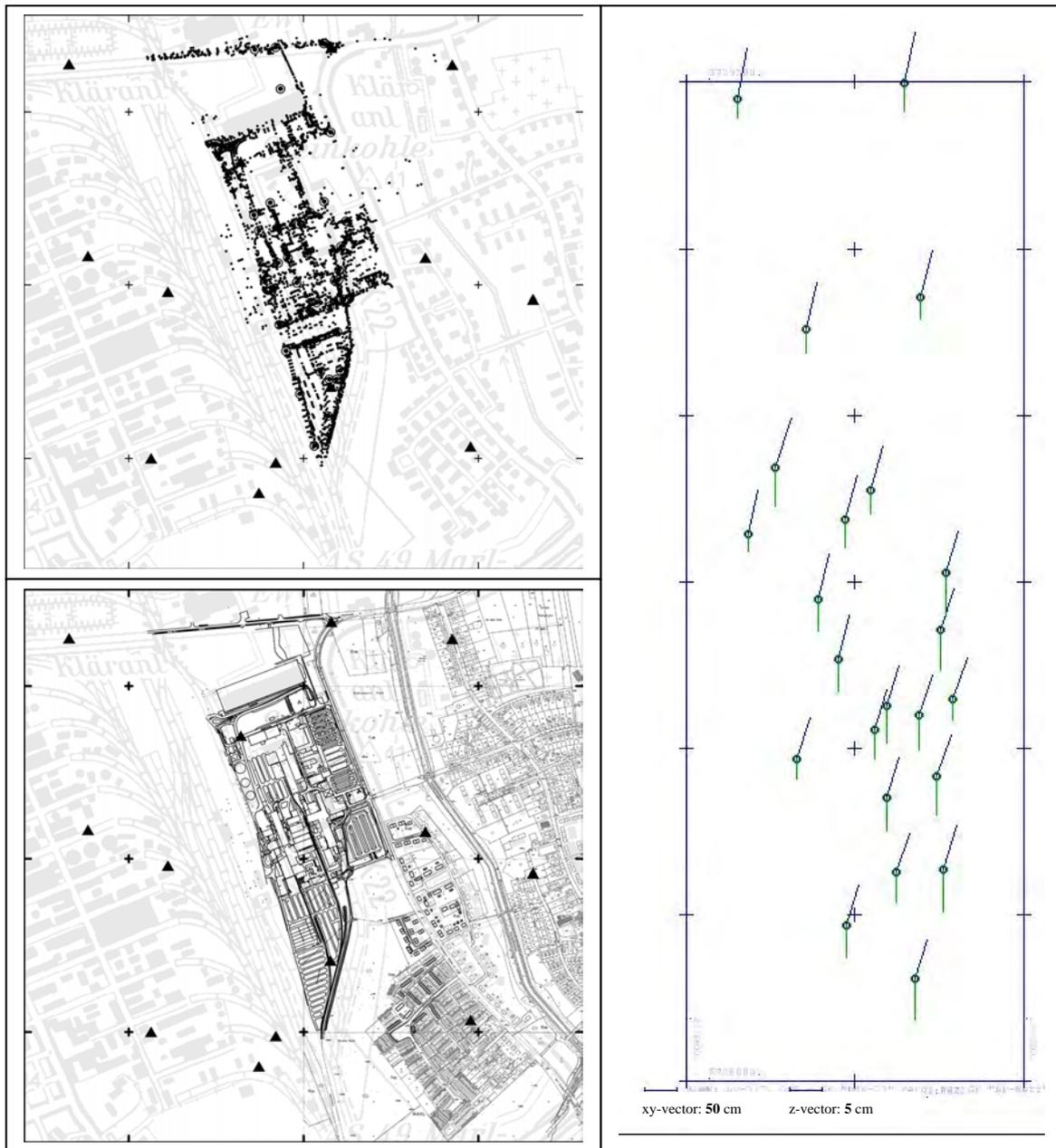


Abb. 6: Oben links: TK50 mit der Überlagerung der photogrammetrischen PP (▲), AP (⊙) und terrestrisch aufgenommenen Punkten (●). Gitterkreuzabstand: 500 Meter.
Unten links: TK50 (hellgrau) überlagert mit der Flurkarte (grau), Lageplan (schwarz) und photogrammetrischen PP (▲). Gitterkreuzabstand: 500 Meter.
Rechts: Differenzen in den AP des Liegenschaftskatasters zum System RUHR'23, Gitterkreuzabstand: 200 Meter.

Die terrestrischen Vermessungen wurden an die Aufnahmepunkte des Katasters angeschlossen, da in dem betroffenen Gebiet keine brauchbaren photogrammetrischen Passpunkte aus älteren Befliegungen in unmittelbarer Nähe vorhanden waren, und für den geplanten Bildflug noch keine Signalisierungsarbeiten stattgefunden hatten. Den Stand der terrestrischen Vermessung zum Zeitpunkt der Übergabe zur photogrammetrischen Auswertung zeigt Abbildung 6, links oben, mit einer Überlagerung der hellgrau dargestellten Topographischen Karte 1:50.000 (TK50) mit den photogrammetrischen Paßpunkten (▲), den AP (⊙) und den aufgenommenen Einzelpunkten (●). Abbildung 6 zeigt im Bild links unten eine Überlagerung der TK50 (hellgrau) mit den vorliegenden Flurkarten (grau), dem aus den terrestrischen Vermessungen erstellten Lageplan (scharz) und den im System RUHR'23 bestimmten photogrammetrischen Passpunkten (▲).

Die terrestrischen Daten wurden zuerst mit den AP-Netz Koordinaten zur Stereo-Auswertung übernommen, sie wiesen aber große Lageabweichungen zu den Luftbildern auf. Daraufhin wurden GPS-Messungen auf 23 AP durchgeführt und diese dann mit „TRABBI-3D“ in das System RUHR'23 transformiert. Die Abweichungen der Punkte lagen im Rechtswert zwischen +14,9 cm und +25,2 cm (s_x : $\pm 19,6$ cm), für den Hochwert zwischen +60,9 cm und +78,7 cm (s_y : $\pm 67,3$ cm) und in der Höhe zwischen -3,3 cm und -8,2 cm (s_z : $\pm 5,9$ cm). Abbildung 6 zeigt im rechten Bild die Verteilung der AP mit den Lage- und Höhendifferenzen. Alle terrestrisch aufgenommenen Punkte wurden anschließend mit TRAN3D in das System RUHR'23 transformiert. Zur Kontrolle erfolgte eine Überlagerung der transformierten Punkte mit der Flurkarte und dem Lageplan (siehe Abbildung 7).

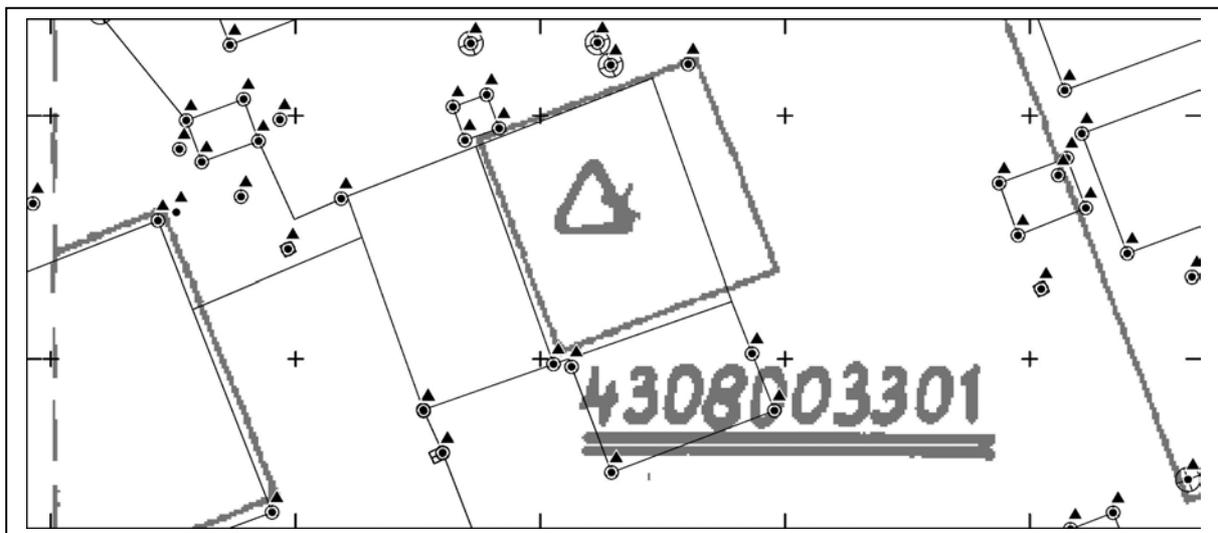


Abb. 7: Überlagerung der Flurkarte (grau), mit dem Lageplan (⊙ und schwarze Linien), terrestrischer Aufnahme (●) und der in das System „DSK-Ruhr-23“ transformierten terrestrischen Aufnahme (▲). Gitterkreuzabstand: 10 Meter.

Die transformierten Punkte weisen eine sehr gute Lage- und Höhenübereinstimmung zu den photogrammetrischen Stereomodellen auf, so dass die weitere photogrammetrische Auswertung auf den transformierten terrestrischen Daten aufbauen konnte.

Abbildung 8 verdeutlicht mit der Überlagerung von Orthophoto, photogrammetrischer Auswertung und Lageplan die Differenzen zwischen den Aufnahmesystemen.



Abb. 8: Orthophoto, überlagert mit dem Lageplan (schwarze Linien) und photogrammetrischer Auswertung (graue Linien). Gitterkreuzabstand: 20 Meter.

An dieser Stelle wird der Nutzen eines einheitlichen Aufnahmesystems deutlich: dadurch, dass die Koordinaten der AP in den beiden Systemen, AP-Netz und RUHR'23, vorliegen, können Daten aus dem Liegenschaftskataster spannungsarm in das DSK System transformiert werden. Andererseits können photogrammetrische Lagepläne ebenfalls spannungsarm dem Liegenschaftskataster zur Verfügung gestellt werden.

5 Zusammenfassung

Die Bearbeitung der FuE-Projekte hat gezeigt, dass der Vergleich der Höhenmodelle unterschiedlicher Aufnahmesysteme nur dann Aussagen über deren innere Genauigkeit zulässt, wenn die Daten in einheitlichen Bezugssystemen aufgenommen werden, oder durch Transformationen in ein einheitliches System überführt werden können. Liegen keine ausreichenden Informationen zu den Bezugssystemen und weiteren Verarbeitungsschritten vor, kann durch diese Unsicherheiten keine konkrete Aussage zu den Genauigkeiten der DGM gegeben werden.

Mit der Einführung eines festen Transformationsparametersatzes vom ETRS89 zum System „DSK-Ruhr-23“ wurde eine Basis geschaffen, über die unterschiedlichste Daten bei Bedarf ineinander überführt werden können, seien es terrestrische Vermessungen in AP-Netzen oder lokal angelegten Ingenieurnetzen, photogrammetrisch erstellte Pläne für Halden und Werks- gelände oder großflächige photogrammetrische DGM, deren Lage- und Höhenkoordinaten über den Anschluss an unterschiedliche TP-Netze erfolgte. Wenn die Stützpunkte für die Transformation in das Gauß-Krüger-Koordinatensystem wiederhergestellt werden können, so ist über eine Nachmessung der ETRS89 Koordinaten dieser Punkte eine direkte Transformation von Punkt-, Linien- und Flächendaten in das System „DSK-Ruhr-23“ möglich. Sollte die Bereitstellung dieser Daten in einem anderen Bezugssystem erfolgen, so müsste eine ausreichende Anzahl identischer Punkte in beiden Systemen vorliegen – so z.B. die Messung der ETRS89 Koordinaten von Aufnahmepunkten (AP) – und der Datensatz könnte in das Kataster-, Landesvermessungs- oder auch DSK-Ruhr-23-System mit einer Genauigkeit um ± 5 cm überführt werden. Bei der Bestimmung photogrammetrischer Passpunkte ist der Vorteil des

Systems „DSK-Ruhr-23“ erkennbar, denn kleine Aufnahmegebiete, wie z.B. einzelne Halden und Werksgelände, benötigen nicht mehr zwingend den Anschluss über einen oder mehrere TP, die im ungünstigsten Fall unterschiedlichen Netz-Generationen angehören und deren Spannungen dann auf die Bilddaten übertragen werden. Der Anschluss an amtliche Netze sollte jedoch sowohl für kleine Aufnahmegebiete als auch für große Befliegungsblöcke erfolgen, damit eine zusätzliche Kontrollmöglichkeit gegeben ist, da der „Lebenslauf“, und somit auch der aktuelle Zustand, der amtlichen Punkte bekannt ist:

- Für einen Bildflug aus dem Jahre 1997 wurden nur photogrammetrische Passpunkte eines Bildfluges aus dem Jahr 1987 als Transformationsstützpunkte verwendet. Im Zuge der Nachmessung der TP des DGM'96 sollten diese ebenfalls bestimmt werden, es konnten jedoch nicht alle PP wieder aufgefunden werden, so dass die Transformationsgeometrie nicht rekonstruiert werden kann.
- Für das DGM'02 wurden neben den TP zwei PP als Transformationspunkte verwendet. In diesen PP sind die größten Abweichungen festzustellen, da deren Koordinaten aus der Netzausgleichung zum DGM'00 stammen und somit die Spannungen einer Netzkonfiguration enthalten, die nicht mit der aus dem Jahr 2002 identisch ist.

Auf der Grundlage der festgesetzten Transformationsparameter vom ETRS'89 zum System „DSK-Ruhr-23“ wurde somit ein Rahmen für eine homogene Führung und Einbindung aktueller Daten und zukünftigen Auswertungen, der Überführung älterer Daten und von Daten aus anderen Aufnahmesystemen geschaffen.

6. Literatur

- ADV (1995): Das European Terrestrial Reference System 1989 (ETRS89), Internet: <http://www.adv-online.de/produkte/etrs89.htm>
- BLUH (2003): Program System BLUH (BundLe Block Adjustment University of Hannover), Internet: <http://www.ipi.uni-hannover.de/html/service/bluh/bluh.htm>
- IPI (2000): INSTITUT FÜR PHOTOGRAMMETRIE UND INGENIEURVERMESSUNGEN, UNIVERSITÄT HANNOVER: Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben „Nutzung von hochauflösenden Satellitendaten zur großräumigen Überwachung der Umweltauswirkungen bergbaulicher Tätigkeiten im Ruhrgebiet, Arbeitspaket 2: Stereoauswertung“. FuE-Vorhaben 0364000 der Deutschen Steinkohle AG, gefördert durch das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) unter Förderkennzeichen 50 EE 9652. SPRECKELS, V.; JACOBSEN, K., Institut für Photogrammetrie und Ingenieurvermessungen (IPI), Universität Hannover, 2000, unveröffentlicht.
- IPI (2001): INSTITUT FÜR PHOTOGRAMMETRIE UND INGENIEURVERMESSUNGEN, UNIVERSITÄT HANNOVER: Statusbericht zum Forschungsvorhaben „Überwachung bergbaubedingter Bodenbewegungen durch hochauflösende Satellitendaten und flugzeuggetragene Scannerdaten“. FuE-Vorhaben 0885000 der Deutschen Steinkohle AG. SPRECKELS, V.; JACOBSEN, K., Institut für Photogrammetrie und GeoInformation (IPI), Universität Hannover, 2001, unveröffentlicht.
- IPI (2003): INSTITUT FÜR PHOTOGRAMMETRIE UND INGENIEURVERMESSUNGEN, UNIVERSITÄT HANNOVER: Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben „Überwachung bergbaubedingter Bodenbewegungen (MONS)“. FuE-Vorhaben 0995000 der Deutschen Steinkohle AG. SPRECKELS, V.; JACOBSEN, K., Institut für Photogrammetrie und GeoInformation (IPI), Universität Hannover, 2003, unveröffentlicht.

- JAHN, C.-H. (2001): Ein neues aktives dreidimensionales Bezugssystem für Niedersachsen.
In: Wissenschaftliche Arbeiten der Universität Hannover, Nr. 239, 2001, S. 63 - 75.
- KOCH, A. (1999): Analyse und Aufbereitung von Laser-Scanner-Aufnahmen. Diplomarbeit am Institut für Photogrammetrie und Ingenieurvermessungen, Universität Hannover, 1999, unveröffentlicht.
- LVA-NRW (2001): SAPOS-Testbericht NRW. Anwendungsorientierte Untersuchungen in den SAPOS-Diensten HEPS und GPPS in NRW. Landesvermessungsamt Nordrhein-Westfalen, Arbeitsgruppe SAPOS-Test NRW, Stand 20. Dezember 2001, 46 Seiten.
- LVA-NRW (2002): TRABBI-3D-Transformationen und Abbildungsübergänge, auf CD-ROM. Landesvermessungsamt Nordrhein-Westfalen, 2002.
- MI (1997): Richtlinien zum Einsatz von satellitengeodätischen Verfahren im Aufnahme-punktfeld und im nachgeordneten Vermessungspunktfeld – GPS-Richtlinien (AP), vom 19.12.1997. Herausgeber: Innenministerium des Landes Nordrhein-Westfalen.
- MI (2003): Richtlinien zum Einsatz von satellitengeodätischen Verfahren im Vermessungspunktfeld – GPS-Richtlinien, vom 02.09.2002, 1. Nachtrag 15.04.2003. Herausgeber: Innenministerium des Landes Nordrhein-Westfalen.
- SPRECKELS, V. (1999): Monitoring of Hard Coal Mining Subsidence by Airborne High Resolution Digital Stereo Scanner Data.
In: ISPRS Joint Workshop on "Sensors and Mapping from Space", ISPRS WG I/I, I/3, IV/4, Hannover, 27. – 30. September 1999. (Auf CD-ROM).
- SPRECKELS, V. (2000): Monitoring of Hard Coal Mining Subsidence by HRSC-A Data“.
In: Proceedings of XIXth ISPRS Congress, Amsterdam, 16. – 23. Juli 2000, Seiten 1452 – 1458.
- SPRECKELS, V.; WEGMÜLLER, U.; STROZZI, T.; MUSIEDLAK, J.; WICHLACZ, H.-C. (2001): Nutzung von InSAR-Daten zur großflächigen Erfassung von topographischen Veränderungen über Abbaubereichen der Deutschen Steinkohle AG (DSK).
In: Tagungsband des Deutschen Markscheider Vereins (DMV) 2001, Trier, 26. - 28. Sept. 2001, S. 49 - 70.
- SPRECKELS, V. (2002): Untersuchung operationeller Aufnahmesysteme zur großflächigen Erfassung von Digitalen Geländemodellen und topographischen Veränderungen über Abbaubereichen der Deutschen Steinkohle AG (DSK AG).
In: Veröffentlichungen der DGPF-Jahrestagungen, 22. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF, 24. – 26. Sept. 2002, FH Neubrandenburg, S. 67 – 82.

Normentwurf für gescannte Luftbilder

KLAUS NEUMANN¹ & REINER SCHWEBEL²

Zusammenfassung: Mit dem Übergang von der analytischen zur digitalen Photogrammetrie hat die Erzeugung digitaler Luftbilder einen hohen Stellenwert bekommen. Die Herstellung erfolgt zur Zeit fast ausschließlich durch Scannen von analogen Luftbildern. Dabei steht der Anwender vor der Aufgabe, die geometrische und radiometrische Qualität der gescannten Bilder zu beurteilen. Wird das Scannen der Bilder als Dienstleistung erbracht, müssen Auftraggeber und Auftragnehmer den Scanauftrag genau spezifizieren.

Im Rahmen der Normreihe DIN 18740 für die Qualitätssicherung von photogrammetrischen Produkten legt der DIN-Arbeitsausschuss „Photogrammetrie und Fernerkundung“ einen Normentwurf „Anforderungen an das gescannte Luftbild“ vor. Der Normentwurf beschreibt, auf welche technischen Eigenschaften des Scanners geachtet werden muss und wie die geometrischen und radiometrischen Qualitätsparameter zu spezifizieren und zu prüfen sind. Ein Formblatt zur Ausschreibung von Scanaufträgen wird mitgeliefert. Dieses Formblatt spezifiziert Scanparameter, Datenformate, Metadaten, Prüfnachweise sowie eventuelle Zusatzleistungen.

1 Einleitung

Mit dem Übergang von der analytischen zur digitalen Photogrammetrie hat das digitale Luftbild eine zentrale Stellung erhalten: die Qualität photogrammetrischer Produkte wie Orthophotos oder digitale Höhenmodelle hängt in hohem Maße von der Qualität des digitalen Ausgangsbildes ab.

Die Erzeugung digitaler Luftbilder geschieht entweder durch Scannen von analogen Luftbildern oder durch direkte Aufnahme mittels digitaler Luftbildkameras. Digitale Luftbildkameras und damit erzeugte Luftbilder stehen heute im Mittelpunkt des Interesses der photogrammetrischen Fachwelt, die Erwartungen daran sind – berechtigterweise – sehr hoch. Ungeachtet dessen werden heute digitale Luftbilder fast ausschließlich durch Scannen von analogen Luftbildern erzeugt, da der praktische Einsatz digitaler Kameras erst am Anfang steht. Wie schnell sich diese Situation ändert, ist eine umstrittene und schwer zu beantwortende Frage.

2 Stellenwert analoger Luftbilder heute und morgen

Photogrammetrisch verwertbare Luftbilder werden heute von unterschiedlichen Sensoren erzeugt und zwar von

- hochauflösenden Satellitenkameras
- digitalen Matrix- und Zeilenkameras und
- photographischen Reihenmesskameras.

Die Einsatzgebiete hängen – wie in HEIER (2001) und LH SYSTEMS (2001) dargestellt – im Wesentlichen von der Bodenauflösung und von den geometrischen Eigenschaften ab.

¹ Dipl.- Ing. (FH) Klaus Neumann, Z/I Imaging GmbH, Ulmer Str. 124, 73431 Aalen, k.neumann@ziimaging.de

² Dr. – Ing. Reiner Schwebel, Reuchlinstr. 32, 73431 Aalen, reiner.schwebel@t-online.de

- Satellitenbilder, aufgenommen z.B. mit IKONOS, decken mit Auflösungen bis zu 1 m vornehmlich Anwendungen in den Bereichen Ressourcen, Landwirtschaft und Umwelt ab,
- Bilder von Zeilenkameras mit Auflösungen von 1m bis 0.1 m für Bereiche wie Forst, Topographie und Verkehrsplanung und
- Bilder von digitalen Matrixkameras und photographischen Reihenmesskameras mit Auflösungen von bis zu wenigen Zentimetern für Bereiche wie großmaßstäbliche Topographie und Stadtplanung.

Betrachtet man weiterhin die in der photogrammetrischen Praxis vorgefundene Häufigkeitsverteilung der Bildmaßstäbe (siehe HEIER, 2001), so liegt etwa die Hälfte der Anwendungen im Maßstabsbereich von 1:3 000 bis 1:10 000 . Dieser Bereich wird vornehmlich von digitalen und photographischen Flächenkameras abgedeckt.

Bilder mit Bodenaufösungen besser 1 m werden heute zu mehr als 90 % mit photographischen Reihenmesskameras aufgenommen. Dies unterstreicht den hohen Stellenwert des photographischen Bildes und dessen Digitalisierung mit photogrammetrischen Scannern. Der Prozess des Überganges vom gescannten photographischen Bild zum direkt aufgenommenen digitalen Bild dürfte, wie in BALTSAVIAS (2000) dargelegt, noch ein weiteres Jahrzehnt dauern.

Die technischen Vorteile der digitalen Kamera gegenüber der photographischen Kamera sind unbestritten. Entscheidend für die Dauer des Übergangsprozesses werden wirtschaftliche Gesichtspunkte und neue Anwendungen wie die „online Auswertung“ und die Ausweitung des Einsatzbereiches auf Grund der herausragenden radiometrischen Eigenschaften der digitalen Kamera sein. In jedem Fall ist es jetzt und für die Zukunft gerechtfertigt und notwendig, für das Scannen von photographischen Bildern Qualitätsstandards zu definieren und in Form einer Norm der photogrammetrischen Praxis zugänglich zu machen.

3 Die Normenreihe 18740 „Photogrammetrische Produkte“

Die Normenreihe „Photogrammetrische Produkte“ und die Grundsätze dazu sind in SCHWEBEL (2002) beschrieben. Der Normausschuss „Photogrammetrie und Fernerkundung“ des DIN (Deutsches Institut für Normung e. V.) hat die Normreihe fortgeschrieben; sie besteht aus vier Teilen:

- Teil 1 Anforderungen an Bildflug und analoges Luftbild (DIN, 2001),
- Teil 2 Anforderungen an das gescannte Luftbild (E DIN, 2003, in Vorbereitung),
- Teil 3 Anforderungen an das Orthophoto (DIN, 2003) und
- Teil 4 Anforderungen an digitale Kameras und digitale Luftbilder (in Vorbereitung).

Die Normenreihe ist nach folgendem Grundschema aufgebaut:

- Vorwort
- 1 Anwendungsbereich
- 2 Normative Verweisungen
- 3 Begriffe
- 4 Allgemeine Anforderungen
- 5 Prüfung
- 6 Besondere Anforderungen
- Anhang mit Formblatt zur Projektspezifizierung
- Stichwortverzeichnis

Die vom Arbeitsausschuss eingehend diskutierte Frage war, ob es – unabhängig vom Herstellungsprozess – eine einzige Norm für digitale Luftbilder geben sollte oder jeweils eine eigene Norm für gescannte Bilder und für direkt digital aufgenommene Luftbilder. Bei der Erarbeitung der jeweils maßgeblichen Qualitätskriterien hat sich gezeigt, dass getrennte Normteile für gescannte Bilder und mit digitaler Kamera aufgenommene Bilder den technischen und zeitlichen Gegebenheiten besser gerecht werden:

- Die technischen Anforderungen an das gescannte Bild sind stark geprägt von den Eigenschaften des analogen Bildes und den Eigenschaften des Scanners .
- Das Scannen von analogen Luftbildern ist Stand der Technik und ist voll in Produktion. Eine Norm zur Qualitätssicherung sollte so schnell wie möglich zur Verfügung stehen; dies wäre bei einer gemeinsamen Norm für gescannte und direkt aufgenommene Bilder nicht möglich.

Grundlage des gescannten Bildes ist das analoge Bild. In der im Weiteren beschriebenen Norm wird davon ausgegangen, dass das analoge Bild den Qualitätsansprüchen nach DIN 18740 Teil 1 „Anforderungen an Bildflug und analoges Luftbild“ voll entspricht. Nur auf dieser Grundlage können die Qualitätsansprüche an das gescannte Bild nach DIN 18740 Teil 2 (Normentwurf) erfüllt werden.

Im Rahmen der Normreihe DIN 18740 für die Qualitätssicherung von photogrammetrischen Produkten legt der DIN-Arbeitsausschuss „Photogrammetrie und Fernerkundung“ einen Normentwurf „Anforderungen an das gescannte Luftbild“ vor. Der Normentwurf beschreibt, auf welche technischen Eigenschaften des Scanners geachtet werden muss und wie die geometrischen und radiometrischen Qualitätsparameter zu spezifizieren und zu prüfen sind. Ein Formblatt zur Ausschreibung von Scanaufträgen wird mitgeliefert. Dieses Formblatt spezifiziert Scanparameter, Datenformate, Metadaten, Prüfnachweise sowie eventuelle Zusatzleistungen.

4 Normentwurf für gescannte Luftbilder

Der Bedarf nach immer mehr digitalen Bilddaten bringt die Notwendigkeit einer objektiven Qualitätskontrolle mit sich. Als Anleitung und Hilfe für die Ausschreibung von Projekten, sowohl im privaten, als auch im öffentlichen Umfeld soll die neue Norm „Anforderungen an das gescannte Luftbild“ dienen. Es gibt ebenfalls auf internationaler Ebene Ansätze die Qualität von digitalen Bildern zu beschreiben, auf die aber an dieser Stelle nicht weiter eingegangen wird. Für den interessierten Leser sollte ein Hinweis auf www.asprs.org genügen.

Normentwurf gescanntes Luftbild

Der Normentwurf untergliedert sich in 5 verschiedene Abschnitte und 3 Anhänge. Er liegt derzeit zur Einsicht aus und wird voraussichtlich 2004 als Norm veröffentlicht werden.

Abschnitt 1 Anwendungsbereich

Im Abschnitt 1 wird dargelegt, welche Zielgruppe mit dieser neuen Norm erreicht werden soll und welcher praktische Nutzen damit verbunden ist.

Abschnitt 2 Normative Verweisungen

Im Abschnitt 2 werden die Normen benannt, auf die sich der neue Entwurf mit abstützt.

Abschnitt 3 Begriffe

Im Abschnitt 3 werden neue fachspezifischen Begriffe, wie z.B. Artefakte oder Metadaten erklärt und beschrieben.

Abschnitt 4 Anforderungen an den photogrammetrischen Scanner

Diese Abschnitt soll nicht so sehr die grundsätzliche Technik eines Bildscanners beschreiben, weil es hierzu bereits einschlägige Normen (z.B. DIN, 2000) gibt, sondern vielmehr die spezifischen Eigenschaften eines photogrammetrischen Scanners, der sich wesentlich von herkömmlichen Bildscannern unterscheidet.

In hohem Maße wird dabei Wert auf die geometrische Genauigkeit des Scanners gelegt, die den Ansprüchen an photogrammetrische Messbilder genügen muss. Es ist beschrieben, wie der Anwender durch ein geeignetes Prüfverfahren die Toleranzen überprüfen kann, bzw. wie die Einhaltung der Grenzwerte nachgewiesen werden kann. Üblicherweise wird dies durch Scannen einer Präzisionsgitterplatte nachgewiesen, mittels derer die Abweichung der Scannerkoordinaten von ihrem Sollwert gemessen werden kann. Dabei hat sich in der Praxis eine maximale Abweichung von 8 μm als Richtwert etabliert. Die maximal erlaubte Standardabweichung der Scankoordinaten liegt bei 2 μm . Ein Formblatt im Anhang der Norm erlaubt dem Anwender einen entsprechenden Nachweis zu spezifizieren und vom Auftragnehmer einzufordern.

Eine weitere wichtige Eigenschaft eines photogrammetrischen Scanners ist eine hohe radiometrische Qualität. Damit der komplette Informationsgehalt eines Luftbildes erfasst werden kann, muss der Scanner einen bestimmten Dichtebereich mindestens erfassen können. Die Norm legt den Dichteunterschied auf 2,0 optische Dichte (oD) fest, was dem Dynamikbereich eines Luftbildfilmes entspricht, der üblicherweise in der Praxis vorkommt. Da in der Praxis Helligkeitsunterschied in den Luftbildern auftreten, kann dieser Dynamikbereich je nach Projekt in einem Bereich zwischen 0 oD und 3,0 oD liegen. Um möglichst genau Grauwertunterschiede im Bild zu erkennen und somit unter anderem bei Auto-Korrelationsmessverfahren, die beispielsweise bei der automatischen Höhenmodell Erzeugung verwendet werden, möglichst genaue Ergebnisse zu erzielen, ist eine möglichst große radiometrische Dynamik erforderlich. Als Wert für die Norm wurde deshalb eine Auflösung von 12 Bit pro Farbkanal festgelegt.

Allgemein kann man feststellen, dass eine hohe radiometrische Qualität des digitalen Bildes besonders die Genauigkeit und Güte von Aerotriangulation und DGM beeinflusst.

Wichtig für den Anwender ist wiederum die Möglichkeit der Prüfung, welche ebenfalls im Formblatt A der Norm beschrieben ist.

Moderne Scanner verfügen über eine automatische eingebaute radiometrische Kalibrierung (Normalisierung) der CCD, die zeitgesteuert nach den Angaben des Herstellers durchgeführt werden sollte. Ein nicht kalibrierte CCD zeigt im gescannten Bild dann entsprechende Artefakte. Der Anwender kann im Formblatt die Durchführung und Wiederholung der Normalisierung spezifizieren.

Entscheidend für die Bildqualität und für die Erkennbarkeit von Objekten am Boden ist das geometrische Auflösungsvermögen des Scanners, bzw. die optische Signalqualität. Die Norm legt hier als Mindestanforderung 50 Lp/mm fest, d.h. der Scanner muss einen Auflösungstest mit 10 μm Strichstärke abbilden können. Der Nachweis dieses Parameters kann durch Scannen eines geeigneten Testbildes (Auflösungstest) erbracht werden. Je größer hierbei der Kontrastunterschied zwischen hellen und dunklen Strichen ist, desto besser ist die optische Signalqualität. Diese spiegelt sich in der Erkennbarkeit von feinen Strukturen im Bild (z.B. auf Dächern) oder in einer scharfen Abbildung von Kanten wieder.

Abschnitt 5 Anforderungen an das Messbild

Allgemein gültig sind hier die Anforderungen an den zu scannenden Luftbildfilm nach DIN 18740-1. Damit eine innere Orientierung gemessen werden kann, müssen alle Rahmenmarken im gescannten Bild enthalten sein.

Um die geometrische Qualität des Scans zu prüfen, kann stichprobenartig eine innere Orientierung gemessen werden. Dabei dürfen die maximalen Verbesserungen $10\ \mu\text{m}$ nicht überschreiten (siehe DIN 18740-3). Artefakte oder Pixelversätze im Bild können dadurch allerdings nicht festgestellt werden, dies ist nur durch eine visuelle Prüfung möglich. Es empfiehlt sich beim Hersteller des Scanners nachzufragen, ob in der Hardware entsprechende Sicherheitsmechanismen eingebaut sind, um bei fehlenden Pixel eine Fehlermeldung oder Warnung auszugeben.

Der Nachweis und die Prüfung der radiometrischen Qualität gestaltet sich in der Praxis deutlich schwieriger. Hier kommen objektive Kriterien nur zum Teil zum Tragen. Eine Möglichkeit hierzu bietet die Histogramm Analyse, auf die im Anhang B der Norm näher eingegangen wird.

Bei der Herstellung von z. B. farbigen digitalen Orthophotos ist auf eine ausgewogene Farbbalance zu achten. Geprüft werden kann dies unter Zuhilfenahme von farbneutralen Flächen im Bild, wie Straße, Parkplatz oder Hausdach. Durch die Erzeugung eines partiellen Histogramms und mittels Vergleich der Histogramm-Mittelwerte aller 3 Farbkanäle kann die Farbbalance des Scans beurteilt werden. Praktischerweise führt man diese Messung an verschiedenen hellen Flächen durch, um die Farbbalance über den gesamten radiometrischen Auflösungsbereich zu prüfen. Das Verfahren wird in der Norm näher unter Anhang B beschrieben. Eine visuelle Prüfung des gescannten Bildes sollte in jedem Fall die Qualitätsbeurteilung abrunden. Hier treten sehr wohl subjektive Unterschiede auf, eine praktische Möglichkeit besteht darin, dass der Auftraggeber dem Auftragnehmer Beispiele von gescannten Bildern als Muster und Anhaltspunkt zur Verfügung stellt.

Die verwendete geometrische Auflösung hängt vom Bildmaßstab des Luftbildes und von der Anwendung ab, in der Praxis hat sich aber eine Pixelgröße zwischen 12 und $21\ \mu\text{m}$ durchgesetzt. Bedingt durch den Film und durch atmosphärische Einflüsse (z.B. Dunst) bringt eine höhere Scanauflösung keine höhere Genauigkeit und keinen höheren Informationsgehalt.

Sehr nützlich ist neben der Speicherung der eigentlichen Bilddaten auch die Speicherung von Metadaten, wie Hardware Version oder Scan Parameter. Die Norm enthält eine Liste von wichtigen Metadaten.

Alle Angaben können in einem Prüfbericht dokumentiert werden, die Norm gibt hier wiederum im Anhang ein Beispiel.

Anhang A Formblatt Spezifikation für Scanprojekte

Der Anhang A ist ein Formblatt, mit Hilfe dessen der Auftraggeber ein Scan-Projekt spezifizieren kann. Alle Angaben basieren auf die Inhalte der Norm. Das Formblatt kann somit zukünftig als Standard für die Ausschreibung von Scanprojekten verwendet werden.

Gleichzeitig gibt dies dem Auftragnehmer ein Instrument zur Dokumentation der erbrachten Leistungen. Das Formblatt kann vom Anwender vervielfältigt werden. Einzelheiten können dem Normentwurf entnommen werden.

5 Ausblick digitale Luftbildkamera

Der DIN Arbeitsausschuss „Photogrammetrie und Fernerkundung“ befasst sich derzeit mit der Erarbeitung einer Norm für digitale Bilder, welche direkt mit einem digitalen Sensor erzeugt werden. Obwohl diese neue Technik erst am Anfang der Einführung im Markt steht, ist es wichtig, rechtzeitig Qualitätsstandards zu setzen. Die Art und Weise, wie zukünftig Befliegungen ausgeschrieben werden, wird sich ändern. Begriffe wie Bildmaßstab werden ersetzt werden durch Bodenauflösung. Die ersten Erfahrungen mit digitalen Luftbildkameras mit Flächensensoren zeigen, dass im Vergleich zu Filmkameras eine höhere geometrische Qualität erreicht werden kann. Dadurch können z. B. durch eine höhere Befliegung Flugkosten gespart werden.

Die radiometrische Qualität von Luftbildern, die direkt mit einem digitalen Sensor aufgenommen wurden, wird der von gescannten Luftbildern überlegen sein. Umso wichtiger ist es, eindeutige Qualitätskriterien zu definieren, damit Potentiale dieser neuen Technik ausgeschöpft werden können und Vertrauen in die digitale Luftbildkamera beim Anwender aufgebaut wird.

6 Literaturverzeichnis

- HEIER, H., 2001: Deploying DMC in today's workflow. – Photogrammetric Week 01 / Dieter Fritsch/Rudolf Spiller (Eds), Wichmann, Heidelberg
- LH SYSTEMS, 2001: Produktinformation
- BALTSAVIAS, E., 2000: Future of Photogrammetric Scanner and Film Scanning. – GIM International 3 / 2000, S. 36-39.
- SCHWEBEL, R., 2002: Deutsche Normung in Photogrammetrie und Fernerkundung aus der Sicht von DIN .- Vortrag DGPF Jahrestagung Neubrandenburg 2002 Band 11.
- DIN, 2000: DIN ISO/IEC 14473 Büro- und Datentechnik – Mindestangaben für Bildscanner. Beuth-Verlag, Berlin
- DIN, 2001: DIN 18740-1 Photogrammetrische Produkte – Teil 1 Anforderungen an Bildflug und analoges Luftbild. - Beuth-Verlag, Berlin.
- DIN, 2003: E DIN 18740-2 Photogrammetrische Produkte – Teil 2 Anforderungen an das gescannte Luftbild. - Beuth-Verlag, Berlin.
- DIN, 2003: DIN 18740-3 Photogrammetrische Produkte – Teil 3 Anforderungen an das Orthophoto. - Beuth-Verlag, Berlin.

Untersuchungen zur Prüfung digitaler Photogrammetrischer Produkte nach DIN 18740

MANFRED WIGGENHAGEN¹ & ULLA WISSMANN²

Zusammenfassung: In den vergangenen Jahren wurden vom NABau-Arbeitsausschuss 03.02.00 „Photogrammetrie und Fernerkundung“ des Deutschen Instituts für Normung (DIN) in der Normreihe DIN 18740 Qualitätsstandards für Photogrammetrische Produkte erarbeitet. Für Bildflüge und analoge Luftbilder sowie für digitale Orthophotos liegen Normen bereits vor. Für Luftbilder, die mit digitalen Sensoren aufgenommen werden, sowie für digitale Bilder, die mittels Scannern erzeugt wurden, befinden sich z.Z. weitere Normen kurz vor der Fertigstellung. Im Rahmen dieses Beitrages werden Ergebnisse vorgestellt, die aus dem Einsatz der Normen bei der Produktion von digitalen Orthophotos und bei der Anwendung von Scannern resultieren.

1 Motivation

Die langjährige Mitarbeit in dem Arbeitsausschuss „Photogrammetrie und Fernerkundung“ des Deutschen Instituts für Normung (DIN) hat umfassende Einblicke in die Bereiche der Qualitätssicherung photogrammetrischer Produkte und die Definition von Prüfverfahren und Auftragspezifikationen ermöglicht. Da die Mitglieder des Arbeitsausschusses aus den Bereichen der Industrie, Universität, Behörden und Dienstleistungsunternehmen stammen, basiert die Entwicklung der Normen auf dem aktuellen Stand der Technik. In Abstimmung mit zusätzlich involvierten Experten werden technische Neuerungen und Erweiterungen in die Normentwürfe eingebunden, soweit es sachlich und zeitlich notwendig erscheint. Nach Prüfung der Normentwürfe durch die Prüfstellen des DIN, sowie nach Berücksichtigung aller Einsprüche der Fachberater wird die neue Norm dann durch Verkauf über die Beuth Verlag GmbH, Berlin der Öffentlichkeit zur Verfügung gestellt. Leider vergehen vom ersten Entwurf einer neuen Norm bis zur Freigabe und dem Verkauf über den Verlag etliche Monate, in denen praktische Untersuchungen zu den Inhalten der Norm nur im begrenzten Rahmen möglich sind. In diesem Beitrag soll daher der Versuch unternommen werden, Erfahrungen zu der bereits existierenden Norm 18740-3 „Photogrammetrische Produkte – Teil 3: Anforderungen an das Orthophoto“ vorzustellen, und auch die Diskussion für aktuelle Normentwürfe zur Festlegung von Anforderungen an Scanner zu eröffnen. Siehe (DIN, 2001).

2 Einführung

Eine Übersicht über internationale Normen und Standards für Photogrammetrie und

¹ Dr.-Ing. Manfred Wiggenhagen, Universität Hannover, Institut für Photogrammetrie und GeoInformation, Nienburger Str.1, D-30167 Hannover, email: wigge@ipi.uni-hannover.de

² Dipl.-Ing. Ulla Wissmann, Universität Hannover, Institut für Photogrammetrie und GeoInformation, Nienburger Str.1, D-30167 Hannover, email: wissmann@ipi.uni-hannover.de

Fernerkundung findet sich in (KRESSE, 2002). Zur Organisation und Arbeitsweise der DIN sowie den Zielsetzungen der aktuellen Normentwürfe wurde in (SCHWEBEL, 2002) bereits berichtet. Erste Erfahrungen zur Anwendung der Norm DIN 18740-1, 2001, „Photogrammetrische Produkte –Teil 1: Anforderungen an Bildflug und analoges Luftbild“ wurden von (KIEFER, 2002) vorgestellt. An dieser Stelle werden praktische Ergebnisse bei der Berechnung von digitalen Orthophotos am Institut für Photogrammetrie und GeoInformation der Universität Hannover (IPI) vorgestellt. Unter Nutzung der Prüfkriterien der Norm DIN 18740-3, 2001, „Photogrammetrische Produkte –Teil 3: Anforderungen an das Orthophoto“ wird untersucht, ob mangelhafte Produkte, Schwachstellen im Produktionsprozess und nicht normgerechte Ergebnisse anhand der Prüfkriterien erkannt werden können. Die Spezifikationen in der Norm werden aus der Sicht des praktischen Nutzers kritisch betrachtet und diskutiert. In ähnlicher Weise werden Aussagen zu Anforderungen an photogrammetrische Scanner getroffen.

2.1 Begriffe

Ohne eingehende Berücksichtigung aktueller Diskussionen zum Thema „True-Orthophoto“ wurde in der vorliegenden Norm DIN 18740-3 der Begriff „strenges Orthophoto“ aufgenommen. An der Stelle wird deutlich gemacht, dass sichttote Räume in digitalen Orthophotos weitgehend beseitigt werden können, wenn ein hochqualifiziertes digitales Höhenmodell, sich mehrfach überdeckende Ausgangsbilder und Algorithmen zum Auffinden und Auffüllen sichttoter Räume existieren. Da als Produkt in der Praxis häufig Orthophotomosaik und Orthophotokarten angeboten werden, wurden diese abgeleiteten Produkte ebenfalls in der Norm beschrieben. Als für die Auftragsvergabe wichtige Parameter werden dort z.B. definiert: „Bodenpixel, Bildtiefe, Orthophotomaßstab und Kontrollpunkt“. Im Abschnitt Qualitätssicherung werden wichtige Begriffe aus dem Bereich des Qualitätsmanagements aufgeführt. Neben den bekannten Größen, wie „Standardabweichung des digitalen Orthophotos“ und „Standardabweichung des digitalen Höhenmodells“ wurden zusätzlich die Kriterien „zulässige geometrische Restklaffung“ und „zulässige radiometrische Differenz“ definiert. Grenzwerte für diese Größen können in Absprache zwischen Auftraggeber und Auftragnehmer in den Spezifikationen der Norm festgelegt werden.

2.2 Allgemeine Anforderungen

In den allgemeinen Anforderungen der Norm werden Begriffe und Zusammenhänge definiert, die für die reibungslose Abwicklung von Orthophotoproduktionen wichtig sind und zur Qualitätssicherung dienen können. Hier werden z.B. die folgenden Parameter beschrieben: „Geometrische Auflösung des digitalen Orthophotos“, „Bildtiefe des digitalen Orthophotos“, sowie Anforderungen an analoge und digitale Messbilder und an das digitale Höhenmodell. Da der Produktionsprozess digitaler Orthophotos aus mehreren Komponenten besteht, wird im Abschnitt „Digitales Orthophoto“ z.B. näher auf „Geometrische Bildtransformation“, „Resampling“ und „Grauwertbereich des Orthophotos“ eingegangen. Weiterhin werden Anforderungen an das strenge Orthophoto, das digitale Orthophotomosaik, die digitale Orthophotokarte und die Speicherung und Ausgabe von Orthophotoprodukten formuliert.

2.3 Prüfung von Orthophotoprodukten

Um normgerechte Produkte erhalten zu können, werden Prüfschritte definiert, die während des Herstellungsprozesses und bei der Endkontrolle der Produkte angewendet werden

können. Generell werden die Produkte qualitativ und visuell in geometrischer und radiometrischer Hinsicht geprüft. Es wird unterschieden zwischen der Prüfung analoger und digitaler Produkte. Im Detail wird auf die Prüfmöglichkeiten und Ergebnisse im Kapitel 4 eingegangen.

3 Spezifikation für Orthophotoprojekte

Nachfolgend wird auf die in Anhang A der Norm DIN 18740-3, „Spezifikation für Orthophotoprojekte“ festgelegten Parameter eingegangen. Soweit möglich werden erste Bewertungen der Parameter in der praktischen Anwendung vorgenommen.

3.1 Grundlegende Parameter

Als wesentliche Parameter bei der Orthophotoproduktion werden die Größe des Bodenpixels und die Standardabweichung der Lagekoordinaten des digitalen Orthophotos festgelegt. An dieser Stelle ergaben sich früher je nach Verwendungszweck eingehende Diskussionen mit den möglichen Auftraggebern. Diese Festlegungen werden in der Spezifikation als sehr wichtig angesehen.

Analoges Messbild. Innerhalb dieses Abschnittes werden alle Parameter festgelegt, die für die Nutzung analoger Messbilder gelten. Besonders wichtig sind z.B.: Bildmaßstab, Längs- und Querüberdeckung, Kontrastausgleich und Kalibrierungszertifikat.

Digitales Messbild. Innerhalb dieses Abschnittes werden die Parameter festgelegt, die für die Nutzung digitaler Messbilder gelten. Als besonders wichtig werden z.B. angesehen: Nachweis der geometrischen Qualität des Scanners, Geometrische Scanauflösung und Bildtiefe. Bei direkter digitaler Aufzeichnung werden neben der geometrischen und radiometrischen Auflösung der digitalen Kamera die Bereitstellung der Daten der äußeren Orientierung, der Bildtriangulation und Informationen über das geodätische Bezugssystem gefordert. Betrachtet man den Arbeitsablauf bei der Orthophotoproduktion im Detail, so werden an dieser Stelle einige der wichtigsten Zusatzdaten aufgesetzt: Innere Orientierung, äußere Orientierung und Bilddaten als Eingangsdatensatz.

Digitales Höhenmodell. Wichtige Parameter für die Festlegung des zu verwendenden Höhenmodells sind die Begrenzung und der Typ, ob es sich um ein Geländemodell oder ein Oberflächenmodell handelt, sowie die Standardabweichung der Höhen des Modells. Wichtig für die Qualität des Höhenmodells und des damit berechneten Orthophotos sind in der Praxis zusätzliche Angaben, wie Kantenlinien, Bruchkanten, und markante Punkte.

3.2 Produkte

Digitales Orthophoto. In diesem Abschnitt werden u.a. folgende Parameter definiert: Begrenzung des zu produzierenden Orthophotos, Kachelung sowie die Forderung nach überlappender Prozessierung der Orthophotos. In Abhängigkeit vom Verwendungszweck sind weiterhin die Interpolationsverfahren der geometrischen Bildtransformation wählbar. Falls der Grauwertbereich des Ausgabeproduktes abweichend von der Norm gewünscht wird, so kann dies ebenfalls spezifiziert werden.

Strenges Orthophoto. An dieser Stelle kann die zusätzliche Behandlung und Korrektur sichttoter Räume gefordert werden. In Anhängigkeit von der verwendeten Software muss hier mit erheblichem manuellem zusätzlichem Aufwand, insbesondere in urbanen Gebieten, gerechnet werden. Außerdem muss für die Korrektur der sichttoten Räume eine ausreichende Anzahl zusätzlicher Luftbilder vorhanden sein.

Digitales Orthophotomosaik. Als zusätzliche wichtige Parameter bei der Berechnung von Orthophotomosaiken sind die Festlegung der Schnittlinien und des Randausgleiches anzusehen. Auch hier kann die Begrenzung und Kachelung spezifiziert werden.

Digitale Orthophotokarte. Zur weiteren Bearbeitung des Ausgabeproduktes ist festzulegen, wer die zusätzlichen Vektordaten bereitstellt, welcher Blattschnitt und welche Kartengestaltung gefordert werden.

Speicherung und Ausgabe. In diesem Abschnitt kann die Art der digitalen und analogen Ausgabe spezifiziert werden. Im digitalen Fall ist die Festlegung des Datenformates und des Datenträgers wichtig. Die analoge Ausgabe muss im festgelegten Maßstab auf einem geeigneten Ausgabegerät erfolgen.

4 Beispiele

Die nachfolgenden Beispiele wurden mit dem Programm OrthoBASE unter ERDAS IMAGINE 8.5 berechnet (ERDAS 1, 2003 , ERDAS 2, 2003). Um die Aussagekraft der einzelnen Prüfkriterien untersuchen zu können, wurden in den Herstellungsprozess gezielt Mängel aufgenommen und die Auswirkung auf des Endergebnis dokumentiert. Die Reihenfolge der Untersuchungen resultiert aus Anhang A der Norm DIN 18740-3, "Spezifikation für Orthophotoprojekte". Nachfolgende Sachverhalte wurden anhand der Prüfkriterien der Norm DIN 18740-3 untersucht:

- Fehlerhafte Orientierungsdaten,
- Fehler im DGM,
- Unvollständiges DGM,
- Fehlerhafte Radiometrie an den Schnittstellen eines Mosaiks.

Als Kontrollmöglichkeiten wurden vorgesehen:

- Visuelle Kontrolle des Ergebnisses
- Lagekontrolle mit Kontrollpunkten
- Kontrolle durch Vektorüberlagerung

Im Anhang C der DIN 18740-3 befindet sich ein Beispiel für einen Prüfbericht. Im folgenden Kapitel werden einzelne Bestandteile des Prüfberichtes näher untersucht und mit Beispielen belegt.

4.1 Nachweis der geometrischen Qualität der A/D Wandlung

Der Nachweis der geometrischen Qualität der A/D Wandlung wird in der Regel durch ein entsprechendes Kalibrierungsprotokoll der scannenden Firma erbracht. Bei den meisten digitalen Bildern kann das Datum und das Ergebnis der letzten Kalibrierung aus der Bildhistorie, dem Bildheader oder den Zusatzdaten entnommen werden. In den vorliegenden Fällen wurde die geforderte Qualität mit einer Lagegenauigkeit von $\pm 2 \mu\text{m}$ bei einer Pixelgröße von $12 \mu\text{m}$ eingehalten.

4.2 Qualität der inneren Orientierung

Die Bildmarken wurden in allen Fällen mit einer Genauigkeit von besser als $\pm 10 \mu\text{m}$ gemessen. Überschreitungen dieses Wertes weisen meistens auf einen nicht oder schlecht kalibrierten Scanner hin. In einzelnen Fällen können sie aber auch bei der Bildaufnahme und innerhalb des Entwicklungsprozesses entstanden sein. In diesem Fall ist das analoge Filmmaterial vor der A/D Wandlung zu überprüfen.

4.3 Qualität der äußeren Orientierung

Zur Überprüfung der Auswirkung der äußeren Orientierung wurde in das Orthophotoprojekt ein Lagefehler in der Bildorientierung von 10 m eingeführt. Dieser Lagefehler führte zu erkennbaren Lagefehlern im Orthophoto an Kontrollpunkten von 0.70 – 1.30 m. Durch Überlagerung der Kontrollpunktlagen mit dem Ausgabebild konnte bereits durch visuelle Überprüfung die Auswirkung erkannt werden.

An den bis zu zehn Positionen wurden Kontrollpunkte über Kanaldeckeln gemessen und visualisiert. Der ermittelte Lagefehler lag zwischen 0.20 m und 0.70 m. Nach Korrektur der fehlerhaften Bildorientierung konnte visuell keine Abweichung mehr zwischen den Soll- und Ist-Lagen der Kontrollpunkte erkannt werden. Insbesondere in ländlichen Regionen ist die Beschaffung von signalisierten oder gut erkennbaren natürlichen Kontrollpunkten oft sehr schwierig. Die Überprüfung der Geometrie einzelner Bilder kann dann ggf. nur bei Orthophotomosaiken an den Bildrändern der beteiligten Orthophotos geschehen. An Kanten, die möglichst rechtwinklig zum Bildrand verlaufen, ist z.B. bei fehlerhafter äußerer Orientierung ein deutlicher Lageversatz zu erkennen. Bei einer Bodenpixelgröße von 0.12 m ergaben sich in dem untersuchten Beispiel 6 - 7 Pixel Lageversatz im Orthophotomosaik und damit Lagefehler am Boden von 0.72 - 0.84 m.

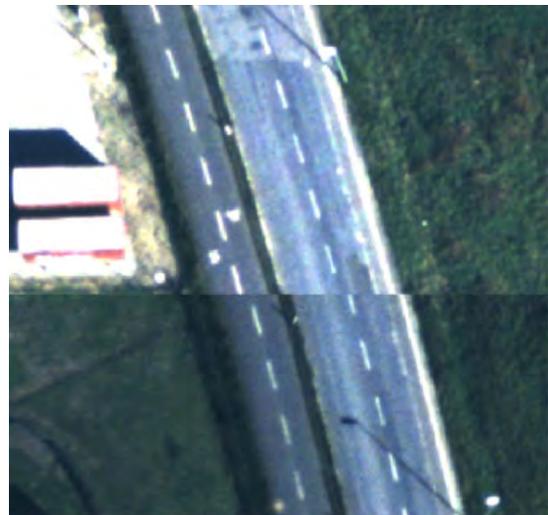


Abb.1: Lageversatz am Bildrand

4.4 Qualität des digitalen Höhenmodells

Neben der Einhaltung der geforderten Höhengenaugigkeit des verwendeten digitalen

Höhenmodells sollte unbedingt auch die Vollständigkeit, die korrekte Georeferenzierung und bei der DHM-Berechnung mittels automatisierter Oberflächenrekonstruktion die fehlerfreie Berechnung von Bruchkanten und Aussparungsflächen überprüft werden. Bei unvollständig vorhandenem Höhenmodell ergeben sich an den Rändern im Orthophoto Doppelabbildungen und Lageverschiebungen aufgrund nicht vorhandener Höhenwerte (siehe Abb.2). Der höhenmäßig erfasste Bereich ist in der Abbildung grau gerastert dargestellt. Bei fehlerhafter Georeferenzierung bzw. bei nicht modellierten Bruchkanten und Aussparungsflächen ergeben sich unstetige Kanten und Deformationen im Orthophoto (siehe Abb.3).



Abb.2: (links) und Abb.3: (rechts) : Auswirkungen fehlerhafter Höhendaten

4.5 Qualitative Prüfung

In den Untersuchungen wurden einige der typischen Auffälligkeiten bei der qualitativen Prüfung erkannt und dokumentiert. Als Auswirkung von Mängeln im Produktionsprozess sind erkennbar: Unstetiger Verlauf linienhafter Objekte, Versatz von Straßen und Doppelabbildungen.

4.6 Überlagerung mit Karten und GIS-Daten

Zur weiteren Überprüfung des Orthophotomosaiks wurden Vektordaten des Orthophotobereiches aus der digitalen topographischen Karte 1 : 5000 genutzt. Bei fehlerfrei berechneten Orthophotos stimmten die Gebäudekanten auf der sichtbaren Gebäudeseite im Bereich von +/- 0.24 m mit der Vektordarstellung überein. Nutzungsgrenzen wurden ebenfalls zur Überprüfung der Orthophotos eingesetzt. In Schattenbereichen und bei starker Baumbedeckung konnte jedoch nur eine stichprobenartige Kontrolle durchgeführt werden.

4.7 Geometrische Prüfung mit Passpunkten und Kontrollpunkten

Die Darstellung der verwendeten Passpunkte und die Überlagerung über das berechnete Orthophoto ist bei digitalen Arbeitsstationen bzw. PC-basierten Systemen problemlos möglich. Auch nicht signalisierte Punkte wie z.B. Kanaldeckel können gut als Kontrollpunkte genutzt werden. Bei der Bereitstellung von Kontrollpunkten ergeben sich gerade in nicht urbanen Gebieten in der Praxis Probleme. Die Forderung gemäß Abschnitt 5.2.3.3 der E DIN 18740-3:2002-11 nach gleichmäßig verteilten Kontrollpunkten in den

Überlappungsbereichen der Orthophotos und in den stärker geneigten Geländeabschnitten ist bei z.B. bewaldeten Gebieten nur selten erfüllbar.

4.8 Prüfung benachbarter Orthophotos

Benachbarte Orthophotos können an den Bildrändern sowohl geometrisch als auch radiometrisch geprüft werden. Nach fehlerfreier geometrischer Herstellung ist anschließend die harmonische radiometrische Anpassung der Mosaikteile erforderlich. Diese radiometrische Anpassung kann vollautomatisch über die Berücksichtigung der Radiometrie in den Überlappungsbereichen der Bilder geschehen oder wird in Einzelfällen durch manuelle Festlegung der Schnittlinien berechnet. Die Berechnung über eine automatisch festgelegte Schnittliniendefinition lieferte ein nicht befriedigendes Ergebnis. Die Radiometrie wurde dabei nicht bzw. nur unvollständig angepasst. Die Grauwertdifferenz zwischen benachbarten homogenen Flächen betrug an mehreren Stellen mehr als 16 Grauwerte. Das Mosaik erfüllt damit die Anforderungen der Norm nicht.

Auf die Prüfung analoger Orthophotoprodukte wird an dieser Stelle nicht näher eingegangen.

5 Nachweis der Qualität der A/D Wandlung

Ein wichtiger Bestandteil des digitalen Orthophotos ist das digitale Eingangsbild, welches durch A/D Wandlung bzw. Scannen mittels photogrammetrischer Scanner entstanden ist. In der aktuell entstandenen Norm: DIN 18740-2 „Photogrammetrische Produkte Teil 2 Anforderungen an das gescannte Luftbild“ wurden Anforderungen aufgenommen, die den aktuellen Stand der Technik berücksichtigen. Sehr viele der geometrischen und radiometrischen Qualitätsanforderungen der neuen Norm werden in wissenschaftlichen Veröffentlichungen wie z.B. bei (BALTSAVIAS, 1999) bestätigt. In (WIGGENHAGEN, 2001) wurden bereits einige der typischen Testmöglichkeiten zur Überprüfung eines Scanners vorgestellt. Bei der täglichen Nutzung photogrammetrischer Scanner können jedoch nicht sämtliche Möglichkeiten der Überprüfung und Kalibrierung ausgeschöpft werden. Die minimale Kontrolle der radiometrischen und geometrischen Qualität des entsprechenden Scanners mit einer standardisierten Testvorlage ist hier allerdings durchführbar. Eine derartige Testvorlage sollte über kalibrierte Farbflächen bzw. Graukeile, Linientestflächen und Siemenssterne, sowie geometrisch einwandfreie Gittermarken verfügen. Zur wirtschaftlichen Auswertung der mehrfach gescannten Vorlage wird Auswertesoftware empfohlen, die sowohl die geometrischen als auch die radiometrischen Anforderungen überprüfen kann.

6 Schlussbemerkung

Anhand praktischer Versuche konnte gezeigt werden, dass die Prüfverfahren der DIN 18740-3 „Photogrammetrische Produkte – Teil 3: Anforderungen an das Orthophoto“ grundlegend geeignet sind, Mängel in den Produkten aufzudecken. Die Prüfverfahren erscheinen in der Praxis jedoch nicht in allen Fällen als realisierbar. Insbesondere die Forderung nach möglichst vielen, gleichmäßig verteilten unabhängigen Kontrollpunkten erscheint nur selten erfüllbar.

Die Kriterien der DIN 18740-2 „Photogrammetrische Produkte Teil 2 Anforderungen an das gescannte Luftbild“ entsprechen den aktuellen technischen Möglichkeiten der angebotenen Scanner. Mittels geeigneter Testvorlagen und Auswerteprogrammen können die Prüfungen in der Praxis durchgeführt werden.

7 Literatur

- BALTSAVIAS, E., P., 1999: On the performance of photogrammetric scanners, Photogrammetric Week '99, Fritsch/Spiller (Hrsg.) Wichmann Verlag Heidelberg, 1999, S.155-173
- DIN, 2001: DIN 18740-1 Photogrammetrische Produkte- Teil 1 Anforderungen an Bildflug und analoges Luftbild. -Beuth-Verlag, Berlin.
- ERDAS 1, 2003 Accuracy Assessment of Automated Aerial Triangulation, http://www.erdas.com/admin/ProductGroups/Files/OBASE_Accuracy_Assessment.pdf, Zugriff am 10.6.2003.
- ERDAS 2, 2003 OBASE Workflow, <http://www.erdas.com/admin/ProductGroups/Files/OBASEWorkflow.pdf>, Zugriff am 10.6.2003.
- KIEFER, L., 2002: Ausschreibungen von Bildflügen, Erfahrungen der Flurneuordnungsverwaltung Baden-Württemberg. Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation, Band 11, Eckhardt Seyfert (Hrsg.), S. 291-293.
- KRESSE, W., 2002: Übersicht über internationale Normen und Standards für Photogrammetrie und Fernerkundung, Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation, Band 11, Eckhardt Seyfert (Hrsg.), S. 305-311.
- SCHWEBEL, R., 2002: Deutsche Normung in Photogrammetrie und Fernerkundung aus der Sicht von DIN. Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation, Band 11, Eckhardt Seyfert (Hrsg.), S. 285-290.
- WIGGENHAGEN, M., 2001: Geometrische und radiometrische Eigenschaften des Scanners Vexcel UltraScan5000, PFG 1/2001, S. 33-37.

Internationale Normungsarbeiten für Photogrammetrie und Fernerkundung

WOLFGANG KRESSE¹

Zusammenfassung: Derzeit beschäftigen sich eine ganze Reihe von Arbeitsgruppen mit der Normung in Photogrammetrie und Fernerkundung. Die Normungsprojekte ISO 19129 "Imagery, gridded, and coverage data framework" und ISO 19130 "Sensor and data models for imagery and gridded data" sind davon die wichtigsten. Weiterhin zu nennen sind die Arbeiten des ISO/IEC JTC1 mit der Normung von VRML und X3D, die Spezifikationen des OpenGIS Consortiums (Earth Imagery Case, Web Map Server interface, SensorML und andere), die ISPRS Working Groups (WG I/1 "Define standards for sensor parameters" and WG II/4 "Image data standards"), die Arbeiten von CEOS einschließlich der ISPRS/CEOS Joint Task Force on Radiometric/Geometric Calibration, und EuroSDR.

Die Fertigstellung der ISO-Normen für Bilddaten und Sensoren hat sich verzögert, weil Fachleute für Laserscanning, SAR/InSAR und hydrographische Sensoren in den Projektgruppen nicht verfügbar waren.

Künftige Arbeitsschwerpunkte müssen die Fertigstellung der ISO-Normen und die noch bessere Koordinierung der teilweise auseinander driftenden Aktivitäten sein.

1. Vorwort

Im allgemeinen Sprachgebrauch besitzen Normen eine absolute Autorität. Normen haben die Aura des Konsenses, sei es ein gesellschaftlicher oder ein technischer. Wer sich ihnen entgegenstellt oder sie sogar absichtlich missachtet, begibt sich in die Gefahr der Isolierung.

Wer sich mit technischen Normen beschäftigt, weiß, dass sie Empfehlungen sind, die man vor allem aus Gründen der Vertragsbindung oder der Sicherheit vor Schadensersatzansprüchen beachten muss. In vielen Fällen ist es einfach zweckmäßig, sich an Normen zu halten. Auch hier wird die Entstehung von Normen mit Expertenteams verbunden, die in der Lage waren, den Stand der Technik für alle Beteiligten bestmöglich zu fixieren. Normen beinhalten eine systematische Zusammenfassung des aktuellen Fachwissens.

Das Ansehen von Normen entspricht nicht überall der Realität. Unterschiedliche Gremien beschäftigen sich unabhängig voneinander mit Normen auf gleichen oder ähnlichen Sektoren und neue Normen müssen auf bereits bestehende unter Inkaufnahme von Kompromissen Rücksicht nehmen. Oft wird sogar vom Kleinen ins Große gearbeitet und nicht umgekehrt.

2. Nationale Normen und Standards

Die Arbeit an nationalen Normen und die Arbeit an internationalen Normen unterscheidet sich dabei grundlegend. Nationale Normen kommen dem Idealbild dabei deutlich näher. Das

¹ Prof. Dr. Wolfgang Kresse, Fachhochschule Neubrandenburg, Brodaer Str. 2, 17033 Neubrandenburg, Tel. 0395 / 5693 – 355, Fax 0395 / 5693 – 399, E-mail kresse@fh-nb.de

liegt an dem einheitlichen technischen Entwicklungsstand innerhalb eines Landes, der einheitlichen Gesetzgebung und nicht zuletzt daran, dass sich die Experten meist untereinander kennen. Daraus erwachsen Normenwerke, die einem Gesamtkonzept folgen und Terminologie, Grenzwerte, Formate und ähnliches im Detail festlegen. Dieses gilt sowohl für die offiziellen Normen, die in Deutschland vom Deutschen Institut für Normung e.V. herausgegeben werden, als auch für andere Standards, beispielsweise jene der AdV wie das AFIS-ALKIS-ATKIS-Projekt.

3. Internationale Normen und Standards

Die Internationale Normung dagegen folgt anderen Gesetzmäßigkeiten. Entweder entsteht ein Konsens auf abstraktem Niveau oder eine schon international ausgereifte Industrielösung bekommt das offizielle Siegel der ISO. Hinzu kommen die Industriestandards. Auf dem Feld der Geoinformationssysteme sind die abstrakten Normen meist das Ergebnis der Arbeit des ISO/TC211 „Geographic information / Geomatics“. Die anwendungsorientierten Normen entstanden meist beim OpenGIS Consortium (OGC), der wichtigsten Industrie- und Anwendergruppe der Geoinformatik.

Man unterscheidet sehr fein zwischen Normen und Standards. Im allgemeinen werden als Normen nur solche Werke bezeichnet, die von einer offiziellen Normungsstelle wie DIN oder ISO herausgegeben werden. Standards dagegen werden von „inoffiziellen“ Stellen wie Firmen oder Behörden herausgegeben. Dennoch spielen Industrie- und Behördenstandards natürlich eine erhebliche, in vielen Fällen vielleicht sogar die zentrale Rolle.

4. ISO und IEC (International Electrotechnical Commission)

Die ISO hat für die Geoinformatik einen sehr systematischen Ansatz verfolgt. Die Grundlagen wurden von den Europäern vor 10 Jahren mit dem CEN/TC287 „Geographic Information“ gelegt. Diese Arbeiten wurden 1994 vom neu gegründeten ISO/TC211 „Geographic information / Geomatics“ übernommen und weiterentwickelt. Sie sind heute weitgehend abgeschlossen. 18 der ursprünglich 20 Normungsprojekte haben jetzt die Stufen DIS, FDIS oder IS erreicht (Draft International Standard, Final Draft International Standard, International Standard).

Das ISO/TC211, in das auch die Belange von Photogrammetrie und Fernerkundung eingebunden sind, hat die ISO 19100 Normenfamilie hervorgebracht, ein im wesentlichen abstraktes Normenwerk. Zwei wichtige Normen dieser Familie sind die ISO 19107 „Spatial schema“, welche die Vektorgeometrie umfassend darlegt, und die ISO 19111 „Spatial referencing by coordinates“, welche weltweit eine einheitliche geodätische Modellbildung schafft. Die Normen für Bilddaten und Sensoren, ISO 19129 und ISO 19130, sind noch in Bearbeitung.

Allerdings ist die GIS-Entwicklung in der Zwischenzeit nicht stehen geblieben. Die neueren Normungsprojekte passen in den ursprünglichen Ansatz leider oft nicht gut hinein. Die Berücksichtigung von Rasterdaten erfordert Ergänzungen im Bestehenden an mehreren Stellen. Themen wie „Location based services“ (ISO 19132 - ISO 19134) fügen sich nicht nahtlos in das Gebäude der ersten 20 Normen ein. Bei den „Metadata - Implementation specifications“ (ISO 19139) ist es fraglich, ob das ISO/TC211 nach der Metadata-Norm (ISO 19115) auch noch für deren Implementierung zuständig ist.

4.1 ISO 19129

Die Arbeiten an der Normung der Rasterdaten wurden über die letzten Jahre zögerlich betrieben. Das lag eventuell daran, dass die Anforderungen an den Umfang der Norm zunächst etwas unklar waren und zudem viele der Fachleute noch mit der Fertigstellung der Vektornormen beschäftigt waren. So wurden bis 2001 nur zwei Studien über zu berücksichtigende Rasterdatenformate fertiggestellt (ISO 19121 und ISO 19124). Dann begann die Arbeit an der ISO 19129 und der ISO 19130. Das Ziel der ISO 19129 ist die Sammlung aller Teilthemen, die für Rasterdaten von Belang sind, und die anschließende Abspaltung wichtiger Teilthemen als eigenes Normungsprojekt. Inzwischen sind bereits die Projekte ISO 19101-2 „Imagery reference model“ und ISO 19115-2 „Metadata - Part 2: Extensions for imagery and gridded data“ als eigenständige Normungsprojekte entstanden. Die ISO 19101-2 wird typische Anwendungsszenarien für Photogrammetrie und Fernerkundung enthalten, um den weiteren Rasterdatennormen einen klareren Bezug zu geben. Die ISO 19115-2 wird die umfangreiche Gruppe der Metadata für Photogrammetrie und Fernerkundung aufnehmen. Hier sind eine wichtige Grundlage die Remote sensing metadata des FGDC (FGDC, 2002). Beiträge zu beiden Normungsvorhaben sind aus der Fachwelt herzlich willkommen. Zur Zeit werden beide Normen fast ausschließlich von den US-Amerikanern gestaltet.

Konzeptionell sieht die ISO 19129 die Abspaltung weiterer Teilthemen als eigenständige Normungsprojekte vor. Der derzeit wichtigste Kandidat ist die Datenspeicherung. Es wird wahrscheinlich eine ISO 19118-2 „Encoding for imagery“ entstehen. Für die Ausgabe von Bilddaten ist eine Ergänzung der ISO 19117 „Portrayal“ vorgesehen. Bei vielen anderen Normen der ISO 19100 Familie sind noch interne Abstimmungen erforderlich, ehe an eine Ergänzung für Bilddaten gedacht werden kann. Die Abstimmungsarbeiten werden von der „Harmonized Model Maintenance Group“ (HMMG) des ISO/TC211 geleitet. Einige Themen lassen sich keiner der bisherigen Normen sinnvoll zuordnen. Diese werden daher wahrscheinlich zunächst innerhalb der ISO 19129 selbst genormt. Dazu gehören Fragen der Radiometrie und der Bildanalyse.

4.2 ISO 19130

Das Normungsprojekt ISO 19130 „Sensor and data models for imagery and gridded data“ startete ebenfalls im Frühjahr 2001. Nach anfänglichen schnellen Fortschritten ist seit mehr als einem Jahr Stillstand eingetreten. Der Grund sind fehlende Fachleute für die Spezialthemen Laserscanning, Radar und hydrographische Sensoren (Echolot und Sonar). Dagegen sind die Kapitel über die Rahmenkamera, die satellitengestützten Zeilensensoren und das Randthema Papier- und Filmscanner fertiggestellt (siehe Abbildung 1). Das Projekt wurde einerseits weise begrenzt auf die ausschließliche Normung von Meta- und Orientierungsdaten, die für eine Georeferenzierung der Sensordaten erforderlich sind. Photogrammetrisch lässt sich der Themenumfang gut mit der Inneren und Äußeren Orientierung umschreiben. Andererseits musste man den Forderungen einzelner Projektteammitglieder nachgeben und bestimmte Sensoren in den Arbeitsumfang aufnehmen. Dazu zählen vor allem die hydrographischen Sensoren, denn die IHO (International Hydrographic Organization) war vom Anfang des ISO/TC211 an eines der wichtigsten Partnermitglieder (External liaison member of ISO/TC211). Derzeit bemühen sich die Mitglieder des Projektteams intensiv um Kontakte zu geeigneten Fachleuten, um die Normungsarbeiten abschließen zu können. Die Finanzierung der meisten Projektteammitglieder war für einen so langen Bearbeitungszeitraum nicht vorgesehen.

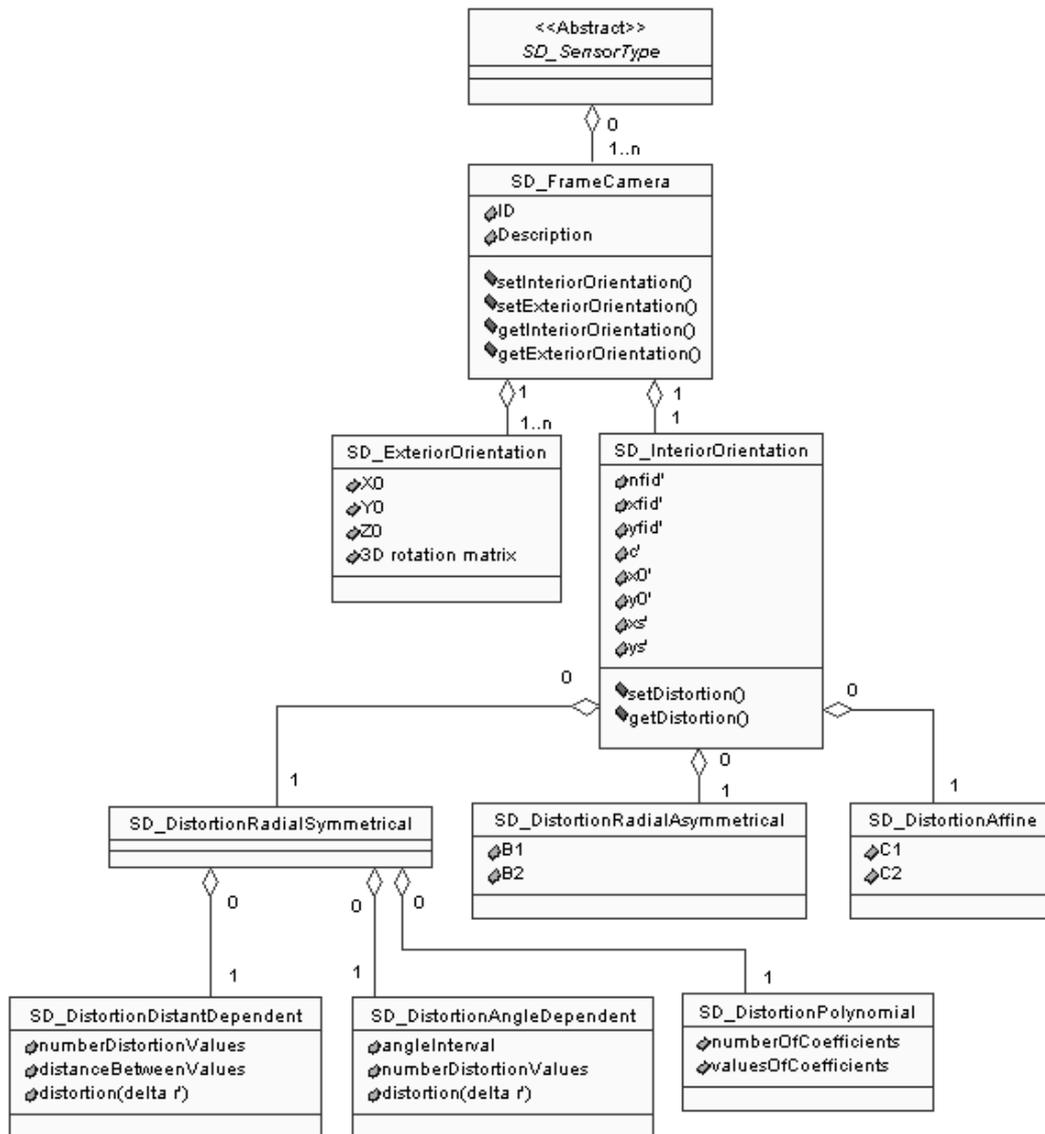


Abb. 1: Datenmodell der Rahmenkamera nach ISO 19130

4.3 JTC1

Das ISO/TC211 ist nicht das einzige Technical Committee, das sich mit Normen beschäftigt, die für Photogrammetrie und Fernerkundung relevant sind. Für 3D-Anwendungen ist auch eine Normenfamilie beim ISO/IEC JTC1 entstanden. Das JTC1 ist eine Organisation, die als gemeinsame Untergruppe von ISO und IEC vor etwa 10 Jahren gegründet wurde. JTC1 steht für Joint Technical Committee 1. Weitere JTC, z.B. JTC2, gibt es aber nicht. Das JTC1 hat die Normung im Softwarebereich übernommen und beispielsweise die Programmiersprachen Fortran, Basic, C und C++ als ISO-Norm herausgegeben. Die für die 3D-Darstellung wichtigsten Entwicklungen sind VRML und X3D. VRML steht für Virtual Reality Modeling Language und wurde 1997 als die Internationale Norm ISO/IEC 14772 veröffentlicht. Inzwischen wurde VRML vom W3C übernommen, in XML formuliert und unter dem neuen Namen „Extensible 3D (X3D)“ veröffentlicht. Das X3D ist die neue Norm ISO/IEC 19775.

Beide Normen bilden die Grundlage für den Aufbau von 3D-Modellen aller Art und damit für ein klassisches Feld der Photogrammetrie. Darüber hinaus beschäftigt die schnelle Entwicklung beim JTC1 die Gemüter des ISO/TC211, da es Überlappungen der Normen gibt, beispielsweise bei der Behandlung des Raumbezugs durch Koordinaten. Hier müssen eventuell bereits vorhandene Normen zu Gunsten einer einheitlichen Lösung einander angepasst werden.

5. OGC

Wie dargelegt haben sich vor allem ISO und OGC die umfassende Normung von Geoinformationen zur Aufgabe gemacht. In der Anfangseuphorie entstand bei OGC vor 10 Jahren eine umfangreiche Abstract Specification. Sie enthält in Topic 7 (OGC, 1999) auch wichtige Elemente für Photogrammetrie und Fernerkundung, beispielsweise das Universal Real Time Model. In letzter Zeit haben die Abstract Specifications allerdings an Bedeutung verloren, weil sie nur in eingeschränktem Maße für die Implementierungen weitergenutzt wurden.

Die erfolgreicheren OGC-Projekte wurden die Implementation Specifications, die meist auf vorangegangenen Testbeds aufbauten, und die Resultate des Interoperability Programs. Als Beispiele seien die Web Map Service Implementation Specification und das für Deutschland wichtige Pilotprojekt zur Geodateninfrastruktur in Nordrhein-Westfalen genannt. Die Auswahl der Projekte hängt heute in erster Linie von den Wünschen der geldgebenden Firmen und Behörden ab.

Einige dieser Entwicklungen hat das OGC für eine offizielle Normung durch die ISO als Normungsprojekte im ISO/TC211 eingebracht. Zwei wichtige Beispiele sind die Normungsprojekte ISO 19123 „Schema for coverage geometry and functions“ und ISO 19136 „Geography Markup Language“. Die vom OGC kommenden Projekte besitzen allerdings das Manko, dass die Entwicklung der Implementation Specifications gegebenenfalls weitergeht, bevor der Normungsprozess der ISO abgeschlossen ist. Dann klaffen die von den Firmen genutzten Versionen der Implementation Specifications und die ISO-Normen auseinander.

Eine interessante Lösung zur Beschreibung von Sensorparametern ist die Sensor Model Language (SensorML) (BOTTS, 2002). Sie wurde im Auftrag der NASA (JPL) entwickelt und vom OGC als Diskussionspapier übernommen. Möglicherweise wird die SensorML zur Implementierung der abstrakteren ISO 19130 ausgewählt und komplettiert. Allerdings sind weitere Abstimmungen erforderlich. Die SensorML enthält eine andere Gruppe von Sensoren als die ISO 19130. Passive Scanner sowie aktive Profiler sind gut ausgearbeitet und in Anwendungen getestet. Das „Optische Kameramodell“ ist dagegen erst in Ansätzen verfügbar, schließt jedoch Rahmen-, Video- und Spiegelreflexkameras ein. Das Rapid Positioning Model schließt an das Topic 7 der OGC Abstract Specification an.

6. Weitere Normungsgruppen

Neben ISO, IEC und OGC arbeiten viele andere Fachgruppen an internationalen Normen. Für Photogrammetrie und Fernerkundung sind die ISPRS, CEOS und EuroSDR (ex OEEPE) die wichtigsten Organisationen.

6.1 ISPRS

Die ISPRS Commission I „Sensors, platform, and imagery“ unterstützt unter anderem mit ihrer WG 1 die Standardisierung von Sensorenparametern. Die ISPRS WG II/4 „Image data standards“ hat vor allem den Zweck, die ISPRS über die Arbeiten des ISO/TC211 laufend zu informieren und nach Bedarf Fachleute über die ISPRS zur ISO-Arbeit hinzuzuziehen.

6.2 CEOS

CEOS als internationales Forum zur Koordinierung der Aktivitäten der zivilen Erdbeobachtungsprogramme hat zwei ständige Arbeitsgruppen, die sich mit Normungsfragen beschäftigen. Die WGISS „Working Group on Information Systems and Services“ beschäftigt sich mit der Datenübertragung zwischen Sensor, Bodenstationen und Nutzern. Die WGCV „Working Group on Calibration and Validation“ beschäftigt sich mit Sensorfragen.

Im November 2002 wurde eine Joint Task Force zwischen der ISPRS und CEOS zur Bündelung der Aktivitäten bei radiometrischer und geometrischer Kalibrierung gebildet. Die Leitung haben Mitarbeiter des Stennis Space Center in Mississippi, USA, übernommen. Im Herbst 2003 ist ein erstes Treffen zwischen dieser Joint Task Force und Vertretern des ISO/TC211 vorgesehen.

6.3 EuroSDR

Innerhalb des EuroSDR ist eine Arbeitsgruppe mit dem Titel „Interoperability for Digital Photogrammetric Workstations“ in Vorbereitung. Das Ziel der Arbeiten sind Austauschstandards für Bild-, Orientierungs- und Kalibrierdaten (CASELLA, 2003). Es muss versucht werden, die neuen Arbeiten soweit wie möglich mit den bisherigen Aktivitäten zu verbinden.

7. Schluss

Die Vielfalt an kompetenten Gruppen zeigt das Dilemma der internationalen Normung. Die Gruppen entstehen fachlich orientiert – OGC, ISPRS, CEOS, EuroSDR. Die Normung wird dann zu einem Arbeitsthema einer ihrer Untergruppen. Nicht immer gelingt es der ISO sofort, die zentralen Themen an sich zu ziehen.

Gerade das aktive Betreiben der Normungsarbeit ist auch formal nicht die Aufgabe der ISO. Sie bietet vielmehr nur ein gemeinsames Dach, unter dem sich die nationalen Normungsorganisationen zusammenfinden können. Ein voll funktionsfähiges Technical Committee wie das ISO/TC211 kann natürlich Schwerpunkte bilden. Allerdings gilt auch hier: Wenn seitens der nationalen Mitglieder (national bodies, z.B. DIN) keine Initiative ergriffen wird, bleibt die Normungsarbeit liegen. Wenn andererseits eine Nation einen Normungsvorschlag (New Work Item Proposal) einbringt und fünf andere Nationen eine Mitarbeit im Projektteam zusagen, beginnt die Entwicklung an einer neuen ISO-Norm, unabhängig davon, ob sie in ein Gesamtkonzept passt oder nicht.

Das gestiegene Verständnis für die Bedeutung von Normen hat zu einer großen Zahl von Aktivitäten geführt, teilweise in Unkenntnis der Arbeiten an anderen Orten.

Derzeit gilt es, die erfolgreicherer Entwicklungen konsequent zu Ergebnissen zu führen und Parallelentwicklungen sachgerecht zu verschmelzen.

8. Literaturverzeichnis

- BOTTS, M. (EDITOR), 2002: Sensor Model Language (SensorML) for In-situ and Remote Sensors. OpenGIS Project Document OGC 02-026r4, Version 0.7
- CASELLA, V., 2003: EuroSDR-Project, persönliche Mitteilung
- CEN/TC287 „Geographic Information“
- FGDC, 2002: Content Standard for Digital Geospatial Metadata: Extensions for Remote Sensing Metadata, FGDC-STD-012-2002, <http://www.fgdc.gov>
- IEC, International Electrotechnical Commission
- ISO/IEC 14772:1997 “Virtual Reality Modeling Language”
- ISO 19101-2 “Imagery reference model”
- ISO 19107:2003 “Spatial schema”
- ISO 19111:2003 “Spatial referencing by coordinates”
- ISO 19115:2003 “Metadata”
- ISO 19115-2 “Metadata - Part 2: Extensions for imagery and gridded data”
- ISO 19117 “Portrayal”
- ISO/TR 19121:2000 “Imagery and gridded data”, TR = Technical Report
- ISO 19123 “Schema for coverage geometry and functions“
- ISO/RS 19124:2001 “Imagery and gridded data components”, RS = Review Summary
- ISO 19129 “Imagery, gridded and coverage data framework”
- ISO 19130 “Sensor and data models for imagery and gridded data”
- ISO 19132 “Location based services possible standards”
- ISO 19133 “Location based services tracking and navigation”
- ISO 19134 “Multimodal location based services for routing and navigation”
- ISO 19136 “Geography Markup Language“.
- ISO 19139 “Metadata - Implementation specification”
- ISO/IEC 19775 “Extensible 3D (X3D)”
- ISO/TC211, Technical Committee 211 “Geographic information / Geomatics”
- ISPRS/WG II/4, 2003: “Image Data Standards”, <http://www.commission2.isprs.org/wg4>
- JTC1, ISO/IEC Joint Technical Committee 1
- KRESSE, W., 2002: Übersicht über internationale Normen und Standards für Photogrammetrie und Fernerkundung. – DGPF Jahrestagung 2002, Neubrandenburg
- KRESSE, W., FADAIE, K., 2003: ISO Standards for Geographic Information, Springer-Verlag, Heidelberg
- OGC, 1999: Topic 7: The Earth Imagery Case, Version 4. The OpenGIS Abstract Specification, OGC-Dokument 99-107
- OGC, 2003: OpenGIS Consortium Inc. Homepage. – <http://www.opengis.org>
- W3C, 2003: World Wide Web Consortium, W3C-Homepage. – <http://www.w3c.org>

Alternative Sensor Orientation Models For High Resolution Satellite Imagery

GEORGE VOZIKIS¹, CLIVE FRASER², JOSEF JANSA³

Zusammenfassung: Diese Arbeit befasst sich mit diversen Sensormodellen die man zur Auswertung von hochauflösenden Satellitenbildern nutzen kann. Da es sich bei hochauflösenden Satellitenbildern nicht um zentralperspektivische Aufnahmen handelt, versagt die herkömmliche Kollinearitätsgleichung. Weiters ist der Öffnungswinkel bei diesen Sensoren extrem klein, was die Sensorgeometrie sehr instabil macht und meistens stehen auch keine Kalibrierungsdaten der Aufnahmen zur Verfügung.

Anhand von IKONOS und SPOT5 Bildern, sowie simulierten Datensätzen werden das affine, das parallel-perspektive, das zentralperspektive Modell, sowie die DLT getestet und evaluiert. Zusätzlich werden zur Verfügung gestellte RPCs (Rational Polynomial Coefficients) auf Qualität überprüft und eine Strategie erläutert, durch welche man in der Lage ist, selbst sehr genaue RPCs zu berechnen.

1 Introduction

Since the successful launches of high-resolution satellites such as IKONOS (September 1999), EROS-1A (December 2000), Quickbird (October 2001) and SPOT5 (May 2002), a new era in data analysis for photogrammetric and remote sensing purposes has begun. Because of the new geometrical properties of these sensors, the common methods (central perspective geometry) used in airborne photogrammetry cannot be directly applied onto high-resolution satellite imagery - at least not without certain modifications.

One of the two major shortcomings of this imagery is the narrow field of view (FoV). The commonly used, well-known collinearity model based on central perspective delivers wrong, inaccurate or not well-defined results due to the badly defined intersection of the rays as the FoV approaches 0° (YAMAKAWA, 2001). The FoV of IKONOS, for instance, is 0.92° .

The second shortcoming is the lack of information regarding calibration data. Some of the providers of high-resolution imagery do not release any information about the interior orientation (calibrated focal length, principal point coordinates, coefficients for modelling the lens-distortion) of the sensor. Furthermore, quite often also no precise information is available about the actual position and orientation of the satellite, when acquiring the image.

Here, alternative sensor models are to be discussed and evaluated. It should also be mentioned that for evaluating these models both, simulated data, and true measurements (3d-GPS and 2d-image points) were used. This way, measurement errors or inaccuracies are also being taken into account when evaluating the diverse models thus reflecting a practical point of view, as by measuring with GPS or digitising in images the results are certainly not errorless.

¹ Dipl.-Ing. George Vozikis, Institute of Photogrammetry and Remote Sensing, Vienna University of Technology, Gusshausstrasse 27-29/E122, A-1040 Vienna (Austria), e-mail: e9826142@stud3.tuwien.ac.at

² Prof. Dr. Clive Fraser, Department of Geomatics, The University of Melbourne, Victoria 3010 (Australia), e-mail: c.fraser@unimelb.edu.au

³ Prof. Dr. Josef Jansa, Institute of Photogrammetry and Remote Sensing, Vienna University of Technology, Gusshausstrasse 27-29/E122, A-1040 Vienna (Austria), e-mail: jj@ipf.tuwien.ac.at

In addition, it is examined how these diverse sensor models behave, when different coordinate systems and projections are being applied. The calculations were carried out in UTM, WGS84 geographic and WGS84 geocentric coordinate systems.

Another aspect is the evaluation of the Rational Function Model (RFM), which is the basis of the Rational Polynomial Coefficients (RPCs) usually provided (for additional money) by the image vendors. By investigating the geometric behaviour by employing artificially generated data one is, hopefully, able to estimate the RFM's potential of modelling the actual geometric properties.

Most computations were carried out using the program BARISTA, a rather new software package (outset October 2001) developed at the Department of Geomatics at the University of Melbourne.

2 Data Sets

2.1 Real Data

The test data are briefly described here (Tab.1). Both of the satellites used, i.e. IKONOS and SPOT5, are pushbroom-scanners. The images of the IKONOS satellite are PrecisionPlus-products and hence have a geometric resolution of 1 metre in the panchromatic channel. The revisit interval at the equator for this satellite is 3 days and the imaging swath is about 11.3 kilometres (IKONOS, 2002). The SPOT5 images were acquired by the HRG (High-Resolution Geometric) instruments in panchromatic supermode and hence have a ground sample distance of 2.5 metres. The revisit interval of SPOT5 lies between 1 and 4 days. The imaging swath is rather huge with 60 or even 120 kilometres in case the two HRG instruments working simultaneously (PRESSKIT, 2002).

Tab.1: Available Data Sets for Testing

Satellite	Location	No of GCPs	RPCs	Image extents
IKONOS	Melbourne (Australia)	52	YES	7396m x 7942m
IKONOS	San Diego (USA)	23	YES	5480m x 1110m
IKONOS	Athens (Greece)	27	NO	11926m x 19747m
SPOT5	Attika (Greece)	30	NO	72551m x 72344m

The ground reference points were measured in object space by DGPS (Differential Global Positioning System); some of them were used as control points for calculating the model parameters and others as independent checkpoints for the evaluation (the acronym GCP may therefore be interpreted as ground control point or ground check point). The image coordinates were acquired by simple point digitisation, by ellipse-fitting techniques, or by line-intersection whatever was more appropriate. (FRASER ET AL. 2002). As a-priori accuracy a sigma of 5 centimetres in object space and half a pixel in image space have been assumed.

2.2 Simulated Data

In order to be able to thoroughly investigate the models' behaviour and effects on the resulting quality for a great diversity of along-track and across-track viewing angles, a simulation program has been employed for creating two perfect data sets. The software

delivered the image co-ordinates (2D) from object co-ordinates (3D) by taking into consideration the viewing angles, the orbital position and the approximate physical characteristics of the respective satellite. Fig.1 shows the procedure flow that consists of the following steps: (a) the geocentric object space coordinates are transformed into orbital plane coordinates; (b) the latter are further transformed into satellite coordinates with the centre of mass as origin, (c) finally, the image space coordinates are obtained usually by applying an additional shift and rotation operation (WESTIN, 1990).

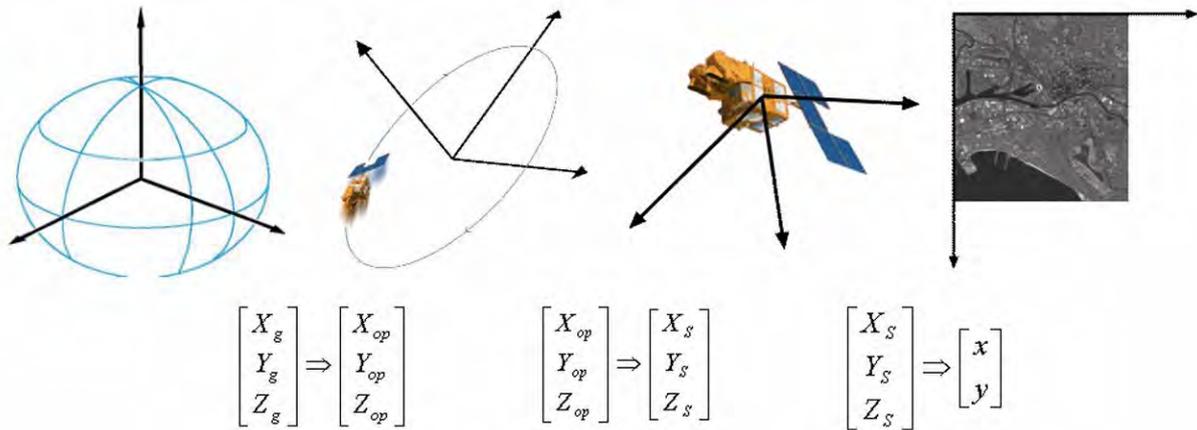


Fig.1: Transformation procedure of the simulation in 3 steps.

Both simulated data sets were located on the northern hemisphere within UTM zone 34. The simulated SPOT5-HRG set covers an area of 45 km x 72 km, while the simulated IKONOS data set has an extent of 11 km x 11 km.

3 The Sensor Models

A sensor model describes the relationship between object and image space thus allowing accurate image exploitation. Due to missing precise information about the sensor (calibration data etc.) in case of high-resolution spaceborne data, a mathematical description for expressing the relation between object and image space has to be found. This investigation is intended to provide valuable information about the mathematical model that optimally describes the true physical sensor geometry.

The tested models are (Fig. 2a to c):

- DLT Model
- Parallel Perspective Model
- Affine Model

All of them are non-parametric models, where the unknowns of the mathematical model do not directly describe the unknowns of the actual physical model. A parametric approach may be found in TOUTIN ET AL. (2003) although due to lack on information, this model could not be included in the tests.

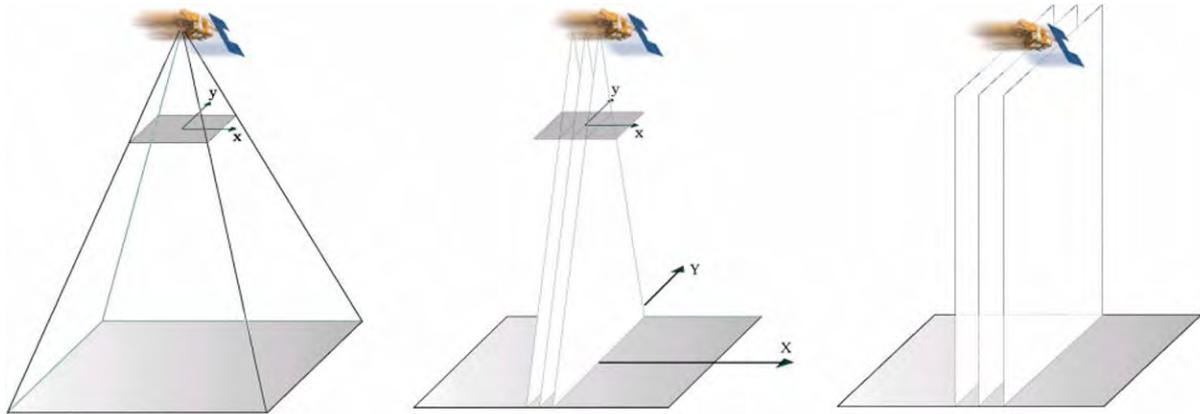


Fig.2: a) DLT (central perspective); b) Parallel Perspective Model; c) Affine Model

3.1 The Direct Linear Transformation (DLT)

This model describes a central perspective geometry plus an affine distortion (Fig.2a). It has found great use also in close-range photogrammetry applications. The image coordinates (x, y) can be obtained from the object coordinates (X, Y, Z) through the following equation.

$$x = \frac{L_1X + L_2Y + L_3Z + L_4}{L_9X + L_{10}Y + L_{11}Z + 1} \quad y = \frac{L_5X + L_6Y + L_7Z + L_8}{L_9X + L_{10}Y + L_{11}Z + 1}$$

3.2 The Parallel Perspective Model (PP)

Since the acquisition instruments are line scanning systems, a simplification of the DLT which limits the above equation to one line seems to be justified. Between the lines the image is modeled by a sequence of parallel projections (Fig.2b). OKAMOTO ET AL. (1999) show how these equations can be derived from the collinearity model.

$$x = B_1X + B_2Y + B_3Z + B_4 \quad y = \frac{B_5X + B_6Y + B_7Z + B_8}{B_9X + B_{10}Y + B_{11}Z + 1}$$

3.3 The Affine Model (AM)

Unfortunately the images the vendors provide are resampled, sometimes even rectified, so that one scan line of the satellite does not correspond to one line in the image. Due to this fact and due to the narrow FoV a further simplification seems to be reasonable when assuming a parallel projection even within one scan line. (Fig.2c). If we think that the satellites travel at an elevation of 600 km and that the FoV is only about one degree, it is logical to assume near parallelism for the imaging rays in object space.

$$x = A_1X + A_2Y + A_3Z + A_4 \quad y = A_5X + A_6Y + A_7Z + A_8$$

3.4 The Rational Function Model (RFM)

This model has gained considerable interest recently in photogrammetry and remote sensing, mainly due to the fact that some satellite data vendors have adopted the RFM as a replacement sensor model for image exploitation (TAO, 2002). It is a one-way model, which allows the user to do photogrammetric processing without need for revealing the parameters of the physical sensor model by the provider. The parameters of the interior (and exterior) orientation are kept confidential, because they cannot be derived from the RFM parameters, the Rational Polynomial Coefficients (RPCs).

The RFM relates geographical object space coordinates (normalized latitude U , normalized longitude V , normalized height W) to measured image space coordinates l , s (line, sample) (DIAL ET AL., 2002).

It is given by eighty coefficients and ten scale and off-set terms. The mathematical description is given below.

$$l_n = \frac{Num_L(U, V, W)}{Den_L(U, V, W)} \quad s_n = \frac{Num_S(U, V, W)}{Den_S(U, V, W)}$$

with:

$$Num_L(U, V, W) = a_1 + a_2V + a_3U + a_4W + a_5VU + a_6VW + a_7UW + a_8V^2 + a_9U^2 + a_{10}W^2 + a_{11}UVW + a_{12}V^3 + a_{13}VU^2 + a_{14}VW^2 + a_{15}V^2U + a_{16}U^3 + a_{17}UW^2 + a_{18}V^2W + a_{19}U^2V + a_{20}W^3$$

$$Den_L(U, V, W) = b_1 + b_2V + b_3U + b_4W + b_5VU + b_6VW + b_7UW + b_8V^2 + b_9U^2 + b_{10}W^2 + b_{11}UVW + b_{12}V^3 + b_{13}VU^2 + b_{14}VW^2 + b_{15}V^2U + b_{16}U^3 + b_{17}UW^2 + b_{18}V^2W + b_{19}U^2V + b_{20}W^3$$

$$Num_S(U, V, W) = c_1 + c_2V + c_3U + c_4W + c_5VU + c_6VW + c_7UW + c_8V^2 + c_9U^2 + c_{10}W^2 + c_{11}UVW + c_{12}V^3 + c_{13}VU^2 + c_{14}VW^2 + c_{15}V^2U + c_{16}U^3 + c_{17}UW^2 + c_{18}V^2W + c_{19}U^2V + c_{20}W^3$$

$$Den_S(U, V, W) = d_1 + d_2V + d_3U + d_4W + d_5VU + d_6VW + d_7UW + d_8V^2 + d_9U^2 + d_{10}W^2 + d_{11}UVW + d_{12}V^3 + d_{13}VU^2 + d_{14}VW^2 + d_{15}V^2U + d_{16}U^3 + d_{17}UW^2 + d_{18}V^2W + d_{19}U^2V + d_{20}W^3$$

In DIAL ET AL. (2002) one can find an analytical explanation of how these 80 parameters are being calculated by the high-resolution satellite imagery vendor.

Unfortunately these RPCs (as they are provided) are afflicted with non-negligible errors, although the resulting constant bias may be compensated with help of some GCPs. The mathematical procedure is thoroughly described in HANLEY ET AL. (2001). Our tests show that one (preferably two) carefully measured GCPs provide enough information to be able to compensate the bias of the RPCs.

3.5 Self-Calculation of RPCs

The RFM with vendor-supplied RPCs is an effective alternative to collinearity-based sensor orientation and is supported by most of the available photogrammetric workstations. Unfortunately, the RPCs are not necessarily provided together with the images or are of bad quality as mentioned above. Therefore, an approach of determining the RPCs by the user is

described below, so that the users may input this RPCs in their workstations and start compilations.

Measuring 40 GCPs or even more in order to calculate the over 80 coefficients of the RFM would be too time-consuming and too expensive. A solution can be found by applying a simple model, for example, the above mentioned Affine Model:

- Measuring of 4 or more well distributed GCPs.
- Deriving the parameters of the Affine Model by a single image resection in any coordinate system.
- Creating a 3D grid of thousands of points in the object-space coordinate system over the area of interest.
- Using the previously calculated affine parameters for computing the corresponding 2D point-grid in image space.
- Transforming the object space grid-points into the geographic coordinate system, if necessary.
- Calculating the RPCs with a least squares adjustment using the geographic grid-points.

It must be emphasized that this approach is valid only if the simple model (e.g. the Affine Model) is able to deliver accurate results.

4 Test Results

This section discusses the outcomes of the tests made on the various data sets. The evaluation was done by using independent checkpoints (GCPs) to see whether the calculated model parameters are acceptable or not (Tab.2). The values in the last column are root mean square errors measured in image space.

Tab.2: Test Results

	Testfield	Coordinate System	RMS (pixel)
DLT	Melbourne - IKONOS	Geocentric	0.737
Affine	Melbourne - IKONOS	UTM	0.351
Parallel Perspective	Melbourne - IKONOS	Geocentric	0.308
Bias Compensated RPCs	Melbourne - IKONOS	Geographic	0.519
Estimated RPCs	Melbourne - IKONOS	Geographic	0.351
<hr/>			
Affine	San Diego - IKONOS	UTM	0.473
Bias Compensated RPCs	San Diego - IKONOS	Geographic	0.658
Estimated RPCs	San Diego - IKONOS	Geographic	0.474
<hr/>			
DLT	Athens - IKONOS	Geocentric	1.089
Affine	Athens - IKONOS	UTM	0.723
Parallel Perspective	Athens - IKONOS	UTM	1.952
<hr/>			
DLT	Attika - Spot5	Geocentric	0.912
Affine	Attika - Spot5	Geocentric	0.902
Parallel Perspective	Attika - Spot5	UTM	2.367

The optimal coordinate system seems to be the UTM system, mainly because of its local character. Many times in the geocentric coordinate system nearly as good results as in the

UTM system were obtained. Working in the geographic coordinate system frequently led to numerical instabilities. Although the investigations were carried out using various combinations of GCPs, the following table lists only the results obtained by using 8 well-distributed control points. The best model for describing the SPOT5 and IKONOS sensor geometry seems to be the Affine Model. This Model delivers in both the geocentric and UTM coordinate system very good results.

The DLT seems to deliver only acceptable results in the geocentric coordinate system needing a reasonable high redundancy.

Unfortunately the available images are not raw data. This is also the main reason why the Parallel Perspective Model does not always deliver good results although it would theoretically be the ideal approach for modelling push-broom scanner geometry. But still, the results come very close to the ones from the Affine Model. In case there are more than 8 GCPs available, the outcomes of the Parallel Perspective Model become even better than the ones from the Affine Model, although the data is pre-processed.

For these data sets a maximum of 8 parameters seems to be enough to model the relation between image and object space. One can conclude that all the models, except the Affine Model, are over parameterised, meaning that there exists a correlation between the parameters.

Not surprisingly, the best results for the simulated data sets were obtained with the Parallel Perspective model, as they were created according to the line scanning technique. The accuracies are about one pixel. Also understandable is the influence by the direction of the a viewing angle. For viewing angles in along-track direction almost no effect can be observed (e.g. the parallel projection of line scanning principle is still valid) while the results from images acquired with an oblique viewing angle in across-track direction show bigger residuals due to an oblique central perspectivity.

5 Conclusion

This paper gives an overview of the quality of diverse sensor models of high-resolution satellite sensors. The test results show that the Affine Model prevails as the most trustful model to exploit high-resolution images. The accuracies lie below one pixel, which is less than one metre for the IKONOS imagery. Unfortunately this model is not supported by the photogrammetric workstations on the market. Since most of them are prepared for the RFM a way of self-calculation has been described. Self-calculation of RPCs with the help of the Affine Model turned out to be the most promising.

They are at least as good as the RPCs from the image vendor after bias compensation (Fig.3). One could even save money in cases where the RPCs have to be purchased in addition to the images. Just measure 4 (preferably 5 or 6) GCPs and calculate the coefficients using the strategy via the Affine Model and start working.

In summary, if economic factors are not considered, high-resolution satellite imagery can readily be used for accurate geopositioning, and even as substitute for small-scale aerial photography. But in such a case one should bear in mind that the software packages used for the image analysis must support models like the Affine or the Rational Function Model, besides the universally employed collinearity model based on central perspective geometry.

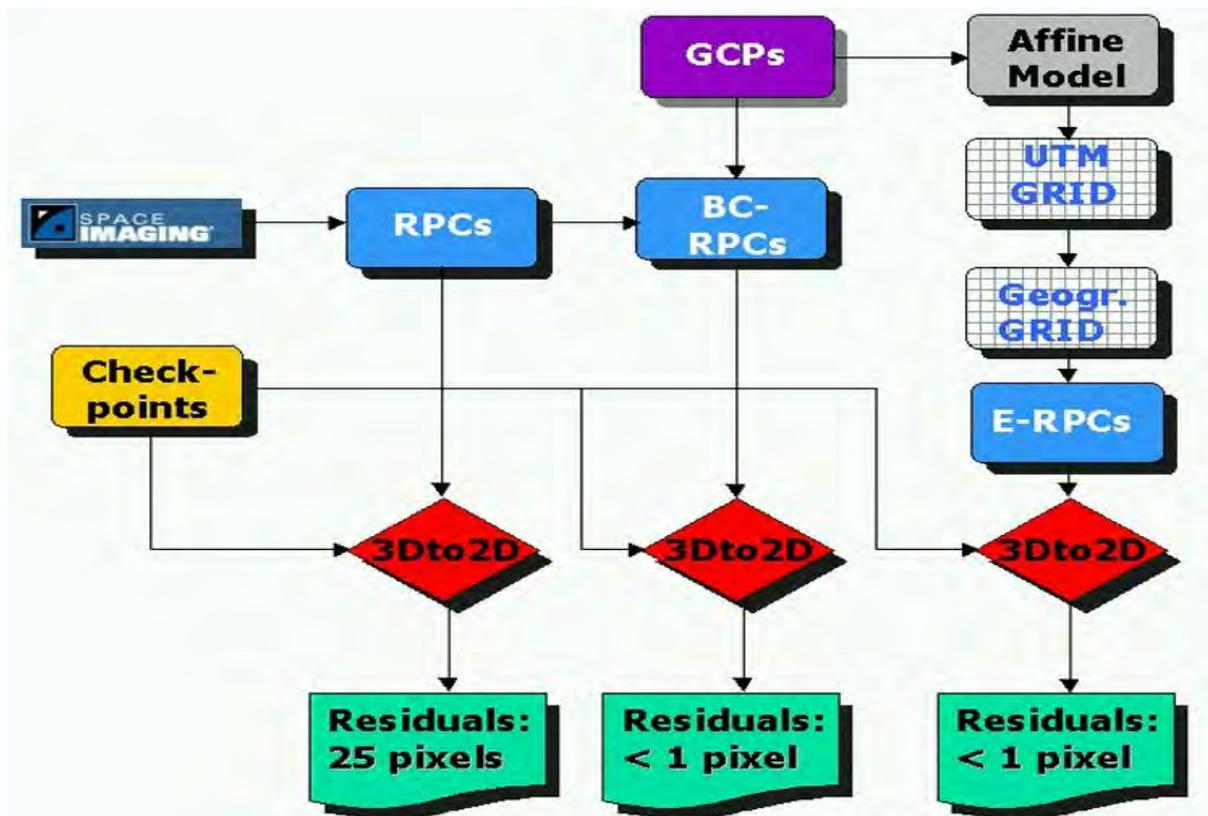


Fig.3: Comparison between vendor RPCs, Bias compensated RPCs and Estimated RPCs

6 References

- DIAL, G. AND GRODECKI, J. (2002): Block Adjustment With Rational Polynomial Camera Models, Proceedings of ACSM-ASPRS Annual Conference, Washington DC, (on cd-rom)
- FRASER, C. ET AL. (2002): Three-Dimensional Geopositioning Accuracy Of IKONOS Imagery, Photogrammetric Record, 17(99), 465-479
- HANLEY, H. ET AL. (2001): Sensor Orientation For High-Resolution Satellite Imagery, ISPRS Archives Commission I, WG I/5, Denver
- IKONOS IMAGERY PRODUCTS AND PRODUCT GUIDE (2002), Space Imaging, http://www.spaceimaging.com/whitepapers_pdfs/IKONOS_Product_Guide.pdf, (last accessed on June 10th 2003)
- OKAMOTO, A. ET AL. (1999): Geometric Characteristics Of Alternative Triangulation Models For Satellite Imagery, Proceedings of ASPRS-RTI, Annual Conference, 64-72
- PRESS KIT (2002): Technical Features Of The SPOT5 System, 6-10 www.cnes.fr/actualites/spot5/va/pdf/technique_va.pdf, (accessed January 27th, 2003)
- TAO, V. AND HU Y. (2002): 3D Reconstruction Methods Based On The Rational Function Model, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 68, No. 7, 705-714
- TOUTIN, T. ET AL. (2003): Error Tracking In IKONOS Processing Using A 3D Parametric Model, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol 69, No. 1, 43-51
- WESTIN, T. (1990): Precision Rectification Of SPOT Imagery, Photogrammetric Engineering And Remote Sensing, Vol. 56, No. 2, 247-253
- YAMAKAWA, T. (2001): Geometric Analysis Of Affine Models, Department Of Geomatics, University Melbourne, Australia, 1-12

Bildsegmentierer – Ansätze, vergleichende Untersuchungsmethodik und erste Ergebnisse

GOTTHARD MEINEL & MARCO NEUBERT¹

Zusammenfassung: Die Methoden der Bildsegmentierung gewinnen in der Fernerkundung – insbesondere durch die steigende geometrische Auflösung der Bilddaten – zunehmend an Bedeutung. Vor diesem Hintergrund wird die Segmentierungsqualität derzeit verfügbarer Segmentierungssoftwares gegenübergestellt. Dabei erfolgt zunächst eine allgemeine Darstellung der benutzten Programme. Anschließend wird die Qualität der auf Basis panchromatisch geschärfter IKONOS-Multispektraldaten erzielten Segmentierungsergebnisse verglichen. Eine überblicksartige visuelle Untersuchung wird um einen detaillierten Vergleich mit unterschiedlichen, visuell kartierten Referenzflächen ergänzt. Große Beachtung finden die für die Segmentierungsqualität ausschlaggebenden geometrischen Eigenschaften der Segmente. Die unterschiedlichen Ergebnisse werden bewertet und diskutiert. Sie dokumentieren die Eignung der Programme zur Segmentierung sehr hochauflösender Fernerkundungsdaten.

1 Einleitung

Unter Segmentierung versteht man in der digitalen Bildverarbeitung die Gruppierung benachbarter Bildelemente (Pixel) zu Pixelgruppen (Regionen, Segmenten) aufgrund von Ähnlichkeitskriterien (Spektralsignatur, Textur). Da sich das fernerkundlich erfasste Objektinventar häufig homogen innerhalb der Objekte darstellt, kann durch eine Segmentierung eine Objektbegrenzung erfolgen. So wird neben der Reduktion der zu klassifizierenden Elementanzahl die Grundlage für eine anschließende Bildklassifikation (Zuordnung der Segmente zu Objektklassen) gelegt. Die Qualität der Segmentierung ist somit ausschlaggebend für die Klassifikationsgüte. Aus diesem Grund steht die Segmentierungsqualität, die mit derzeit verfügbarer Segmentierungssoftware erzielt werden kann, im Mittelpunkt der Betrachtungen.

Die Bildsegmentierung hat sich im Bereich der Fernerkundung erst spät durchgesetzt, obwohl bereits frühzeitig Forschungsarbeiten zu dieser Thematik existierten (vgl. z. B. KETTIG & LANDGREBE, 1976). Insbesondere mit der Verfügbarkeit sehr hochauflösender Fernerkundungsdaten und deren Eigenschaften (z. B. abgebildeter Detailreichtum, spektrale Varianz) haben sich Segmentierungsverfahren im fernerkundlichen Bereich etabliert. Durch die Verwendung derartiger Methoden lässt sich ein Teil der Probleme der pixel-basierten Bildauswertung überwinden (vgl. z. B. MEINEL, NEUBERT & REDER, 2001).

In einem ersten Artikel zu dieser Thematik (NEUBERT & MEINEL, 2003) wurden die Segmentierungsprogramme überblicksartig dargestellt und erste Ergebnisse präsentiert. In Weiterentwicklung dazu erläutert dieser Beitrag die vertiefte Untersuchungsmethodik und stellt weitere detaillierte Ergebnisse dar. Insbesondere die Gegenüberstellung der unterschiedlichen Segmentierungsergebnisse mit Referenzflächen steht hier im Vordergrund.

2 Untersuchte Softwareprogramme

Tabelle 1 gibt einen Überblick über die untersuchten Programme. Die Auswahl erfolgte insbesondere aufgrund deren Eignung zur Segmentierung von Fernerkundungsdaten. Zudem war die Bereitschaft der Entwickler zur Zusammenarbeit Voraussetzung für den Vergleich.

¹ Dr.-Ing. Gotthard Meinel, Dipl.-Geogr. Marco Neubert, Institut für ökologische Raumentwicklung e.V., Weberplatz 1, 01217 Dresden, e-mail: g.meinel@ioer.de / m.neubert@ioer.de

Tab. 1: Übersicht der getesteten Segmentierungssoftwares.

Segmentierungsprogramm	eCognition 2.1 bzw. 3.0	Data Dissection Tools	CAESAR 3.1	InfoPACK 1.0	Image Segmentation (für Erdas)	Minimum Entropy Approach	
Grundlagen	Entwickler	Definiens Imaging GmbH	INCITE, Stirling University	N.A.Soft-ware Ltd.	InfoSAR Ltd.	Remote Sensing Applications Center	Universität Bonn, Institut für Informatik
	Algorithmus	Region growing	Superparamagnetic clustering	Simulated annealing	Simulated annealing	Region growing	Triangulation
	Anwendungsbereich	Fernerkundung	Bildanalyse, statistische Physik	Fernerkundung, insb. Radar	Fernerkundung, insb. Radar	Fernerkundung	Polygonalisierung veräuschter Bilddaten
	Grundlegende Referenz	BAATZ & SCHÄPE 2000	FERBER & WÖRGÖTTER 2000	COOK et al. 1996	COOK et al. 1996	RUEFEN-ACHT et al. 2002	HERMES & BUHMANN 2001
Implementierung	Stand der Software	04/2002 / 11/2002	10/2002	09/1998	03/2003	02/2002	08/2002
	Betriebssystem	Win	Win, Linux, Unix, SGI	Linux, Solaris	Linux, Win	Win	Linux
	Systemschale	Stand-alone	K. A. (evtl. MatLab)	Stand-alone	Stand-alone	Erdas	Stand-alone
	Parameterzahl	3	3	6	2	2	2
	Ca. Laufzeit ^{1,2}	10 min	10 min	K. A. (hoch)	10 min	1,5 h	mehrere Stunden
	Reproduzierbarkeit ³	Nein/ Ja (ab 3.0)	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein
Ein- und Ausgabe	Unterstützung einer Klassifikation	Ja (Fuzzy Logic, Near-Neighbour)	Nein	Ja	Ja (Maximum Likelihood)	Nein	Nein
	Max. Bildgröße [Ca. Pixel] ¹	10.000 x 10.000	4.000 x 4.000	2.000 x 2.000	Keine Beschränkung	2.000 x 2.000	2.000 x 1.500
	Max. Farbtiefe	32 Bit	16 Bit	16 Bit	64 Bit	8 Bit	8 Bit
	Eingabeformate	Raster, Shape	Raster (TIFF)	IMG	NetCDF ⁴	IMG	Raster
	Vektorausgabe / Format	Shape	Nein (extern)	Nein (extern)	Nein (extern)	ArcCoverage	Nein (extern) ⁵
	Zusatzdaten nutzbar	Ja	Nein	Ja	Ja	Nein	Nein
Vertrieb	Verfügbarkeit	Kommerziell	Kommerziell	Nicht mehr verfügbar	Kommerziell	Freeware	Auf Anfrage
	Ca. Preis ⁶ (Kommerziell/ Forschung)	14000 €/ 9000 € (non-profit) /2900 €	K.A./Kostenlos (non-profit)	-	8300 €/ 5800 €	kostenlos	-

¹ Angabe stark abhängig von Systemressourcen, insb. Arbeitsspeicher; ² bei Nutzung der hier verwendeten Bilddaten (2000 x 2000 Pixel); ³ bei verändertem Bildausschnitt; ⁴ Konvertierbar aus diversen Rasterformaten, z. B. GeoTIFF, IMG; ⁵ Proprietäres Vektorformat; ⁶ Stand 04/2003

3 Methodik

Anhand zweier Testgebiete – jeweils abgebildet durch panchromatisch geschärfte IKONOS-Multispektraldaten (1 m Bodenauflösung, jeweils ca. 2000 x 2000 Pixel, urban bzw. rural geprägt) – wurden mit allen Programmen Segmentierungen erstellt. Ziel war die Extraktion relevanter Objektgrenzen der Flächenbedeckung bzw. -nutzung. Die Segmentierungen erfolgte mit Ausnahme von eCognition und der Erdas-Erweiterung ‚Image Segmentation‘ seitens der Entwickler, wodurch eine optimale Segmentierung durch Experten gesichert war (z. B. Parameterwahl). Segmentierungsergebnisse der Software CAESAR lagen nur für das rurale Testgebiet vor. Mit dem ‚Minimum Entropy Approach‘ wurde für beide Testgebiete aufgrund mangelnder Performance nur ein Viertel der Bildfläche berechnet (jeweils 1000 x 1000 Pixel). Außer für InfoPACK lagen für alle Ansätze Segmentierungen mit unterschiedlichen, die Segmentgröße beeinflussenden Parametern vor. In seltenen Fällen, wenn Objekte schlecht abgrenzt wurden, konnte so auf feinere oder gröbere Segmentierungsniveaus zurückgegriffen werden.

Alle Segmentierungsergebnisse wurden für den anschließenden Geometrievergleich vektorisiert. Da nur eCognition und die Erdas-Erweiterung ‚Image Segmentation‘ in der Lage sind, ein GIS-lesbares Vektorformat zu erzeugen, wurden alle anderen Segmentierungen als Rasterdaten (TIFF) mit eindeutigem Attribut ausgegeben. Den Rasterdaten wurde durch hinzufügen des Worldfiles (TFW) der Testdaten ihre Geocodierung wieder zugewiesen. Anschließend wurden diese GeoTIFF-Dateien einer Raster-Vektor-Konvertierung durch ein externes Programm (Erdas Imagine) unterzogen. Zu negativen Effekten führte dieses Vorgehen lediglich im Falle des ‚Minimum Entropy Approach‘, da sich dieses Verfahren nicht wie andere Segmentierungsprogramme an den Rastergrenzen orientiert. Durch den dort implementierten Triangulationsalgorithmus wird das Bild vielmehr über Rastergrenzen hinweg zerlegt. Diese Effekte beeinflussen die Qualitätsprüfung negativ (höhere Anzahl von Teilsegmenten; Fehlsegmentierungen, da Polygone nicht geschlossen sind etc.), waren jedoch aufgrund einer fehlenden Vektorausgabe unvermeidlich.

Die unterschiedlichen Resultate wurden zunächst einer überblicksartigen, visuellen Bewertung der Gesamtsegmentierungsgüte unterzogen. Dabei standen allgemeine Aspekte, wie die Güte der Trennung unterschiedlicher Flächenbedeckungen (z. B. Wiese/Wald, Feld/Wiese), die Abbildung linearer Objekte und das Auftreten von Fehlsegmentierungen im Mittelpunkt.

Anschließend erfolgte ein detaillierter Vergleich anhand ausgewählter, visuell kartierter Referenzflächen. Bei deren Auswahl wurde insbesondere die visuell relativ sichere Abgrenzbarkeit berücksichtigt. Zunächst wurden die 20 Referenzflächen – die sich in Lage, Form, Größe, Bedeckung/Nutzung, Kontrast, Textur etc. unterscheiden – sowie deren segmentierte Pendant visuell gegenübergestellt und beschrieben. Im nächsten Schritt erfolgte ein quantitativer Vergleich der Ergebnisse. Dabei wurden die Kriterien Anzahl von Teilsegmenten, die Segmentgröße, der Umfang, der Shape-Index (Umfang-Flächen-Verhältnis) sowie der Abweichung dieser Werte im Vergleich zur Referenzfläche bestimmt. Als Teilsegmente wurden alle zu mindestens 50 % im Referenzobjekt liegenden Segmente gezählt. Der Shape-Index stammt aus der Landschaftsökologie und beschreibt die Flächenform ($\text{Shape-Index} = \text{Umfang} / 4 \cdot \sqrt{\text{Flächeninhalt}}$). Zusätzlich wurde die Qualität der Ergebnisse visuell bewertet (0 schlecht, 1 mittel, 2 gut).

Diese Ergebnisse werden im weiteren Untersuchungsverlauf noch um qualitative Kriterien, welche die Grenzlinienübereinstimmung bewerten, ergänzt. Dazu wird das von der Delphi IMM GmbH entwickelte SEQ-Tool verwendet (DELPHI IMM GMBH, 2003). Diese Software

vergleicht Segmentierungen mit Referenzobjekten, wobei der Nutzer in Abhängigkeit des Zielmaßstabes bzw. der geforderten Genauigkeit eine tolerierbare Abweichung in Form eines Buffers wählt. Der mit dem SEQ-Tool berechnete Index bewertet die geometrische Grenzlinienübereinstimmung in einem Wertebereich zwischen 0 (keine Deckungsgleichheit) und 100 (maximale Übereinstimmung). Derzeit liegen nur vorläufige Ergebnisse vor, die hier noch nicht präsentiert werden.

Eine gute Segmentierungsqualität wird erreicht, wenn möglichst alle verschiedenartigen Flächenbedeckungen/-nutzungen korrekt abgegrenzt werden und andererseits homogene Flächen nicht übermäßig in Teilsegmente zerlegt werden (Übersegmentierung). Zudem sollten die ermittelten Formkriterien möglichst gut mit den Maßen der Referenzflächen übereinstimmen.

4 Darstellung und Diskussion der Ergebnisse

4.1 Vergleich der Gesamtsegmentierungen

Die Ergebnisse von eCognition 2.1 (Abb. 1) und 3.0 (Abb. 2) sind – trotz ihrer teils deutlichen Unterschiede bei Verwendung gleicher Parameter – zumeist von guter Qualität. Allerdings enthalten die Ergebnisse bisweilen unsinnige, irregulär abgegrenzte Segmente, insbesondere an saumartigen Übergängen und in Waldgebieten. In kontrastarmen Arealen können Fehlsegmentierungen auftreten. Große, homogene Flächen werden mitunter willkürlich geteilt.

Mit der eCognition-Version 3.0 wurde der Segmentierungsalgorithmus verändert und eine Unabhängigkeit des Segmentierungsergebnisses vom Bildausschnitt erreicht. Der Algorithmus der Version 2.1 kann auch im neuen Programm alternativ verwendet werden. Insgesamt bietet eCognition durch seine multiskalige Segmentierung sowie durch eine fuzzy-logic-basierte Bildklassifikation viele Potenziale. Durch die vielfältigen Schnittstellen zu anderen GIS- und Fernerkundungssystemen werden wichtige Anwenderforderungen erfüllt.



Abb. 1: Segmentierungsergebnis eCognition 2.1. Abb. 2: Segmentierungsergebnis eCognition 3.0.

Die Segmentierungen des ‚Data Dissection Tools‘ (Abb. 3) weisen nur teilweise befriedigende Ergebnisse auf. Die Software neigt zu einer sehr starken Übersegmentierung heller Bildbereiche, wodurch eine Vielzahl von Kleinstsegmenten entsteht. Homogene Flächen (z. B. Acker, Wiesen, Gewässer) werden zumeist korrekt segmentiert. Sehr große Flächen werden zuweilen willkürlich geteilt. In kontrastarmen Bildbereichen kommt es zu deutlichen Abgrenzungsfehlern. Fehler treten auch in Waldgebieten auf. Hier werden z. T. einzelne Pixel abgegrenzt (ähnlich dem Salt-and-Pepper-Effekt). Das nahe Infrarot wird durch die Data Dis-

section Tools aufgrund einer ungünstigen Gewichtung nur geringfügig berücksichtigt, was insbesondere bei der Trennung von Laub- vs. Nadelwald deutlich wird.

Das für die Segmentierung von Radar-Daten entwickelte Programm CEASAR 3.1 erbringt wenig nützliche Resultate (Abb. 4). Es führt zumeist zu kompakten Segmenten ähnlicher Größe. Selbst bei unterschiedlichen Segmentierungsparametern kommt dieser Effekt zum Tragen, wobei lediglich die durchschnittliche Segmentgröße variiert. Dadurch bleiben kleinere Strukturen, insbesondere linienhafte Elemente, häufig unrepräsentiert und es kommt insgesamt zu einer Übersegmentierung. Kontrastarme Flächenübergänge werden schlecht wiedergegeben, teilweise auch Grenzen mit ausreichendem Kontrast (z. B. Wald vs. Wiese).

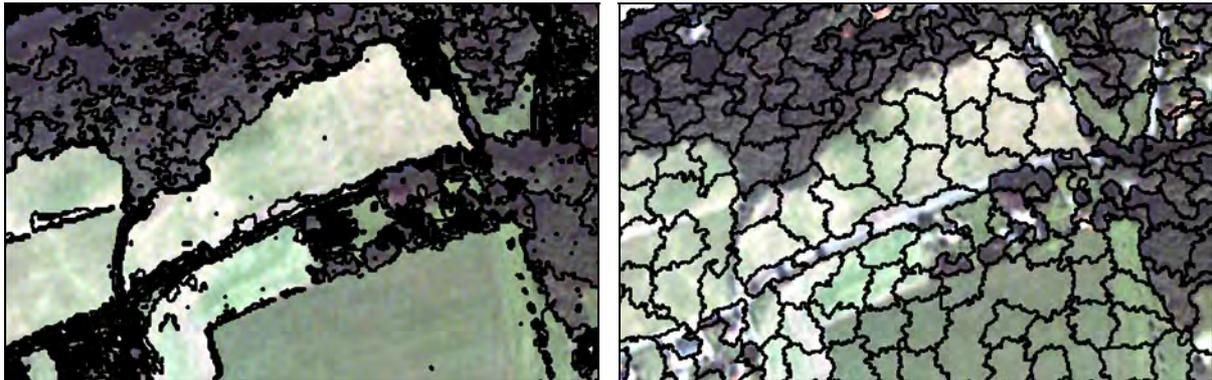


Abb. 3: Segmentierungsergebnis ‚Data Dissection Tools‘. Abb. 4: Segmentierungsergebnis CAESAR 3.1.

Das Ergebnis von InfoPACK (Abb. 5), der Weiterentwicklung von CAESAR, bietet eine gute Abgrenzung der meisten Objekte, neigt dabei jedoch stark zur Übersegmentierung. Homogenere Objekte (Wiesen, Acker) sind davon weniger betroffen und werden zumeist gut abgebildet. Insbesondere Waldflächen und Bebauung werden jedoch stark untergliedert. An Bedeckungs-/Nutzungsübergängen werden häufig störende, schlauchförmige Segmente gebildet. Kontrastarme Grenzen werden häufig korrekt gefunden. Kompakte, nahezu gleichgroße Segmente wie bei CAESAR treten nicht mehr auf.

Hervorzuheben ist der verwendete Tiling-Algorithmus (Bildkachelung), um Bildszenen jeglicher Größe verarbeiten zu können. Allerdings entstehen an den Kachelübergängen zusätzliche Segmentgrenzen. Zudem sind Randeffekte möglich, die zu unterschiedlichen Ergebnissen beiderseits der Kachelgrenze führen können. Der Ansatz erlaubt darüber hinaus eine klassifikationsbasierte Zusammenfassung gleich klassifizierter und benachbarter Segmente (ähnlich wie eCognition), wodurch die Anzahl der Segmente deutlich reduziert werden kann. Zu beachten ist, dass die Software für stark verrauschte SAR-Daten entwickelt wurde und dies zu suboptimalen Ergebnissen bei der Segmentierung optischer Daten führen kann.

Die Anwendung der Erdas-Imagine-Erweiterung ‚Image Segmentation‘ (Abb. 6) führt zu Über- und Untersegmentierung innerhalb eines Segmentierungsergebnisses. Kontrastreiche Grenzen zwischen Hauptnutzungen (z. B. Acker vs. Wald) werden gut wiedergegeben. Flächen mit geringem Kontrastunterschied werden häufig nicht segmentiert. Probleme bereitet insbesondere die Abgrenzung von Acker gegen Wiese. Waldgebiete werden zu großen Konglomeraten zusammengefasst, innerhalb derer häufig sehr kleine Inselfragmente entstehen, die wenig größer als der gewählte Parameter Mindestsegmentgröße sind. Die Abbildung linearer Strukturen ist häufig mangelhaft. Homogene Flächen werden oftmals geteilt.

Das Ergebnis enthält Segmentierungsfehler in Form unbegründbarer horizontaler oder vertikaler Grenzen. Das Ausmaß dieser Fehlsegmentierungen hat sich in einer neuen Version von September 2002 etwas verringert. Sie waren hauptsächlich eine Folge der vom Programm genutzten Blockgröße, die nun entsprechend der verfügbaren Systemressourcen bzw. Bilddaten frei gewählt werden kann. Damit hat sich auch die Berechnungszeit deutlich verbessert. Die Segmentierungsqualität ist jedoch nahezu unverändert gering.

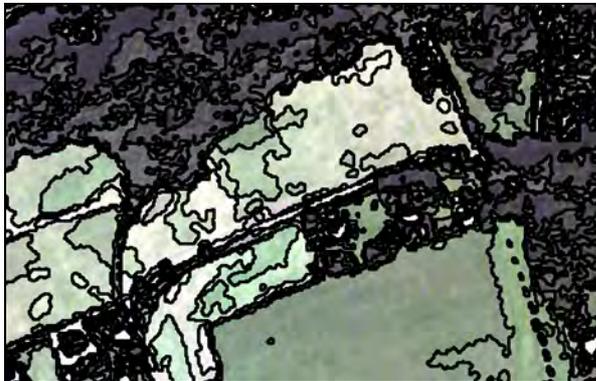


Abb. 5: Segmentierungsergebnis InfoPACK 1.0.

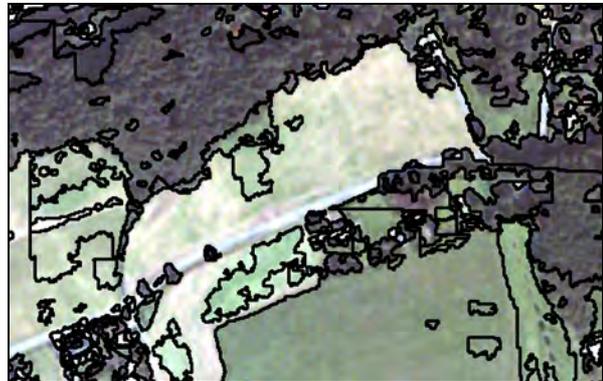


Abb. 6: Segmentierungsergebnis der Erdas-Erweiterung ‚Image Segmentation‘.



Abb. 7: Segmentierungsergebnis ‚Minimum Entropy Approach to Adaptive Image Polygonization‘.

Der ‚Minimum Entropy Approach‘ (Abb. 7) bildet geradlinig verlaufende Grenzen so genannter man-made features (wie Feldgrenzen, Straßen) gut ab. Komplexe natürliche Grenzverläufe (z. B. Waldränder) werden durch das verwendete Triangulationsverfahren häufig ungenau abgeleitet. Große homogene Flächen werden häufig zerteilt. Insgesamt zeigen sich als Folge der Triangulation vielfach geradlinige Segmentgrenzen oder -abschnitte bzw. typische Segmentformen, womit das Verfahren einer visuellen Abgrenzung ähnlicher ist. Gleichzeitig werden o. g. Effekte der Raster-Vektor-Konvertierung deutlich.

4.2 Vergleich der Segmentierungsqualität anhand von Referenzflächen

Ein Beispiel für die detaillierte Auswertung einer einzelnen Referenzfläche wurde bereits in NEUBERT & MEINEL (2003) gegeben. Im Folgenden werden die Ergebnisse über alle 20 untersuchten Testflächen bewertet (Tab. 2). Wie die Übersicht zeigt, erreichen eCognition 2.1 und 3.0 sowie InfoPACK und der ‚Minimum Entropy Approach‘ die besten durchschnittlichen Größenübereinstimmungen. Auch bei der durchschnittlichen Abweichung von Umfang sowie Shape-Index ergibt sich das gleiche Bild, jedoch schneidet InfoPACK hier etwas schlechter ab. Die guten Shape-Index-Werte des ‚Minimum Entropy Approach‘ werden durch das der visuellen Abgrenzung ähnliche Triangulationsverfahren bedingt.

Insbesondere in der Anzahl der gebildeten Teilsegmente zeigen die beiden eCognition-Versionen ihre Stärke. Sie weisen demnach die geringste Übersegmentierung auf. Die Ergeb-

nisse der Erdas-Imagine-Erweiterung ‚Image Segmentation‘ erreichen zwar hierbei ebenfalls einen guten Wert, sind aber aufgrund der starken Abweichungen der anderen Werte problematisch.

Damit untermauern die Ergebnisse die visuell bewerteten Qualitäten der einzelnen Segmentierungsprogramme. So erreichen derzeit nur die Segmentierungen von eCognition 2.1 bzw. 3.0 gute Gesamtergebnisse. Beide Programme erreichen meist die geringsten Abweichungen von den Referenzflächen bei allen untersuchten Faktoren. InfoPack und der ‚Minimum Entropy Approach‘ liefern ebenfalls annehmbare Resultate, neigen jedoch zur Übersegmentierung.

Tab. 2: Ergebnisse des Segmentierungsvergleichs für 20 Testflächen.

Segmentierungsprogramm	eCognition 2.1	eCognition 3.0	Data Dissection Tools	CAESAR 3.1	InfoPACK 1.0	Image Segmentation (f. Erdas)	Minimum Entropy Approach
Anzahl Testflächen	20	20	20	10 ¹	20	20	11 ¹
Durchschn. Größenabweichung [%]	12,5	15,9	2100,3	75,1	11,1	107,0	13,6
Durchschn. Umfangsabweichung [%]	15,9	17,2	475,6	35,1	30,9	177,3	10,0
Durchschn. Abweichung Shape-Index [%]	16,7	16,2	38,9	25,5	25,5	87,1	10,0
Durchschn. Anzahl Teilsegmente	1,9	1,8	134,6	10,4	17,1	5,9	9,0
Durchschn. Qualität visuelle Bewertung	1,0	0,9	0,2	0,0	0,6	0,2	0,8

¹ abweichende Anzahl durch nicht vollständig vorliegende Segmentierungsergebnisse

Die Ergebnisse der weiteren drei Ansätze bleiben dahinter zurück, sie scheitern vermutlich an der hohen Komplexität der hochauflösenden Satellitenbilddaten. Eine starke Fehl- oder Übersegmentierung ist häufig die Folge. Zudem ist der Grad an Übereinstimmungen zu den Referenzobjekten gering. Allerdings muss hier betont werden, dass diese Ansätze teilweise nicht primär für die Fernerkundung entwickelt wurden.

5 Schlussfolgerungen und Ausblick

Die Segmentierung von Bilddaten ist für hochauflösende Bilddaten unverzichtbar geworden. Die weitere Entwicklung erster, erfolgversprechender Segmentierungsansätze bietet viele Potenziale, um die Klassifikation im Bereich der Fernerkundung genauer und effizienter zu gestalten. So könnte z. B. die Nutzung der Texturinformation die Segmentierungsergebnisse weiter verbessern, allerdings bietet derzeit nur InfoPACK diese Option, die aber in diesem Test nicht genutzt wurde. Auch eine Kombination mit Programmen zur Objektextraktion bzw. modellbasierte Segmentierungsverfahren wären erstrebenswert zur Verbesserung der Segmentierungsqualität.

Die Segmentierungsansätze reagieren häufig sehr sensibel gegenüber geringfügigen Variationen, wie z. B. leichten Parameterveränderungen, der Reihenfolge der Segmentierung bei hie-

rarchischen Verfahren und der Bilddaten selbst (Bildgröße, Farbtiefe), wodurch der Anwender mit einer großen Zahl von Freiheitsgraden konfrontiert wird. Durch die zumeist nach dem Trial-and-Error-Prinzip erfolgende Parameterwahl entstehen subjektiv beeinflusste Resultate. Eine Minimierung dieser Einflussmöglichkeiten sollte daher angestrebt werden. Die Integration von Instrumentarien zur Beurteilung der Segmentierungsgüte in den Segmentierungsprogrammen erscheint dabei für die Evaluierung wünschenswert.

In zukünftigen Arbeiten sollen weitere Segmentierungsprogramme in die Evaluierung einbezogen werden, so beispielsweise die Bildverarbeitungssysteme HALCON und SPRING.

6 Danksagung

Diese Forschungsarbeit wurde durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft im Rahmen des Projektes „Nutzungsmöglichkeiten neuester, hochauflösender Satellitenbilddaten für die Raumplanung“ (Me 1592/1-2) gefördert. Für die Bearbeitung der Segmentierungen danken wir Frau Dr. Prietzsch (Infoterra), Herrn Prof. Oliver (InfoSAR), Herrn Dr. von Ferber (Universität Freiburg) sowie Herrn Hermes (Universität Bonn). Für die Bereitstellung der Software SEQ-Tool sei Herrn Dr. Lessing und Herrn Haubrock (DELPHI IMM) gedankt.

7 Literaturverzeichnis

- BAATZ, M. & A. SCHÄPE, 2000: Multiresolution Segmentation - an optimization approach for high quality multi-scale image segmentation. In: STROBL, J. et al. (Hrsg.): Angewandte Geographische Informationsverarbeitung XII. Wichmann, S. 12-23.
- COOK, R.; I. MCCONNELL; D. STEWART & C. OLIVER, 1996: Segmentation and simulated annealing. In: FRANCESCHETTI, G. et al. (Eds.): Microwave Sensing and Synthetic Aperture Radar. Proc. SPIE 2958, pp. 30-35.
- DELPHI IMM GMBH, 2003: Bestimmung der Segmentierungsqualität bei objektorientierten Bildanalyseverfahren mit SEQ. <http://www.delphi-imm.de/neu/> > Fernerkundung > Software > SEQ.
- FERBER, C. VON & F. WÖRGÖTTER, 2000: Cluster update algorithm and recognition. Phys. Rev. E 62, Nr. 2, Part A, pp. 1461-1464.
- HERMES, L. & J. M. BUHMANN (2001): A New Adaptive Algorithm for the Polygonization of Noisy Imagery. Technical Report IAI-TR-2001-3, Dept. of Computer Science III, University of Bonn.
- KETTIG, R. L. & D. A. LANDGREBE, 1976: Classification of Multispectral Image Data by Extraction and Classification of Homogeneous Objects. IEEE Transactions on Geoscience Electronics, Vol. GE-14, No. 1, pp. 19-26.
- MEINEL, G.; M. NEUBERT & J. REDER, 2001: Pixelorientierte versus segmentorientierte Klassifikation von IKONOS-Satellitenbilddaten – ein Methodenvergleich. PFG 3/2001, Schweizerbart, Stuttgart, S. 157-170.
- NEUBERT, M. & G. MEINEL, 2003: Vergleich von Segmentierungsprogrammen für Fernerkundungsdaten. In: STROBL, J. et al. (Hrsg.): Angewandte Geographische Informationsverarbeitung XV. Wichmann (im Druck).
- RUEFENACHT, B.; D. VANDERZANDEN; M. MORRISON & M. GOLDEN, 2002: New Technique for Segmenting Images. Softwaredokumentation.

A Neural Network Change Detection Approach for Analysis of Afforestation, Reforestation and Deforestation Processes in Siberia

SÖREN HESE & CHRISTIANE SCHMULLIUS¹

Zusammenfassung: Ergebnisse eines Change Detection Verfahrens auf Basis von neuronalen Netzwerken für die Ableitung von Afforestation, Reforestation und Deforestation (ARD) in Sibirien werden vorgestellt. Die Arbeit ist Teil des EU-Projektes SIBERIA-II (Multi-Sensor Concepts for Greenhouse Gas Accounting of Northern Eurasia). Die Erfassung von ARD und entsprechender Landnutzungsänderungen ist im Zusammenhang mit der nationalen Erfassung von CO² Emissionen bzw. potentieller Quellen und Senkenfunktionen im Rahmen des Kyoto Protokolls von Bedeutung. Besondere Relevanz haben derartige Informationen auch für die vollständige Modellierung der Treibhausgasbilanz durch regionale Biosphärenmodelle.

Um ARD Klassen abzuleiten werden multitemporale Landsat Daten relativ co-registriert und absolut atmosphärenkorrigiert. Für die eigentliche Klassifikation wird ein Ansatz auf der Grundlage neuronaler Netzwerke (Multi-Layer Perceptron Artificial Neural Network) und unter Verwendung des Feed-Forward – Back-Propagation Verfahrens genutzt. Das Training des neuronalen Netzwerkes erfolgt mithilfe von lokalen Forstinventurdaten. Im methodischen Teil wird eine direkte „two-date“-Klassifikation mit unterschiedlichen Eingangsdaten und verschiedenen Netzwerkstrukturen analysiert. Mögliche Erweiterungen des Verfahrens durch Integration von Objekten bzw. durch Integration der Objekteigenschaften in das Netzwerk und der Einfluss von Change-Feature-Ratios auf das Klassifikationsergebnis werden abschließend diskutiert.

1 Introduction

The work on Afforestation, Reforestation and Deforestation (ARD) mapping and monitoring in Siberia is part of the ongoing EC project SIBERIA-II (Multi-Sensor Concepts for Greenhouse Gas Accounting of Northern Eurasia) (SCHMULLIUS & HESE 2001, HESE ET AL. 2002). The scientific objective of SIBERIA-II is to integrate Earth observation 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.

In the KP “*Afforestation*” is defined as the direct human-induced conversion of land that has not been forested for a period of at least 50 years to forested land through planting, seeding and/or the human-induced promotion of natural seed sources.

“*Reforestation*” is defined as the direct human-induced conversion of non-forested land to forested land through planting and seeding on land that was forested but that has been converted to non-forested land (from the Kyoto Protocol, Marrakesh Accord – Annex A).

“*Deforestation*” is the direct human-induced conversion of forested land to non-forested land

¹ Dr. S. Hese, Prof. Dr. C. Schullius, Friedrich-Schiller University of Jena, Department of Geoinformatics and Remote Sensing, Löbdergraben 32, 07743 Jena, e-mail: soeren.hese@uni-jena.de

(Kyoto Protocol – Marrakesh Accord – Annex A). The definition of these terms (time and area thresholds) will be changed and adapted partly to the FRA (Forest Resources Assessment) definitions as proposed by the “Expert meeting on harmonizing forest related definitions 2002 (FAO)”. Dropping the 50 years non-forest definition in the KP for Afforestation and the differentiation of human and non-human induced deforestation in the FRA definition was proposed in order to bring UNFCCC and FRA definitions into closer agreement. 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.

For the Remote Sensing perspective the ability to discriminate forest types according to a specific forest definition is important. On the other side differentiation between natural and human induced forest changes (as required by the KP) is challenging as it asks for an analysis of different disturbances including fire and tries to identify underlying causes. As noted already in SCOLE AND QI (1999) forest management practices which change growth rates of forests and selective logging are not considered. Interpretation of the possible causes of forest changes are very difficult and remote sensing will have to be combined with ground truth and local forest enterprise information to deliver precise information to these questions.

2 Forest Change Detection using Artificial Neural Networks

To detect changes in forest cover different approaches have been proposed in the past. Some proposed methodologies have been: direct multi-date classifications using a combined dataset (hyper clustering) (LECKIE ET AL., 2002), image differencing, index differencing, principal components analysis (PCA), change vector analysis, various post classification change detection methods including object oriented analysis and parcel-based change detection. A review of change detection methods is available in SINGH (1989). Artificial Neural Networks (ANN) have been used for post classification approaches (double stage neural network structure) (KUSHARDONO ET AL., 1995) and for direct two-date change detection (GOPAL AND WOODCOCK, 1996). One of the advantages of ANNs for change detection is the possibility to integrate multi sensor data types (BENEDIKTSSON AND SVEINSSON, 1997) and complementary information content (object based information, texture and spectral information) in one classification process (IONG DAI AND KHORRAM, 1999). Other advantages are inherent with the character of neural networks (lack of assumptions about normality in datasets, ability to capture non-linearity (GOPAL AND WOODCOCK, 1996)). Various applications of back-propagation ANNs for remote sensing purposes have been published e.g. in BENEDIKTSSON, SWAIN AND ERSOY (1990); BENEDIKTSSON AND SVEINSSON (1997); BISCHOF, SCHNEIDER AND PINZ (1992); EGMONT-PETERSEN, DE RIDDER AND HANDELS (2002) and in SERPICO AND ROLI (1995) and for forest remote sensing e.g. in GOPAL AND WOODCOCK (1996); MACHADO ET AL. (1993) and PAOLA AND SCHWENGERDT (1995). The most widely used neural network type is the Multi Layer Perceptron network (MLP) which is used together with the feed forward – back-propagation classifier (training procedure) applying the generalized delta rule for learning. Numerous other network types have been proposed in the past for different applications. A review can be found in EGMONT-PETERSEN, DE RIDDER AND HANDELS (2002). The idea of neural networks is to mimic the computational abilities of biological systems by creating interconnected artificial neural systems. These artificial neural nodes take input information and perform very simple operations and selectively forward the information to other neurons. The connection weights between the neurons are than adjusted using a training method.

Advantages of the neural network approach compared with conventional classifiers are:

- Knowledge of the statistical distribution of the data is not required. This is an advantage if there is no knowledge of the distribution function or when the data are non-Gaussian.
- Multi-source and -domain data can easily be integrated and added into the network by adding additional input nodes.
- The use of multi-temporal data in one classification process is simple and is advantageous as it does not introduce the accumulative errors of post classification comparison procedures.
- The trained neural network can do change detection on a pixel by pixel or object by object basis in real time.
- The network can directly be trained with context information using a window of the data set without deriving specific secondary texture measures with loss of information.

Some of the drawbacks of the application of neural networks are the black-box character of the network, the weak theoretical background (which can be also interpreted as an advantage) and a complex, error-prone and computationally intensive training stage which has to be repeated whenever the nature of the input data set is changed.

3 Method

ARD classes have to be derived for test territories with forest enterprise information which cover different ecological regions in Siberia. The selection of test territories was performed in order to cover different forest change dynamics and to receive an overall impression using representative areas. In the first phase 5 cloud free Landsat TM-5 and ETM multi-temporal data stacks for these areas were acquired from 1989(1990) and 2000(2001) covering areas in the Krasnoyarsky Kray and Irkutsk Oblast. To correct for path radiance in multi-temporal data atmosphere correction algorithms were employed following RICHTER (1996). Adjacent scenes will be absolute corrected to the same reference spectra to allow the application of trainings areas and signatures to neighbouring multi-temporal data stacks. Topographic normalisation and ortho-correction was postponed due to the lack of high resolution DTMs for Siberia for the area under investigation. Full DTM coverage with 50 m resolution will be available however when radar data processing from the finished SIBERIA-I project (FP4) – the predecessor project of SIBERIA-II (SANTORO ET AL. 2002)- will be finalised in 2003.

The direct two-date change detection approach:

As the first step for the change detection analysis a fully connected multi-layer feed-forward network was created and trained with the back-propagation procedure that iteratively adjusts the coupling strengths or connection weights in the network in order to minimize the error between the desired and the predicted output pattern (Figure 1). The input layer is defined by the number of input data channels or feature layers whereas the output layer is defined by the number of desired classes. The network structure between these two layers consists of hidden layers with a specific number of hidden units (or neurons). The optimal structure of a network depends on the application needs and is hard to predict. For the ARD classification different network structures were tested with different numbers of hidden layers and neurons per hidden layer. Changing the network structure did not increase the average producer accuracy and the overall accuracy of the classification process.

Important for reliable results is the training with precise ground data which has to be selected according to the definition of forest in the KP (tree cover of more than 10 %, minimum area

0.5 ha, height greater than 5 m). This definition controls the threshold and category boundary between non-forest and reforestation or afforestation. In this first analysis only few change categories were defined (reforestation, deforestation – clear cuts, deforestation fire scars, forest area with no changes, water area).

Two-date change detection with standardized change features:

Standardized multi-temporal change features (SMI) were created with all multispectral image channels to increase the separability of change signatures.

$$SMI_{Band5} = (Band5_{Time1} - Band5_{Time2}) / (Band5_{Time1} + Band5_{Time2})$$

The resulting residual image channels represents feature change layers for the two dates and were used as additional data layers for the neural network.

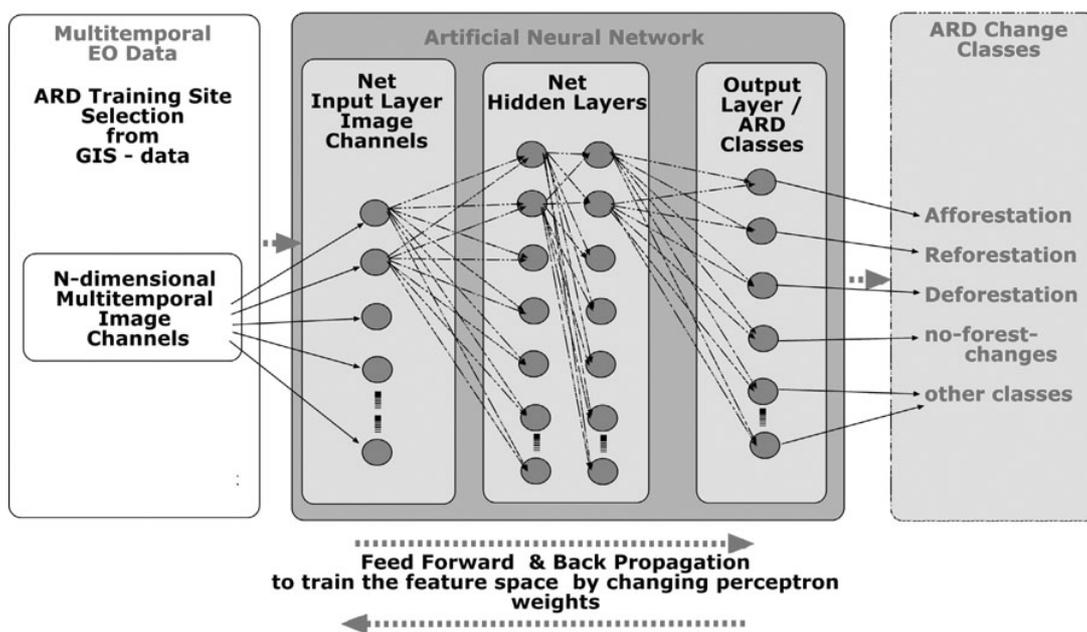


Figure 1: Multi layer perceptron neural network structure for the classification of ARD with multi-temporal data

4 Results

Both results from the change detection with and without standardized change features show a signature confusion for the classes fire scar and clear cut. This reduces the producer accuracy and the user accuracy of the corresponding classes (compare with the confusion matrices in Table 1 and 2). The reforestation class showed overlap with other classes probably mainly due to the inhomogeneous nature of reforestation occurring on deforested areas. These results may also indicate inaccurate test and training data (Table 1). The totalization reports (Table 3) suggests a stronger deforestation compared with the reforestation processes of the selected sub area. It remains however unclear if these reforestation processes are human induced or not. In most cases in Siberia the clear cuts regenerate naturally without the direct human interference. Integrating change feature ratios increases the overall classification accuracy.

Areas		Percent Pixels Classified				
Code Name	Pixels	Water	Reforestation	Clear Cut	Fire Scar	No Change
Water	1993	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Reforestation	1193	0,7	69,2	6,5	15,0	8,6
Clear Cut (Def 1)	1702	0,0	0,0	93,3	6,7	0,0
Fire Scars (Def2)	6754	1,5	1,5	25,2	68,3	3,5
No Change	2768	0,0	0,0	0,0	0,0	100,0

Table 1: Confusion matrices for a neural net ARD classification (18-24-24-5 net structure) with multi-temporal change feature ratios. Average accuracy = 86.15%, overall accuracy = 81.78%

Areas		Percent Pixels Classified				
Code Name	Pixels	Water	Reforestation	Clear Cut	Fire Scar	No Change
Water	1993	99,6	0,0	0,4	0,0	0,0
Reforestation	1193	0,0	61,5	27,5	3,5	7,5
Clear Cut (Def 1)	1702	0,0	0,0	95,9	4,1	0,0
Fire Scars (Def 2)	6754	0,0	0,1	40,0	59,5	0,3
No Change	2768	0,0	0,0	0,0	1,8	98,2

Table 2: Confusion matrices for a neural net ARD classification (12-24-24-5 net structure) without multi-temporal change feature ratios. Average accuracy = 82.96%, overall accuracy = 79.97%

Code Name	Pixels	ANN structure: 12-24-24-5		ANN structure: 18-24-24-5 (with 6 change feature layers)	
		Hectares	%Image	Hectares	%Image
Water	367148	25047,99	2,96	33043,32	3,90
Reforestation	467444	23732,19	2,80	42069,96	4,97
Clear Cut (Def 1)	251414	67308,48	7,95	22627,26	2,67
Fire Scars (Def 2)	583878	38976,21	4,60	52549,02	6,21
No Change	7735691	691436,56	81,68	696212,19	82,25
Image Total		846501,78	100,00	846501,78	100,00

Table 3: Totalization report for the classification in Hectares and %Image for a neural network structure with multi-temporal data and with change feature ratios.

5 Conclusion and Discussion

First results of ARD mapping with ANNs indicate a potential of neural networks for complex change detection analysis, although the advantages of ANNs compared with standard methods haven't been fully exploited in this work. Ortho correction and topographic normalisation was not performed due to the unavailability of full DTM coverage. The integration and use of image channel ratios for topographic normalisation was discarded due to the introduction of image noise. The integration of objects and textural information layers into the neural network classification process would be of interest and should be analysed to discriminate different ARD relevant classes. For the overall results with ANNs the definition of forest (frac-

tional cover, stand height) and the training stage which should represent the class characteristics accurately is crucial for a successful classification. In this first stage of the ARD work training data for afforestation was not available, although this change class might exist in the data. The basic problems in this work are linked to the differentiation of human and non-human induced changes. The differentiation of deforestation types could be possible using object oriented approaches taking the shape of clear-cut-objects into account. Fire scars usually do not exhibit the same characteristic shape as human induced clear cut areas.

Post classification procedures could be combined with Neural Networks (KUSHARDONO ET AL. 1995) but the disadvantage of using a post classification strategy is the accumulation of errors of the two parallel classifications. Nevertheless post classification procedures have been used in the past as benchmark method for comparisons with other methods and an appropriate method will be also tested for ARD work. In principle the accurate definition of change classes referring to the mentioned specific definition is important for this analysis.

6 Acknowledgment

This work is part of the EC 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). The support is gratefully acknowledged.

7 References

- BENEDIKTSSON J.A., P.H. SWAIN, O.K. ERSOY, 1990: Neural Network Approach Versus Statistical Methods in Classification of Multisource Remote Sensing, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 28, no. 4, July 1990.
- BENEDIKTSSON J.A., J.R. SVEINSSON, 1997: Feature extraction for multisource data classification with artificial neural networks, *Intern. Journal of Remote Sensing*, vol. 18, no. 4, 727-740, 1997.
- BISCHOF H., W. SCHNEIDER, A.J. PINZ, 1992: Multispectral Classification of Landsat-Images Using Neural Networks, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 30, no. 3, May 1992.
- EGMONT-PETERSEN M., D.DE RIDDER, H. HANDELS, 2002: Image Processing with neural networks – a review, *Pattern Recognition*, vol. 35, 2279-2301, 2002.
- GOPAL S., C. WOODCOCK, 1996: Remote Sensing of Forest Change using Artificial Neural Networks, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 34, no. 2, March 1996.
- HESE S., C. SCHMULLIUS, H. BALZTER, W. CRAMER, F. GERARD, R. KIDD, T. LETOAN, W. LUCHT, A. LUCKMAN, I. MCCALLUM, S. NILSSON, A. PETROCCHI, S. PLUMMER, S. QUEGAN, A. SHVIDENKO, L. SKINNER, S. VENEVSKY, S. VOIGT, W. WAGNER, U. WEGMÜLLER & A. WIESMANN, 2002: Sensor Systems and Data Products in SIBERIA-II - a Multi-Sensor Approach for Full Greenhouse Gas Accounting in Siberia, *Forest-SAT proceedings*, Edinburgh, 5-9 August 2002, Forest Research, Forestry Commission.
- IONG DAI X. AND S. KHORRAM, 1999: Remotely Sensed Change Detection Based on Artificial Neural Networks, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, vol. 65, no. 10, 1999.

- KUSHARDONO D., K. FUKUE, H. SHIMODA, T. SAKATA, 1995: Comparison of Multi-Temporal Image Classification Methods, Proc. Inter.Conf. on Geoscience and Remote Sensing, pp.1282-1284,1995.
- LECKIE D., N. WALSWORTH, J. DECHKA AND M. WULDER, 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.
- MACHADO R.J., V.C. BARBOSA, F. DOS, S. LIPORACE, C. FERLIN, 1993: Monitoring Deforestation of the Amazon region with neural networks, Proceedings of 1993 International Joint Conference on Neural Networks, 1239-1242.
- PAOLA J.D. AND R.A. SCHWENGERDT, 1995: A review of backpropagation neural networks for classification of remotely sensed multi-spectral imagery, *Intern. Journal of Remote Sensing*, vol. 16, 3033-3058, 1995.
- RICHTER R., 1996: A spatially adaptive fast atmospheric correction algorithm, *Intern. Journal of Remote Sensing*, vol. 17, no. 6, 1201-1214, 1996.
- ROGAN J., J. FRANKLIN, D. STOW, L. LEVIEN, C. FISCHER, 2001: Towards Operational Monitoring of Forest Cover Change in California Using Multitemporal Remote Sensing Data, Proceedings of *IGARSS 2001* Sydney, Australia 9-13 July.
- SANTORO, M., C. SCHMULLIUS, L. ERIKSSON & S. HESE, 2002: The SIBERIA and SIBERIA-II projects: an overview, 9th International symposium on Remote Sensing, Crete/Greece, Proceedings of SPIE Vol. 4886-34, 2002.
- SINGH A., 1989: Digital Change Detection Techniques Using Remotely-Sensed Data, *Intern. Journal of Remote. Sensing*, 10, 989-1003.
- SCHMULLIUS C. AND S. HESE, 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.
- SCHULZE E.D., VALENTINI R., SANZ M.J., 2002: The long way from Kyoto to Marrakesh: Implications of the Kyoto Protocol negotiations for global ecology, *Global Change Biology*. 8(6): 505-518.
- SCOLE D., J. QI, 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.
- SERPICO S.B. AND F. ROLI, 1995: Classification of multi-sensor remote-sensing images by structured neural networks, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol.33 ,No.3, May 1995, pp.562-578.
- IPCC, Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories”, J PENMAN, D KRUGER, I GALBALLY, T HIRAISHI, B NYENZI, S EMMANUL, L BUENDIA, R HOPPAUS, T MARTINSEN, J MEIJER, K MIWA AND K TANABE (EDS), IPCC National Greenhouse Gas Inventories Programme, Published for the IPCC by the Institute for Global Environmental Strategies, Japan, ISBN 4-88788-000-6.

Kombinierte visuelle und digitale Flächennutzungsklassifizierung der Hansestadt Rostock auf der Grundlage von HRSC-AX Daten

GÖRRES GRENZDÖRFFER¹, ANITA WESSNER², STEFFEN FRANZ³

Zusammenfassung: Zur Erfassung der Flächennutzung und der Versiegelung mit höchstauflösenden HRSC-AX-Aufnahmen von Rostock wird eine visuelle Interpretation mit einer regionen-basierten Klassifikation kombiniert. Für die Versiegelungsklassifizierung und weitere kommunale Auswertungen wurden aus dem digitalen Oberflächenmodell weitestgehend automatisch ein Geländemodell sowie ein Objekthöhenmodell abgeleitet. Der Vergleich der Interpretationsergebnisse mit Satellitenbildklassifikationen zeigt, dass seit 1989 in Rostock mindestens 304 ha neu versiegelt wurden.

1 Einleitung

In den Jahren 1989 und 1995 sind für die Hansestadt Rostock erste Flächennutzungserhebungen auf der Basis von gemergten SPOT/Landsat TM-Daten erhoben und miteinander verglichen worden, BILL et al., 1998. Auf der Grundlage hochauflösender Flugzeugscannerdaten einer HRSC-AX Befliegung 2002 sind die bisherigen Arbeiten weiter entwickelt und fortgeführt worden. Mit dem im Vergleich zu der aus den Satellitenbildern (10-30 m/Pixel) erhobenen Flächennutzung von 1989 und 1995 mit einem Zielmaßstab von 1:50.000 bieten die HRSC-AX Bilddaten ungleich mehr Details (16 cm/Pixel). Das bedingt eine Erweiterung und Überarbeitung des bisherigen Klassifikationsschlüssels sowie eine grundsätzlich andere methodische Herangehensweise, die der hohen Bodenauflösung und den spektralen Eigenschaften der HRSC-AX-Daten, einschließlich des zusätzlichen digitalen Oberflächenmodells, Rechnung trägt. Deshalb erfolgte im Rahmen der vorgestellten Arbeit für das Umweltamt der Hansestadt Rostock eine Auswertung sowohl mit Hilfe modernster digitaler regionen-basierter Bildverarbeitungstechniken als auch durch visuelle Interpretation, um die Expertise des Interpreten zu nutzen. Zuerst jedoch sollen die Datengrundlagen und die notwendigen Vorverarbeitungsschritte vorgestellt werden. Anschließend erfolgt eine Beschreibung sowohl der visuellen als auch der automatischen Bildinterpretation. Abschließend werden die aktuellen Ergebnisse der Flächennutzungskartierung mit den Satellitenbildklassifikationen von 1989 und 1995 verglichen, um eine dann 13-jährige Zeitreihe der Zunahme der Flächenversiegelung der Hansestadt Rostock zu erhalten.

2 High Resolution Stereo Scanner Airborne - HRSC-AX

Zur Funktionsweise und die technischen Spezifikation des Dreizeilenscanners HRSC-A, -AX, -AXW sei auf die Literatur, z.B. Neukum, 2001 verwiesen. Der Bildflug mit der HRSC-AX-Kamera von der Hansestadt Rostock und Umgebung erfolgte am 9. und 10.04.2002. Die Prozessierung der Daten seitens des DLR dauerte drei Monate und ein erster Datensatz konnte im Juli 2002 zur Verfügung gestellt werden. Dieser wies jedoch im südlichen Bereich eklatante

¹ Dr.-Ing. Görres Grendörffer, Institut für Geodäsie und Geoinformatik, Universität Rostock, J.-v.-Liebig Weg 6, 18059 Rostock, email: goerres.grendoerffer@auf.uni-rostock.de

² Dipl.-Ing. Anita Wessner, Yorkring 14, 48159 Münster, email: anita.wessner@web.de

³ Dipl.-Ing. (FH) Steffen Franz, Alsterkrugchaussee 212 /C011, 22297 Hamburg, email: s.franz77@web.de

radiometrische Schwächen auf, so dass eine Nachprozessierung speziell für den südlichen Teil notwendig wurde, Lieferung Dezember 2002. Aufgrund der unterschiedlichen Prozessierung ist der Nord- und der Südteil radiometrisch nicht aneinander angepasst worden.

2.1. Ableitung eines digitalen Objekthöhenmodells

Das digitale Oberflächenmodell der HRSC-AX beschreibt den jeweils höchsten Punkt der Erdoberfläche mit einer Rasterweite von 1*1m. Diese Informationen müssen für die weitere Nutzung überarbeitet werden, z.B. weil die oberhalb der Geländeoberfläche stehenden Objekte wie Häuser, Bäume etc. nicht von Interesse sind bzw. stören oder die absolute Höhe von Objekten (Gebäude, Bäume ...) bestimmt werden soll. Falls zur Extraktion der Geländeoberfläche aus dem DOM keine zuverlässigen Informationen vorliegen, z.B. eine Gebäudedatenbank (ALK), die für eine Maskierung in Frage kommen, müssen die Gebäudeinformationen entweder direkt aus dem DOM oder indirekt, z.B. aus Luftbildern etc., gewonnen werden. Zur Ableitung dieser Informationen aus dem DOM gibt es interaktive, teilautomatische und vollautomatische Verfahren. In den letzten Jahren ist viel an der Bereinigung von ungewünschten Oberflächenobjekten gearbeitet worden, um möglichst automatisch die „wahre“ Erdoberfläche aus einer fernerkundlichen Aufnahme zu bestimmen. Der Schwerpunkt der Forschungen lag dabei jedoch auf Laserscanning-Daten. In diesem Zuge wurden mehrere Strategien entwickelt, z.B. die Spline-Approximation, Lineare Prädiktion und normale und iterative morphologische Filter, um die Gebäude, Bäume etc. zu identifizieren und zu entfernen z.B. SCHIEWE, 2001. Dies ist aber nur der erste, wenn auch sehr wichtige Schritt zur Bestimmung eines normalisierten Objekthöhenmodells (nOHM). Das ganze Verfahren kann in fünf Teilschritte unterteilt werden:

1. Filterung des digitalen Oberflächenmodells (DOM) in Bodenpunkte und Vegetationspunkte.
2. Interpolation der definierten Bodenpunkte zu einem digitalen Geländemodell (DGM).
3. Berechnung eines Senkenmodells durch eine Subtraktion des DOM vom DGM. Die Senken definieren die niedrigsten Punkte im Gelände und sind z.B. für eine hydrologische Verwendung des DGM von Bedeutung.
4. Addition des Senkenmodells und des digitalen Geländemodells, um ein normalisiertes digitales Geländemodell zu erhalten (nDGM)
5. Subtraktion des nDGM vom DOM, um das normalisierte Objekthöhenmodell (nOHM) zu erhalten.

Der entwickelte semiautomatische Ansatz besteht aus einem Satz verschiedener Filter, die die Bodenpunkte von den Vegetationspunkten trennen, FRANZ, 2003. Als erster Schritt wird ein ungerichteter Kantenfilter (Sobelfilter) angebracht und anschließend geglättet (9 * 9 Dilation). Anhand eines empirisch festgelegten Schwellwerts werden Kanten von z.B. Häusern und Bäumen von den unbedeutenden Kanten im Zuge der Binarisierung getrennt. Anschließend kommt ein morphologischer Filter (Erosion, 9 * 9) zum Einsatz, der unerwünschte Einzelpixel eliminiert. Die so erstellte Filtermaske wird visuell überprüft und fehlerhafte Stellen, vor allem auf großen Dächern großer Industrieanlagen und in dichten Nadelwäldern, werden manuell editiert. Um die Redundanz zu verringern, ist das Ausgaberraster auf 5 * 5 m resampled worden. Die resampled Punkte (insgesamt über 4.1 Mio. Punkte) wurden mit der DGM-Software Surfer 8 kachelweise und geostatistisch auf ein 5 m Raster-DGM interpoliert. Die einzelnen Dateien (insgesamt 23) sind anschließend wieder zu einem Mosaik zusammengefasst worden.

Die Genauigkeit des DOMs bzw. des DGMs ist anhand von 110 Punkten mit einer Höhen Genauigkeit von $\pm 0,1$ m überprüft worden. Bei dem DOM sind verschiedentlich Artefakte, ins-

besondere bei hohen Gebäuden, beobachtet worden. Außerdem ist eine unsystematische Verschiebung des DOM gegenüber der Bildinformation um mehrere Meter aufgetreten. Die mittlere Abweichung des DOM an 97 Bodenpunkten lag hierbei bei 0,17 m, Stdabw. 0,38 m. Das DGM wies eine mittlere Abweichung von 0,05 und eine Stdabw. von ebenfalls 0,38 m auf. Allerdings ist zu beachten, dass die Genauigkeit eines interpolierten Geländepunktes wesentlich von der Entfernung zu benachbarten Punkten sowie dem dazwischen liegenden Gefälle abhängt. Der mittlere Punktabstand betrug in vier 2 x 2 km großen Testgebieten etwa 35 m mit Maxima von 350 m. Die großen Punktentfernungen treten insbesondere in Waldgebieten und eng bebauten Stadtbereichen auf. In diesen Bereichen ist die Genauigkeit des DGM deutlich geringer als die vorher angegebenen Werte. Um zusätzliche Informationen von tiefer liegenden Stellen zu integrieren, sind durch eine Kombination mit dem DOM noch die Senken eingearbeitet worden, siehe Abb. 1. Als Senke wurden alle Bereiche im DOM definiert, die mehr als einen halben Meter unterhalb des DGMs lagen. Dadurch sind ein Teil der oben genannten Fehler korrigiert worden, die durch eine Interpolation zwischen zwei höher liegenden Punkten auftreten können.

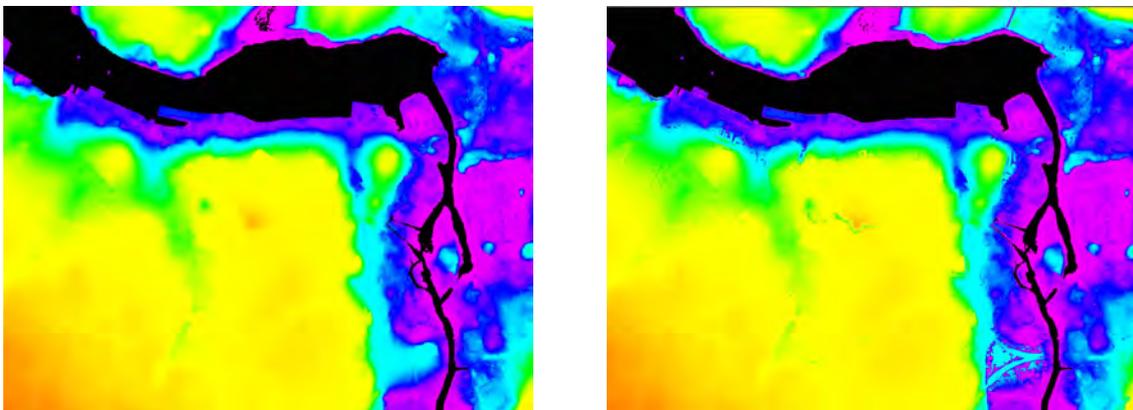


Abb. 1: Ausschnitt Innenstadt Rostock - DGM (links) und nDGM (rechts) im Vergleich

3 Visuelle Interpretation

Der erste und wichtigste Schritt bei einer visuellen Interpretation ist die Definition des Zielmaßstabs und die Entwicklung eines an die Fragestellung und das Bildmaterial angepassten Interpretationsschlüssels. An einen Interpretationsschlüssel werden verschiedene, teilweise widersprüchliche Anforderungen im Hinblick auf z.B. Vollständigkeit, Überschneidungsfreiheit, Maßstabskonsistenz, Klassifikationsgüte, vielfältiger Nutzbarkeit durch unterschiedliche Nutzer sowie eine methodische Trennung zwischen Flächenbedeckung und Flächennutzung gestellt, MEINEL UND HENNERSDORF, 2002.

Der erarbeitete dreistufige hierarchische Klassifikationsschlüssel für den Zielmaßstab von 1: 5.000 – ein Kompromiss zwischen Aufwand und Detaillierungsgrad – ist zu den bisherigen visuellen Satellitenbildinterpretationen kompatibel, was durch eine Untersetzung in der dritten Ebene des Klassifikationsschlüssels realisiert wurde. Der Interpretationsschlüssel deckt alle vorkommenden Flächennutzungen ab und umfasst insgesamt 40 Klassen, wobei eine tiefere Differenzierung im Bereich der bebauten Flächen vorgenommen wurde. Bei der Definition der Klassen wurde einer guten visuellen Abgrenzung der Bodenbedeckung Vorrang vor der Differenzierung der Flächennutzung gegeben, um eine möglichst hohe Interpretationsgenauigkeit zu gewährleisten. Um Zuordnungsfehler zu vermeiden und spektral nicht eindeutige Flächen interpretieren zu können, wurden durch das Umweltamt zusätzlich relevante Flächennutzungsinformationen (z.B. Moor- und Deponieflächen) in digitaler Form bereitgestellt.

Durch die allgemein gehaltenen Realnutzungsklassen ist eine breite Verwendung durch verschiedene Nutzer gewährleistet. Bedingt durch den frühen Aufnahmezeitpunkt Anfang April treten für eine Flächennutzungsklassifizierung allerdings Probleme auf, z.B. bei der Abgrenzung von Sukzessionsflächen.

3.1. Ergebnisse der visuellen Interpretation

Im Rahmen der Digitalisierung wurden insgesamt 9.965 Flächennutzungspolygone digitalisiert. Die flächenmäßige Spannweite der Realnutzungspolygone war sehr groß und reicht von einem Stichweg mit 68 m² bis zu einer Waldfläche von 22.013.280 m². Ein Blick auf die zweite Gliederungsebene ergibt folgende Nutzungsartenverteilung, Abb. 2.

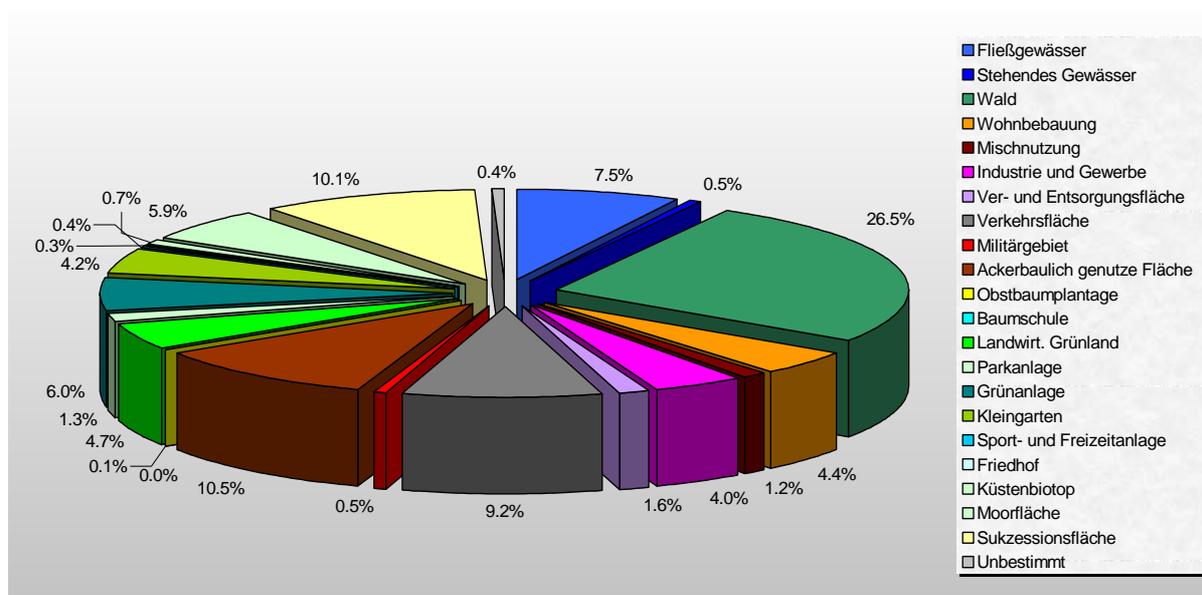


Abb. 2: Flächennutzung der Hansestadt Rostock 2002 - Stufe 2

Dabei fällt bei den Siedlungsgebieten z.B. auf, dass die Industrie- und Gewerbegebiete sowie die Ver- und Entsorgungsbereiche ziemlich genau die gleiche Fläche beanspruchen wie Wohn- und Geschäftsgebäude. Außerdem beanspruchen die Kleingartenanlagen eine Fläche, die etwa 75 % der Fläche für Wohn- und Geschäftsgebäude entspricht. Die großen Moor- und Sukzessionsflächen einschließlich der Küstenbiotope sind ein Charakteristikum der Hansestadt Rostock, die 16,7 % der gesamten Stadtfläche einnehmen und vor allem entlang der vielen Niederungsgebiete einen großen Teil der Stadtfläche ausmachen.

4 Versiegelungskartierung mit eCognition

„Ein Boden gilt dann als versiegelt, wenn er mit festen Materialien bedeckt ist. Dabei lassen sich versiegelte Flächen in bebaut und unbebaut versiegelte Flächen trennen. Neben baulichen Anlagen und mit Asphalt oder Beton vollständig versiegelten Oberflächen werden auch durchlässigere Beläge als versiegelt betrachtet, obwohl diese, wie z. B. Rasengittersteine oder breitfugiges Pflaster z. T. noch ein reduziertes Pflanzenwachstum erlauben.“⁴

Mit dieser recht umfassenden Definition der Versiegelung setzt eine genaue Versiegelungskartierung sehr exakte Daten voraus, die genaue Informationen über die Art der Bebauung

⁴ http://www.stadtentwicklung.berlin.de/umwelt/umweltatlas/d102_01.htm#RTFTtoC3

und der Bodenbedeckung beinhalten. Da diese üblicherweise nicht vorliegen, wird bei der bisherigen Herangehensweise für jede Flächennutzung/Bodenbedeckung eine durchschnittliche Versiegelung angenommen, z.B. nach SPERBER UND MEYER, 1989 46 % für eine Großblockbebauung, die sich aus einer bebaut versiegelten Fläche und einer unbebaut versiegelten Fläche zusammensetzt und empirisch ermittelt wurde. Dieses Verfahren kann auf jede Art der Realnutzungskartierung aufgesetzt werden, wobei die Genauigkeit der Bestimmung der versiegelten Fläche entscheidend von der zugrunde liegenden Datenqualität und dem Maßstab abhängig ist, was in den meisten Fällen eine empirische Nachjustierung erforderlich macht. Ein großer Nachteil dieser Herangehensweise ist es, dass alle Polygone einer Flächennutzungsklasse den gleichen Versiegelungsgrad aufweisen. Aus diesem Grunde soll ein anderes Verfahren verwendet werden, das die versiegelte Fläche direkt aus den multispektralen Bilddaten sowie ergänzenden thematischen Informationen bestimmt und anschließend einen Anteil der Versiegelung für jedes Polygon der visuell interpretierten Flächennutzung zuweist. Um die versiegelten Flächen direkt aus den hochaufgelösten multispektralen Bilddaten zu bestimmen, sind vor allem auf der Grundlage von Satellitenbildern verschiedene unterschiedlich komplizierte Methoden erfolgreich zum Einsatz gekommen, z.B. einfache Vegetationsindizes, multispektrale Klassifikationen, wissensbasierte Multispektralklassifikationen. Solche pixelbasierten Methoden stoßen jedoch bei hochaufgelösten Luftbildern an ihre Grenzen, da diese Verfahren ausschließlich auf eindeutig trennbaren spektralen Clustern beruhen. Zur Überwindung der angesprochenen Probleme sind in den letzten Jahren regionen-basierte Verfahren in den Mittelpunkt des Interesses gerückt, z.B. HOFFMANN, 2001 et al. Dabei werden Segmentierungsverfahren eingesetzt, die als Vorstufe zur eigentlichen Klassifikation angewendet werden. Der Klassifikationsschritt nutzt zusätzliche Datenquellen und Regeln. Mittels Zugehörigkeitsfunktionen ist es möglich, Fuzzy-Logic-Regeln zu formulieren, nach denen Klassen gebildet werden können. Ein zentraler Aspekt gegenüber dem konventionellen pixelbasierten Ansatz ist, dass bei einer auf Regionen basierten Bildanalyse Nachbarschaftsbeziehungen zwischen den Bildelementen sowohl bei der Bildung der Regionen als auch bei der anschließenden Klassifikation berücksichtigt werden können, z.B. BLASCHKE 2002.

4.1. Vorverarbeitung

Vor der Prozessierung mit eCognition, welches mit der Datenflut von 55 GB für den kompletten Datensätze mit Bodenaufösungen von 0,16 – 1 m für ein solch großes Projekt nicht vernünftig umgehen kann, sind alle Datensätze auf ein einheitliches 1 m Raster vergrößert worden. Als Kompromiss zwischen der Performance und Anzahl der zu klassifizierenden Kacheln wurden zusätzlich 16 ca. 4 * 4 km große Kacheln für alle Datensätze generiert. Die Vektordaten der visuellen Interpretation mussten in einem Vorverarbeitungsschritt im Bezug auf die Versiegelung reklassifiziert und zusammengefasst werden. Dabei wurden beispielsweise alle Gewässer, verschiedene Straßentypen sowie andere Nutzungen sinnvoll zusammengefasst. Zur Unterscheidung von Vegetation und unbewachsenen Flächen ist der NDVI als zusätzlicher Layer berechnet worden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass bei der HRSC-AX die Spektralkanäle nicht untereinander kalibriert sind, was dazu führt, dass bei Verwendung der Originalwerte des Roten- bzw. NIR-Kanals der NDVI unrealistische Werte liefert. Erst bei einer Halbierung der Rot-Werte liegen die NDVI-Werte im üblichen Bereich, z.B. NDVI-Werte < 0.2 sind unbewachsen, bzw. NDVI-Werte > 0.6 sind intensiv grüne Vegetation wie z.B. Rapsfelder. In die Segmentierung /Klassifizierung konnten somit sechs spektrale Layer (R, G, B, IR, NDVI und OHM) sowie ein thematischer Layer aus der Vorinterpretation eingeführt werden.

4.2. Klassifikation und Strategie

Die Segmentierungsparameter sind iterativ empirisch bestimmt worden. In der Regel sollte ein Bild mit mehreren Scalefaktoren segmentiert werden, um den Bildgehalt in seiner hierarchischen Strukturierung gerecht zu werden. Dies war durch die Einbeziehung der visuellen Interpretation als zusätzliche Hierarchieebene im vorliegenden Fall nicht notwendig. Grundlage der Klassifikation sind die einzelnen Bildobjekte. Neben der spektralen Information verfügt jedes Objekt ebenfalls über eine umfangreiche Merkmalsstatistik, die sich aus der Form und seinen nachbarschaftlichen Beziehungen ergibt, die zur Klassifizierung hinzugezogen werden können. Um den Klassifikationsaufwand zu minimieren, wurden die Regeln für den Klassifikationsprozess bei der Verarbeitung aller Untersuchungsgebiete möglichst einfach gehalten. Bei dem Erstellen des Objektkatalogs und der Fuzzy-Logic-Regeln sind verschiedene Annahmen auf der Grundlage der visuellen Vorinterpretation getroffen worden, z.B.:

- Als bebaut versiegelte Flächen gelten Dächer und Verkehrsflächen für den ruhenden und fließenden Verkehr.
- Landwirtschaftlich genutzte Flächen, Spülfelder, Strand und Dünen sind grundsätzlich unversiegelt.
- Schatten werden der umliegenden Klasse durch eine Wahrscheinlichkeitsfunktion zugeordnet, wenn die Klassifikationsgenauigkeit einer anderen Klasse geringer ist als 30%.

Für die jeweiligen Klassen wurden repräsentative Trainingsgebiete definiert, die für die Klassifikation mit der Nearest Neighbor-Methode notwendig sind. Um Fehlklassifizierungen zu vermeiden, muss der gesamte Merkmalsraum durch Trainingsgebiete bzw. Regeln abgedeckt sein. Dieser Aspekt ist deshalb wichtig, da das Stadtgebiet nicht auf einmal klassifiziert werden konnte. Aufgrund der unterschiedlichen Radiometrie der Aufnahmen aus dem nördlichen und südlichen Teil war für die Klassifizierung der beiden Teile jeweils ein kompletter Satz neuer Trainingsgebiete notwendig. Der Objektkatalog musste iterativ ergänzt werden, um alle im urbanen Raum vorkommenden Objekte/Signaturen zu umfassen. Gleichzeitig war es notwendig, die Fuzzy-Logic Regeln für die einzelnen Kacheln um diejenigen Objekte zu ergänzen und neue Trainingsgebiete zu definieren, die speziell dort vorkommen. Das überarbeitete Regelwerk ist anschließend wieder auf die vorhergehenden Kacheln angewandt worden, um das gesamte Gebiet nach einheitlichen Regeln zu klassifizieren.

Aufgrund der unterschiedlichen Merkmalsausprägung von Dächern (rot, schwarz, grau, weiß, sonnenzugewandt, sonnenabgewandt, Flachdach, Spitzdach etc.) sind mehrere Unterklassen gebildet worden. Als besonders problematisch erwiesen sich die Dächer von Kleingartenanlagen, die sich gegenüber ihrer Umgebung im nOHM nicht abheben, d.h. Objekthöhen < 0.4 m aufweisen. Hierfür wurde eine Extraklasse eingeführt, die auch geometrische Parameter berücksichtigt, d.h. die rechtwinklige Form der Dächer und eine Dachfläche < 50 m².

4.3. Ergebnisse

Anhand einer visuellen Genauigkeitsanalyse ist eine durchschnittliche Genauigkeit von ca. 85 – 90 % für die Versiegelungsflächen erreicht worden. Dabei ist allerdings zu berücksichtigen, dass die versiegelten Flächen (Straßen, Wege, Dächer und Sportplätze) unterschiedlich gut und zuverlässig als versiegelt klassifiziert werden konnten. Z.B. ist die versiegelte Fläche der Kleingärten deutlich unterschätzt worden, da sich die gartenbaulich genutzten Parzellen spektral und durch das nOHM kaum von den Dächern unterscheiden lassen. Die Genauigkeit der Erfassung von Gebäuden wird an vielen Stellen durch die Qualität des nOHM limitiert. Die Genauigkeit des nOHM wiederum hängt maßgeblich von der Qualität des DOM ab, welches

an vielen Stellen Artefakte bzw. Fehlstellen aufweist. Ähnliche Probleme berichten z.B. auch HOFFMANN et al., 2001. Straßen und Wege konnten durchwegs mit hoher Genauigkeit als versiegelte Flächen identifiziert werden. Für die Zuweisung des Versiegelungsgrads auf die Polygone der Flächennutzungskartierung wurde im ersten Schritt für jede Kachel eine Reklassifizierung vorgenommen, die alle Klassen, die versiegelte Flächen enthalten, zusammenfasst. In einem zweiten Schritt sind durch eine Verschneidung die Flächenanteile der versiegelten Fläche je Flächennutzungspolygon berechnet und den Polygonen als zusätzliches Attribut zugewiesen worden.

5 Erstellung der Veränderungskarten und Statistiken

Bei dem Vergleich des aktuellen Datensatzes von 2002 mit den Satellitenbilddatenauswertungen von 1989 und 1995 wurde nur auf die Zunahme der baulichen Nutzung fokussiert. Im Gegensatz zur Vorläuferstudie 1997 zur Ermittlung der Realnutzung auf der Grundlage gemergter Landsat TM- und SPOT-Szenen steht 2002 eine sehr viel höher aufgelöste Datengrundlage zur Verfügung. Das hat für eine Veränderungsanalyse in mehrerer Hinsicht Konsequenzen, denn die Interpretationsschlüssel sind nicht identisch, so dass nur auf der ersten bzw. zweiten Gliederungsebene ein Vergleich durchgeführt werden kann. Bei der Interpretation der Satellitenbilder sind Verkehrswege, abgesehen von der Autobahn und großen Gleisanlagen nicht erfasst worden, da ihre Breite unterhalb der Pixelauflösung lag. Diese machen aber einen Flächenanteil von über 9 % aus. Die Mindest erfassungsgröße eines Polygons ist bei der Luftbildinterpretation um ein vielfaches kleiner als bei der Satellitenbildinterpretation. Bei der Satellitenbildinterpretation wurden z.B. die Grünanlagen rund um Gebäude und Anlagen nicht erfasst, vielmehr wurden Wohngebiete und Industrieanlagen in ihrer Gesamtheit undifferenziert digitalisiert. Dies führt zu einer wesentlichen Vergrößerung der bebauten Flächen bei der Satellitenbildinterpretation gegenüber der Luftbildinterpretation. Die Lagegenauigkeit der Digitalisierung der Satellitenbilder ist mit $\pm 20 - 30$ m wesentlich ungenauer als die Digitalisierung der Luftbilddatenaufnahme von 2002 mit ± 1 m. Aus den genannten Gründen ist für die Veränderungsanalyse der baulichen Nutzung ein Verfahren entwickelt worden, dass nach einer Flächenverschneidung die neu versiegelten Flächen identifiziert. Neu versiegelte Flächen in einem 30 m Radius um bestehende Versiegelungen wurden gefiltert und Splitterpolygone $< 100 \text{ m}^2$ eliminiert.

Damit liegt der Bestimmung der Neuversiegelung ein konservatives Verfahren zugrunde, denn die Neuversiegelung durch neu gebaute Straßen und Wege sind in der Auswertung nicht enthalten, da sie bei der Flächennutzungskartierung von 1989/'95 nicht erfasst wurden. Da bei der Satellitenbildkartierung die baulich genutzten Flächen einschließlich ihrer Umgebung flächenhaft als bebaut klassifiziert wurden, kann eine zwischenzeitliche Nachverdichtung nicht berücksichtigt werden. Der 30 m Puffer um die Polygone baulicher Nutzung der Satellitenbildkartierungen ist ein Kompromiss zwischen der Digitalisierengenauigkeit der Flächennutzungskartierung von 1989/'95, die bei der Verschneidung mit der aktuellen Kartierung zu Splitterpolygonen geführt hat und den tatsächlichen Neuversiegelungen, die oftmals an den Grenzen der vorhandenen Bebauung anschließen. Weiterhin sind die in der Luftbildkartierung 2002 als Freiflächen kartierten Bereiche (ca. 81 ha) zu berücksichtigen, die zum größten Teil Baustellen sind (z.B. Warnowtunnel) und bei einer aktuellen Versiegelungsbilanz noch berücksichtigt werden müssen. Das bedeutet, die Neuversiegelung durch städtebauliches Wachstum ist im Untersuchungszeitraum etwas größer ausgefallen, als das auf der vorhandenen Datengrundlage sicher ermittelbar ist. Die Ergebnisse sind in der Tabelle 1 für die einzelnen Nutzungsarten aufgeschlüsselt.

Tabelle 1: Zunahme baulich versiegelter Flächen zwischen 1989 und 2002

	Zunahme baulich versiegelter Flächen [ha]		
	1989 - 1995	1995-2002	1989 - 2002
Einzelhausbebauung	6,93	103,91	110,84
Reihenhausbebauung	2,79	18,04	20,83
Großblockbebauung	0,09	1,65	1,74
Mischnutzung	1,66	13,27	14,93
Industrie und Gewerbe	54,40	21,90	76,30
Kläranlage	0,82	4,17	5,00
Parkplätze	51,14	21,51	72,65
Stadtplätze	0,16	1,40	1,55
Summe	117,99	185,85	303,84

Zusammenfassend sind zwischen 1989 und 2002 zwei Phasen der Flächenversiegelung in der Hansestadt Rostock zu unterscheiden. In der ersten Phase zwischen 1989 und 1995 stand die Ausweisung und Ansiedlung von neuen Industrie- und Gewerbegebieten im Vordergrund, während sich der Eigenheimbau vornehmlich vor den Toren der Stadt abgespielt hat. In der zweiten Phase von 1995 – 2002 sind auch im Stadtgebiet größere Eigenheimsiedlungen entstanden und die Neuansiedlung von Industrie- und Gewerbegebieten ist zurückgegangen.

6 Literaturverzeichnis

- BILL, R., GRENZDÖRFFER, G., GELDNER, M. UND SCHWARZ, M. (1998): Satellitenbildgestützte Flächenbilanzierung der Hansestadt Rostock als Beitrag zum vorsorgenden Bodenschutz und zur nachhaltigen Umweltplanung. - Studie im Auftrag des Umweltamts der Hansestadt Rostock, 35 S.
- BLASCHKE, TH. [HRSG.] (2002): Fernerkundung und GIS – Neue Sensoren – Innovative Methoden.- 260 S.
- FRANZ, S. (2003): Semiautomatische Generierung digitaler Geländemodelle aus digitalen Oberflächenmodellen.- 84 S. unveröff. Dipl. Arb. HAW Hamburg, Fachbereich Geomatik
- HOFFMANN, A., VAN DER VEGT, J.W. UND LEHMANN, F. (2001): Die automatische Aktualisierung von Karten: Neue Methoden mit Daten der digitalen Kamera HRSC-A.- *Publikation der DGPF, Band 10.* (= 21. Wissenschaftlich Technische Jahrestagung der DGPF 4.- 6.9.2001, Konstanz): S. 394 - 401.
- MEINEL, G. UND HENNERSDORF, J. (2002): Erhebungsmethoden, Programme und Nomenklaturen der Flächenbedeckung und Flächennutzung. - PFG 4/2002, S. 271 – 286.
- NEUKUM, G. (2001): The airborne HRSC-AX cameras: evaluation of the technical concept and presentation of the application results after one year of operations.- In: FRITSCH, D. UND SPILLER, R. [HRSG.] (2001): Photogrammetric Week '01.- S. 117 – 130; Wichmann Verlag.
- SCHIEWE, J. (2001): Ein regionen-basiertes Verfahren zur Extraktion der Geländeoberfläche aus Digitalen Oberflächen-Modellen *PFG 2/2000*: S. 81-90.
- SPERBER, H. UND MEYER, H.H. (1989): Vorstellung eines Schemas zur Erfassung und Bewertung der Ver- und Entsigelungsintensität in Siedlungsbereichen. - Das Gartenamt, Mai 1989, S. 294 - 298.

Erfassung bergbaubedingter Veränderung von Vegetationsparametern durch Nutzung hyperspektraler Bilddaten

CHRISTIAN FISCHER¹ & ANDREAS BRUNN²

Zusammenfassung: Eine Folge untertägigen Bergbaus sind Senkungen und Bodenbewegungen an der Tagesoberfläche. Diese Veränderungen können zu einer permanenten Beeinflussung sowohl der Infrastruktur als auch der hydrologischen und ökologischen Situation führen. Um mögliche Einflüsse auf die Vegetation erkennen zu können, ist es erforderlich, Parameter zu definieren, die Veränderungen und die daraus resultierenden Einflüsse auf das Ökosystem beschreiben. Aufgrund der zu überwachenden Flächen und der oft kleinräumigen Struktur des Untersuchungsgebietes sind nur geometrisch und radiometrisch hochauflösende Daten abbildender Spektrometer in der Lage, unterschiedliche Landbedeckungsarten und deren Parameter mit hinreichender Genauigkeit zu erfassen. Es wurde untersucht, welche Parameter aus den Reflexionsspektren unterschiedlicher Pflanzenarten berechnet werden können, die eine weitergehende Beschreibung der Bestände im Hinblick auf die Erfassung der Vitalität auf unterschiedlichen Standorten erlauben.

1 Einführung

In der Bundesrepublik Deutschland unterliegen bergbauliche Vorhaben nach dem Bundesberg-Gesetz (BBergG) unter bestimmten Randbedingungen der Pflicht zur Durchführung einer Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP). Am Ende des Verfahrens steht, nach der entsprechenden Beteiligung der betroffenen Fachbehörden und der Öffentlichkeit und unter Abwägung aller Interessen die Genehmigung des beantragten Vorhabens, allerdings verbunden mit Auflagen oder Nebenbestimmungen im Rahmenbetriebsplan. Zur Einhaltung dieser Auflagen und Bestimmungen ist eine präventive und laufende Umweltüberwachung des potentiellen Einwirkungsbereichs, sowie der unbeeinflussten Flächen notwendig.

Das von der EU geförderte Projekt MINEO (IST-1999-10337, <http://www.brgm.fr/MINEO>) bot einen exzellenten Rahmen für die Entwicklung und Erforschung neuer Techniken und Methoden zur Auswertung hochauflösender Fernerkundungssensoren, um zu untersuchen, ob und wie solche Daten zukünftig im Rahmen eines abbaubegleitenden Monitorings eingesetzt werden können. Im Rahmen des Projektes wurden folgende Arbeiten durchgeführt:

1. Entwicklung eines konzeptionellen Modells zur Beschreibung und Erfassung des Zusammenhanges zwischen bergbaulichen Aktivitäten, resultierenden hydrologischen Veränderungen und ökologischen Auswirkungen.
2. Entwicklung von Methoden zur Auswertung von Fernerkundungsdaten, die eine Erfassung von Auswirkungen auf bestimmte Vegetationsarten ermöglichen.
3. Entwicklung von Parametern, die eine multitemporale Auswertung erlauben und damit die Grundlage für ein Monitoring des bergbaulichen Einwirkungsbereiches und von unbeeinflussten Vergleichsflächen bilden können.

1 Dr.-Ing. Chr. Fischer, Institut für Geotechnik und Markscheidewesen (IGMC), Technische Universität Clausthal, Erzstr. 18, D-38678 Clausthal-Zellerfeld, email: christian.fischer@tu-clausthal.de

2 Dipl.-Geogr. A. Brunn, Institut für Geotechnik und Markscheidewesen (IGMC), Technische Universität Clausthal, Erzstr. 18, D-38678 Clausthal-Zellerfeld, email: andreas.brunn@tu-clausthal.de

1.1 Bergbaubedingte Senkungen

Steinkohle liegt in Flözen von wenigen Zentimetern bis zu mehreren Metern Mächtigkeit vor und wird in Deutschland ausschließlich im Tiefbau bis zu einer Teufe von rd. 1500m abgebaut. Dabei entstehen im Gebirge Hohlräume mit mehreren Quadratkilometern Grundfläche. Bedingt durch den überlagernden Gebirgsdruck werden diese Hohlräume wieder geschlossen. Die Deformation der über den Abbauflächen liegenden Schichten setzt sich bis zur Tagesoberfläche fort und führt dort zu drei-dimensionalen Bodenbewegungen. Durch die großen Teufen, in denen der Abbau stattfindet, erstrecken sich die Gebirgsbewegungen innerhalb bestimmter Grenzwinkel trogförmig über weite Bereiche an der Tagesoberfläche. Die Form dieser Senkungsmulden hängt u. a. von der Abbauteufe, dem Einfallen und der Mächtigkeit der Flöze, sowie der Länge und Breite der Abbaufläche ab. Eine Vorausberechnung der resultierenden Bewegungen des Deckgebirges, unter Berücksichtigung des zeitlichen Verlaufs des Abbaus, erfolgt unter Berücksichtigung der jeweils aktuellen Abbauplanung. Für detaillierte Beschreibungen der Verfahren zur Senkungsberechnung, vgl. u. a. (KRATZSCH 1994, 1997).

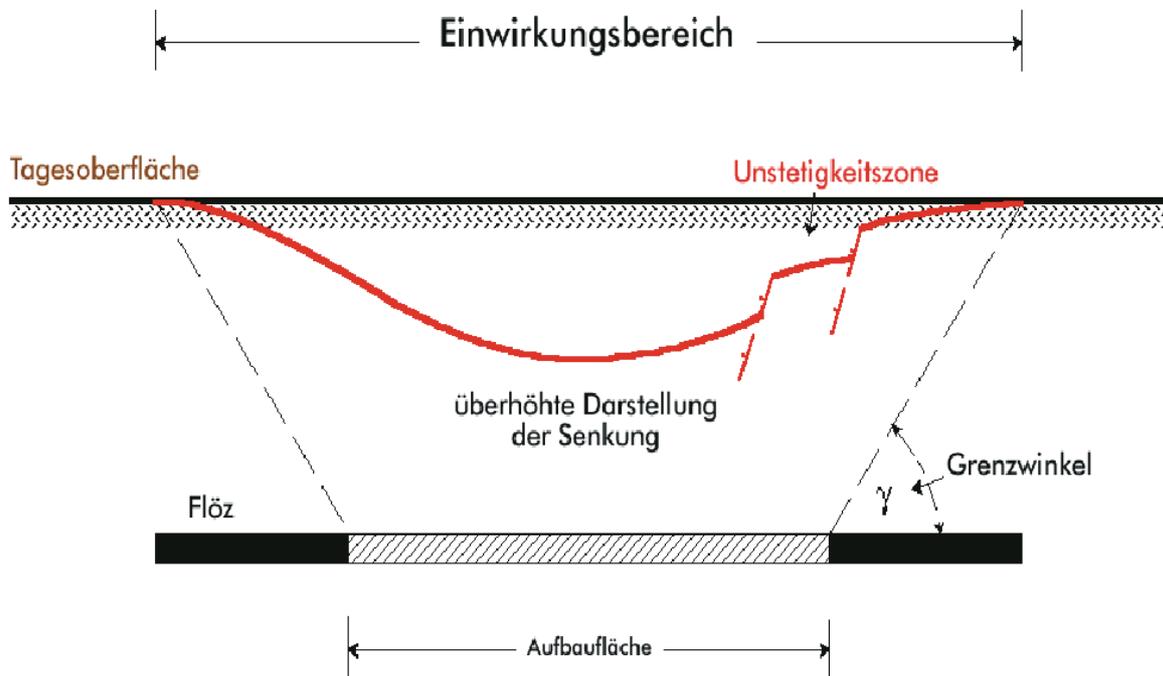


Abb. 1: Entstehung einer bergbaubedingten Senkung an der Tagesoberfläche (nicht maßstäblich).

Die Auswirkungen auf die Oberfläche setzen je nach Mächtigkeit des Deckgebirges und der Größe der abgebauten Fläche nach etwa sechs Monaten ein. Nach rund zwei Jahren sind rund 80% der maximal zu erwartenden Senkungsbeträge eingetreten, nach fünf Jahren ist der Endzustand erreicht. Im Ruhrgebiet variiert der Senkungsbetrag von einigen Metern in den älteren, südlichen Abbaubereichen bis hin zu 10 bis 15 m in den aktuellen Abbaubereichen zwischen Emscher und Lippe (WIGGERING 1993).

1.2 Hydrologische Veränderungen

Die an der Tagesoberfläche auftretenden Bodenbewegungen beeinflussen großräumig die hydrologische Situation. Sie führen zu einer flächenhaften Änderung der Raumlage und zu einer Deformation der grundwasserleitenden Schichten. Damit kommt es zu Veränderungen

der Grundwasserscheiden, der Strömungsrichtungen und der Fließgeschwindigkeiten, vgl. RÜBER (1997). Die resultierenden Auswirkungen betreffen die Abfluss-, Sedimentations- und Erosionsverhältnisse in den Fließgewässern und verändern großflächig hydrologische Parameter wie Grundwasserflurabstände und -neubildungshöhen. Diese dynamischen Vorgänge wirken dabei über den eigentlichen Einwirkungsbereich bergbaubedingter Senkungen hinaus. Bei den möglichen Auswirkungen des Bergbaus auf Natur und Landschaft, kommt damit dem Wasserhaushalt eine zentrale Rolle zu. Bergsenkungen können daher zu einer flächenhaften Veränderung der Grundwasserflurabstände führen, die über den Bodenwasserhaushalt in enger Beziehung mit der Vegetation stehen. Als Folge kann es zu einer Veränderung der Biotope kommen, unter Umständen bis hin zur Sukzession bestimmter Vegetationsformen.

2 Hyperspektrale Bilddaten

Am 24. August 2000 wurde das Untersuchungsgebiet der Deutschen Steinkohle AG mit dem flugzeuggetragenen hyperspektralen Sensor HyMap (<http://www.hyvista.com>) befliegen. Dieser Sensor zeichnet in 126 Kanälen den Wellenlängenbereich zwischen 450 und 2500 nm auf. Aufgrund der Parameter der Flugplanung wurden die Daten mit einer geometrischen Auflösung von 5 m aufgezeichnet. Die seitens des Sensorbetreibers gelieferten Rohdaten wurden einer Qualitätskontrolle unterzogen und anschließend atmosphärenkorrigiert und georeferenziert, vgl. BRUNN, FISCHER ET. AL. (2003). Während der Befliegung wurden zusätzlich im Gelände Pass- und Referenzpunkte mit Hilfe von GPS gemessen, sowie umfangreiche spektroskopische Messungen mit zwei Feldspektrometern durchgeführt.

3 Bestimmung von Vegetationsparametern

Um die Auswirkungen, hervorgerufen durch die veränderten hydrologischen Parameter erfassen zu können, wurde untersucht, mit welchen Verfahren Veränderungen in den Reflexionssignaturen unterschiedlicher Pflanzenbestände bestimmt werden können, die eine Beschreibung der untersuchten Bestände hinsichtlich der Erfassung von Anomalien ermöglichen. Daher wurden unterschiedliche Verfahren zur Parametrisierung der Reflexionsspektren genutzt. Aufgrund der Tatsache, dass verschiedene Vegetationsarten normalerweise aus weitestgehend ähnlichen chemischen Bestandteilen zusammengesetzt sind, erfordert die Auswertung von Vegetationssignaturen eine Erweiterung der Methoden, die beispielsweise auch zur Analyse und Auswertung geologischer Reflexionssignaturen angewendet werden.

3.1 Parameter des „red-edge“

Die Absorptionseigenschaften von Pflanzen werden in der Regel durch das spektrale Verhalten der photosynthetisch aktiven Blattbestandteile Chlorophyll a + b sowie β Karotin bestimmt. Während diese Substanzen im Bereich des sichtbaren Lichtes (VIS) stark absorbieren überwiegt im nahen Infrarot (NIR) die Reflexion. Diese Eigenschaft führt zu einem starken Anstieg der Reflexionskurve am Übergang zwischen dem roten und infraroten Wellenlängenbereich. Der so genannte „red-edge“ ist definiert als der Wendepunkt der Reflexionskurve im Bereich dieses Anstieges. Normalerweise liegt dieser Punkt in Wellenlängenbereichen zwischen 690 und 740 nm und wird vorwiegend durch die Interaktion zwischen den spektralen Charakteristika des Chlorophylls und den Reflexionseigenschaften der Blattoberfläche im Bereich des roten Lichtes bestimmt (CURRAN 1990). HORLER ET AL. (1980) stellten fest, dass

die Reflexionseigenschaften des Chlorophylls Indikatoren für unterschiedliche Pflanzenzustände sind.

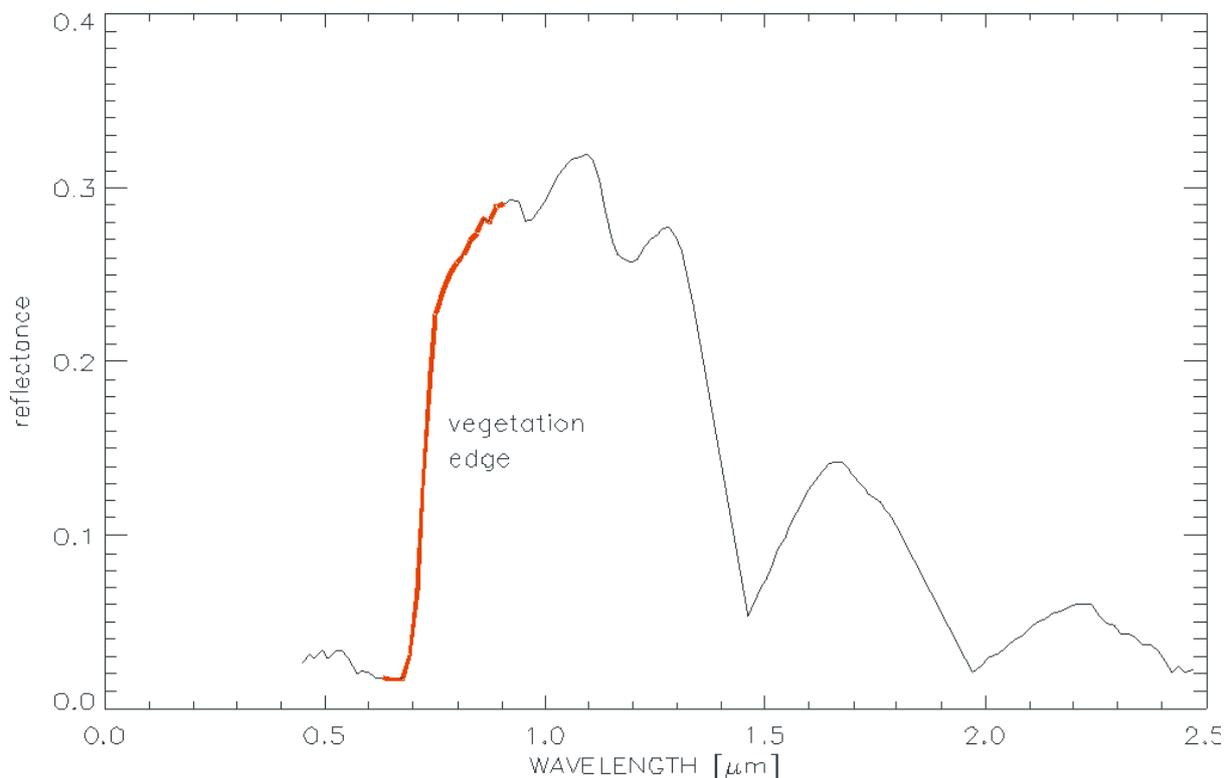


Abb.2: Typisches Pflanzenspektrum mit hervorgehobenem Bereich des „red-edge“.

HORLER ET AL. (1980) zeigten weiter, dass sich die Lage des „red-edge“ in Richtung kürzerer Wellenlängen verschiebt (sog. „blue shift“), wenn der Standort kein Optimum für die jeweilige Vegetationsart bietet. Verschiedene Untersuchungen hochauflösender Labor- und Feldspektren haben gezeigt, dass die Lage des „red-edge“ auch als ein Indikator zur Beschreibung unterschiedlicher Vegetationsarten genutzt werden kann. Solche Instrumente können allerdings den Wellenlängenbereich des „red-edge“ mit sehr hoher Auflösung erfassen, während aktuelle flugzeuggetragene hyperspektrale Sensoren diesen Wellenbereich lediglich mit nur einer vergleichsweise deutlich geringeren Anzahl an Kanälen abdecken können.

Bekanntere Verfahren zur mathematischen Approximation des Kurvenverlaufs der Spektralsignatur und zur Bestimmung des „red-edge“ nutzen höhergradige Polynomfunktionen, bzw. das Verfahren eines inversen Gauss-Modells, vgl. BONHAM-CARTER (1998). Dagegen erfolgt bei GUYOT, ET AL. (1988) die Parametrisierung der Spektralkurve durch Linearisierung. Im Rahmen dieser Auswertungen wurden die Spektralkurven durch kubische Splinefunktionen interpoliert. Es wurde jeweils die zweite Ableitung der Funktionen berechnet und anschließend die jeweilige Nullstelle durch lineare Interpolation bestimmt. Eine Interpolation unter Nutzung von Splines ermöglicht die exakte Berücksichtigung jedes gemessenen Stützpunkts der Reflexionskurve, auf diese Weise können auch subtile Veränderungen des Spektralverlaufs erfasst werden. Auf der Grundlage dieser Methode wurden die folgenden fünf spektralen Merkmale für jedes Vegetationsspektrum berechnet:

1. Wellenlänge des „red-edge“,
2. Reflexionsminimum im Bereich der Wellenlängen des roten Lichtes,

3. Wellenlänge von Punkt 2,
4. Reflexionsmaximum um 800 nm,
5. Differenz aus Punkt 3 und Punkt 1.

Insbesondere die Merkmale 1., 3. und 5. haben den Vorteil, dass sie in Einheiten der Wellenlänge gemessen werden und deshalb von eventuellen Beleuchtungs- oder Skalierungsunterschieden unabhängig sind.

3.2 Parameter des Kontinuumalgorithmus

Neben den oben beschriebenen Veränderungen, die im Bereich des „red-edge“ auftreten, zeigen Pflanzen, die einer Beeinflussung ausgesetzt sind, Veränderungen im Bereich des Reflexionsmaximums des grünen Lichtes bei 570 nm, des Absorptionsmaximums bei 680 nm und im Bereich der Infrarot-Reflexionsschultern um 750 und 1100 nm (SINGHROY, KRUSE 1991).

Der erste Schritt zur Ableitung dieser spektralen Merkmale ist die Entfernung des spektralen Kontinuums. Als spektrales Kontinuum bezeichnet man die konvexe Hüllkurve, die sich auf die Maxima der Reflexionskurve stützt. Sie beschreibt den Trendverlauf der jeweiligen Reflexionskurve. Die Division des Spektralverlaufs mit dem Kurvenverlauf des Kontinuums ergibt ein „continuum removed“ Spektrum, das auf Werte zwischen 0 und 1 skaliert ist.

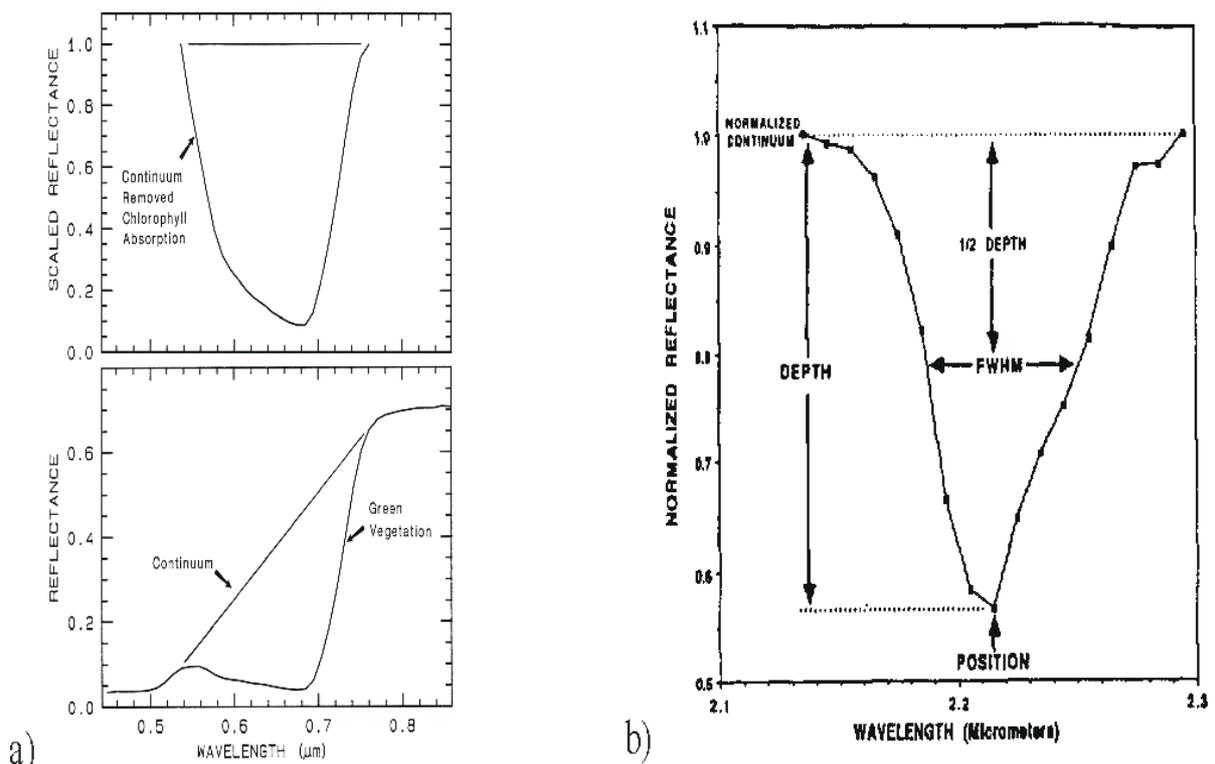


Abb.3: Prozess des continuum removal (a), Spektrale Merkmale, die aus continuum removed Spektren abgeleitet werden (Absorptionstiefe – depth, FWHM, und Wellenlänge der maximalen Absorptionstiefe (position)).

Die Hauptmerkmale, die daraus abgeleitet werden können, sind die maximale Absorptionstiefe (absorption depth) sowie die dazugehörige Wellenlänge (position), die Absorptionsbreite

bei halbem Absorptionsmaximum (FWHM) sowie ein Faktor, der die Symmetrie des jeweiligen Kurvenverlaufs beschreibt. Dieser Symmetriefaktor ist definiert als der Logarithmus des Quotienten aus der Summe der Reflexionswerte hin zu kürzeren Wellenlängen, dividiert durch die Summe der Reflexionswerte hin zu längeren Wellenlängen, bezogen auf die Lage des Absorptionsmaximums. Ein symmetrischer Kurvenverlauf erhält dabei idealerweise den Wert Null, Spektren bei denen dieses Maximum in Richtung längerer Wellenlängen verschoben ist, zeigen einen positiven Symmetriewert. Die Bestimmung dieser Merkmale an HyMap-Spektren zeigte, dass die maximale Absorptionstiefe stark abnimmt, wenn die untersuchten Reflexionsspektren Vegetationsbestände beschreiben, die von einer Veränderung der hydrologischen Situation betroffen sind.

3.3 Berechnung von Ableitungen der Spektralsignaturen

Die Analyse von berechneten Ableitungen unterschiedlicher Reflexionskurven wurde ursprünglich für spektrometrische Analysen in der analytischen Chemie entwickelt (TALSKY 1994). Der Ansatz erscheint ebenfalls viel versprechend für die Analyse hyperspektraler Fernerkundungsdaten. Die Methodik erfasst nicht nur subtile spektrale Merkmale, sondern vermindert auch Einflüsse, hervorgerufen durch atmosphärische Effekte und Beleuchtungseigenschaften. Allerdings ist diese Analyseverfahren sehr anfällig hinsichtlich des auftretenden Rauschens in den Fernerkundungsdaten.

Nicht alle Methoden, die in der Spektroskopie der analytischen Chemie angewendet werden, können direkt auf die Analyse fernerkundlicher Datensätze übertragen werden, weil es signifikante Unterschiede in der Datenbeschaffenheit gibt. Spektroskopische Daten werden in der Regel unter kontrollierten Laborbedingungen gewonnen. Dagegen erfolgt die Aufnahme von Fernerkundungsdaten unter unterschiedlichen Randbedingungen. Der wesentlichste Unterschied aber betrifft die geometrische Auflösung. Da Fernerkundungsdaten eine vergleichsweise geringe geometrische Auflösung besitzen, gibt ein Bildelement in der Regel eine Mischung mehrerer Oberflächenobjekte wieder und ein Pixel kann daher nur selten als homogen bezeichnet werden.

Zur Analyse werden die Flächeninhalte unter den jeweiligen Reflexionskurven und ihren Ableitungen berechnet. Zur Bestimmung der Ableitungen der Reflexionskurven wurden, wie in Kap. 3.1, Splines zur Interpolation der Reflexionskurven genutzt und anschließend die jeweiligen Flächeninhalte durch Integration bestimmt. Die erste Gruppe von abgeleiteten Merkmalen beschreibt den berechneten Flächeninhalt der ersten fünf Ableitungen in einem wählbaren Ausschnitt eines Wellenlängenbereichs, z.B. des für Vegetationsanalysen interessanten Bereichs zwischen 540 und 740 nm. Für die zweite Merkmalsgruppe wurden die Flächeninhalte jeweils unter der gesamten Reflexionskurve berechnet. Die Abbildung 4 zeigt die Flächeninhalte unter der Ableitungskurve im gesamten Spektrum (a) und für ein angegebenes Intervall (b).

4 Flächenhafte Erfassung spektraler Veränderungen

Weil unterschiedliche Pflanzenarten unterschiedlich empfindlich auf die Veränderungen der hydrologischen, und damit auch der resultierenden ökologischen Situation, reagieren und auch das Ausmaß der Veränderungen der Merkmale von Vegetationstyp zu Vegetationstyp unterschiedlich ist, müssen alle Arten getrennt voneinander betrachtet werden. Deshalb wurden für die Untersuchungen hier zunächst Kiefernbestände genutzt. Diese reagieren vergleichsweise sensitiv auf auftretende Veränderungen der hydrologischen Situation (Ellen-

berg, 1992) und sind im Untersuchungsgebiet auch an unterschiedlichen Lokalitäten in repräsentativem Ausmaß vorhanden.

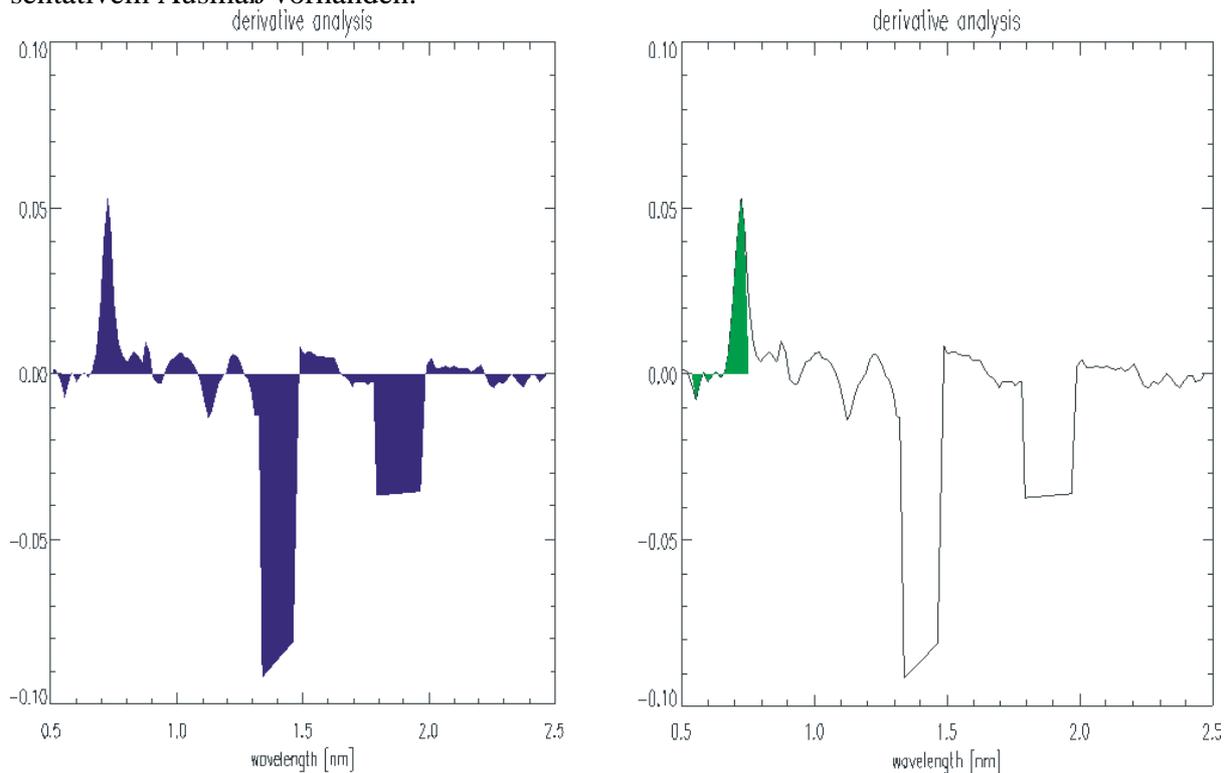


Abb. 4: Flächeninhalte unter der ersten Ableitung der Reflexionskurve, integriert über den gesamten Wellenlängenbereich (a) und im Wellenlängenbereich zwischen 540 und 740 nm (b).

Wie bereits beschrieben, drückt sich der Vitalitätszustand von Vegetation in einer Veränderung der Form der Reflexionskurve im Bereich des Überganges zwischen sichtbarem Licht und dem nahen Infrarot aus. Um diese Veränderungen zu beschreiben wurden deshalb insgesamt 18 spektrale Merkmale definiert. Diese Merkmale sind:

Absorptionsbreite bei halbem Maximum (FWHM),

1. maximale Absorptionstiefe,
2. Symmetrie,
3. Wellenlänge des „red-edge“,
4. minimale Reflexion im Bereich des roten Lichtes,
5. Wellenlänge von Punkt 5,
6. Reflexionsmaximum um 800 nm,
7. Wellenlängenbereich zwischen Punkt 4 und Punkt 5,
- 9-13. Flächeninhalte unter der ersten bis fünften Ableitung zwischen 540 und 740 nm,
- 14-18. Flächeninhalte unter der ersten bis fünften Ableitung im gesamten Wellenlängenbereich.

Die Anwendungen und Auswertungen dieser spektralen Merkmale haben gezeigt, dass sowohl die maximale Absorptionstiefe als auch die Parameter der berechneten Ableitungen auf den Waldflächen signifikant abnehmen, die durch Veränderung der hydrologischen Situation beeinflusst sind. Ebenfalls verringern sich die berechneten Werte des „red edge“. Die Abbil-

Abbildung 5 zeigt die Ergebnisse der drei Merkmale für Kiefernflächen in einem stark beeinflussten Bereich des Untersuchungsgebietes.

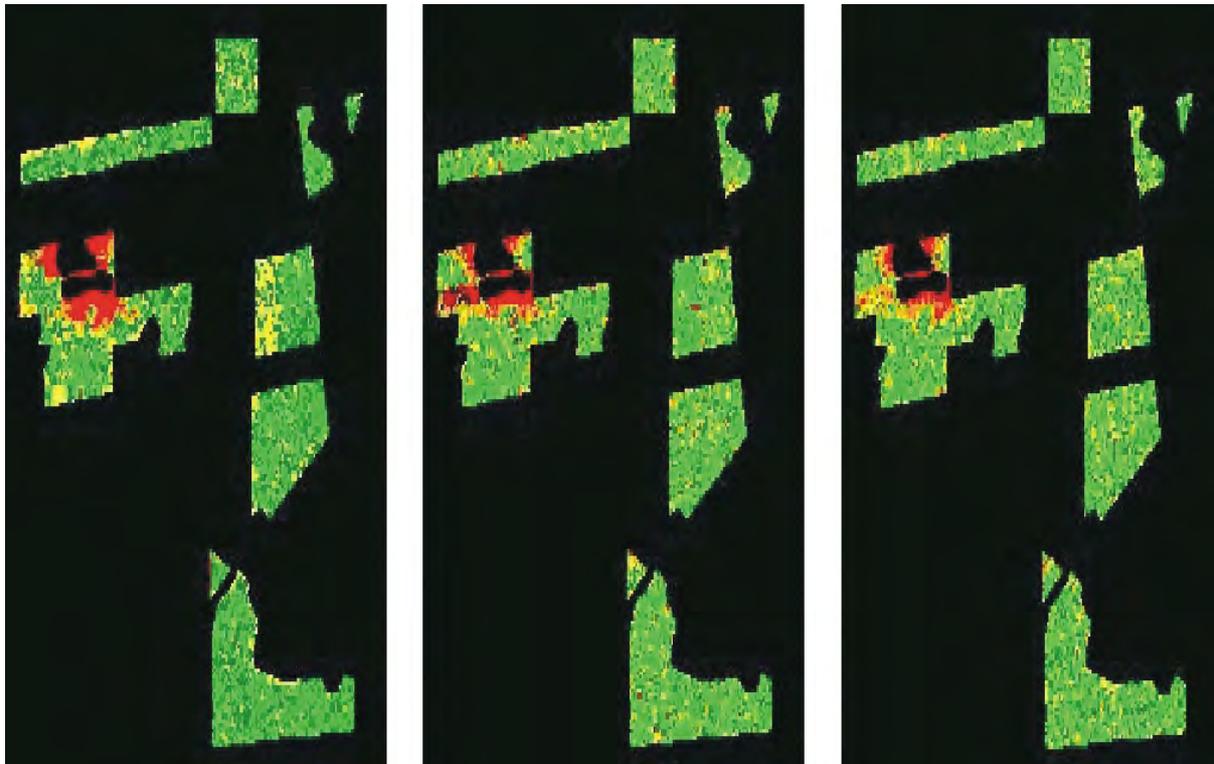


Abb. 5: Visualisierung berechneten Merkmale für Kiefernbestände in einem Teil des Untersuchungsgebietes. Links: maximale Absorptionstiefe, mitte: „red-edge“, rechts: Flächeninhalt der zweiten Ableitung zwischen 540 und 740 nm.

Die Abbildung zeigt, dass im Bereich der stärksten Senkungen auch der Pflanzenbewuchs am stärksten beeinträchtigt ist (rote Farben). Derzeit erfolgt eine weitergehende Analyse der Parameter, um eine kombinierte Auswertung von abgeleiteten Merkmalen zu ermöglichen und damit auch die Qualität und die Interpretierbarkeit der Ergebnisse zu verbessern. Das Ziel ist, beeinflusste Flächen möglichst frühzeitig erfassen und die Plausibilität der Ergebnisse steigern zu können.

5 Schlussfolgerungen

Die Ergebnisse dieser Arbeiten haben gezeigt, dass mit Hilfe hochauflösender hyperspektraler Fernerkundungsdaten in dem kleinräumig strukturiertem Untersuchungsgebiet verschiedene Vegetationsbestände erfasst werden konnten. Eine Bestimmung von Merkmalen, abgeleitet aus den Reflexionsspektren von Waldbeständen, ermöglichte zudem eine Differenzierung der betrachteten Bestände hinsichtlich ihrer Vitalität. Auftretende Veränderungen korrelieren insbesondere mit den Bereichen, für die Veränderungen der hydrologischen Situation, hervorgerufen durch Senkungen an der Tagesoberfläche, berechnet werden konnten.

Die bisherigen Ergebnisse zeigen, dass diese Methoden grundsätzlich geeignet sind, im Rahmen eines Monitorings bergbaubeeinflusster Flächen genutzt zu werden. Eine wichtige Voraussetzung dafür ist allerdings eine Akzeptanz dieser Verfahren durch die am Monitoringverfahren beteiligten Gutachter und Behörden. Zur Verbesserung und Erweiterung der vorge-

stellten Ansätze und Methoden ist geplant, eine weitere Befliegung des Untersuchungsgebietes mit einem hyperspektralen Sensor durchzuführen.

6 Danksagung

Die Autoren bedanken sich beim GFZ Potsdam für die Unterstützung und Durchführung der feldspektrometrischen Messungen. Außerdem gebührt dem MINEO-Team Dank für die umfangreichen Diskussionen zu allen Aspekten bei der Auswertung hyperspektraler Daten.

Literaturverzeichnis

- BOHNAM-CARTER, G.F., 1998: Numerical procedures and computer program for fitting an inversed gaussian model to vegetation reflectance data. *Computers & Geosciences*, Vol. 14, Nr. 3, pp. 339-356.
- BRUNN, A., FISCHER, C., E.A., 2003: Quality Assessment, Atmospheric and Geometric correction of airborne hyperspectral HyMap Data. *Proceedings of the EARSel SIG-IS Workshop, Herrsching, 13th – 16th May 2003*, in print.
- CURRAN, P., 1990: The effect of a red leaf pigment on the relationship between red edge and chlorophyll concentration. *Remote Sensing of Environment*, Vol.35, pp. 69-76.
- GUYOT, G., BARET, F., 1988: Utilisation de la haute resolution spectrale pour suivre l'état des couverts vegetaux. *Proceeding of the 4th Colloquium on Spectral Signature of Objects in Remote Sensing, Aussois, France, ESA SP- 287*, pp. 279 – 286.
- HORLER, ET AL. 1980: Effects of Heavy metals on the absorbance and reflectance spectra of plants: *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 1, pp. 121-136.
- RÜBER, O. 1997: Dreidimensionale Grundwasserströmungsmodellierung zur Beurteilung von bergsenkungsbedingten Veränderungen der Grundwassersituation im Bereich der Kirchheller Heide. In: COLDEWEY, W.G. & LÖHNERT, E.P. (Hrsg.): *Grundwasser im Ruhrgebiet - Probleme, Aufgaben, Lösungen*. GeoCongress, Loga, 1997, Köln, S. 243-248.
- SINGHROY, V.H.; KRUSE, F., 1991: Detection of metal stress in boreal forest species using the 0.67µm chlorophyll absorption band. *Proceedings of the 8th Geologic Conference - Geologic Remote Sensing*. Denver, 29th April – 2nd May, pp 361-372.
- TALSKY, G., 1994: *Derivative Spectrophotometry*, Weinheim.
- WIGGERING, H. 1993: Bergbaufolgelandschaft Ruhrgebiet: Geologische Ansätze zur Einschränkung der Auswirkungen des Steinkohlenbergbaus. In: *Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft*, Hannover, 1993, S. 295–307.

Hochwasserschutz mit SAR-Daten: Das Projekt SediSAR (Sedimentbezogene Erkundung des Deichuntergrundes zur Integrativen Stabilitätsanalyse durch Angewandte Geo- logie und Remote Sensing)

ANDREAS MÜTERTHIES¹ & OLIVER MÜLLENHOFF²

Zusammenfassung: Das vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderte und von EFTAS Fernerkundung geleitete Projekt SediSAR dient zur Erkundung der Möglichkeiten der effizienten flächendeckenden Erfassung der Deichuntergrundstabilität mit Fernerkundungsmethoden. Wie die in einem Testgebiet im Oderbruch gewonnenen Daten zeigen, eignet sich das im Rahmen von SediSAR entwickelte Verfahren zur Aufbereitung der Radardaten besonders zur Identifikation von Substratwechseln im Untergrund. Die Validierung der Fernerkundungsergebnisse und –verfahren durch verschiedene geologische Untersuchungen wurden durch das Landesamt für Geowissenschaften und Rohstoffe Brandenburg (LGRB) durchgeführt. Der Vergleich der aufbereiteten Radardaten mit Daten optischer Fernerkundungssysteme zeigt eindrucksvoll die Vorteile eines langwelligen multipolarimetrischen Radarsystems für die Erfassung von Substratwechseln im Untergrund. Die Radardaten zeigen auch in Bereichen Bodenfeuchtevariationen an, die auf einen Substratwechsel hindeuten, in denen die optischen Fernerkundungssysteme keine Informationen mehr liefern. Durch die Berücksichtigung interpretatorischen Wissens, können so frühzeitig Schwachpunkte erster Ordnung im Deichumfeld erkannt werden.

1 Einleitung

Die weltweit zunehmenden Flutkatastrophen stellen eine Herausforderung an Forschung und Technologieentwicklung dar. Diese Extremereignisse haben dramatische Folgen für Menschen und Umwelt. Die Hochwässer der Oder 1997 oder der Elbe im Sommer 2002 haben gezeigt, dass die Stabilität eines Deiches bei Hochwasser nicht nur von der Höhe seiner Krone, sondern vor allem von der Beschaffenheit des Untergrunds abhängt (BRAND & RICHTER 1998). Glazifluviatile Ablagerungen, welche den Deichuntergrund im Auenbereich prägen, zeichnen sich durch häufige Substratwechsel aus. So sind beispielsweise im Bereich verlandeter Altarme vor allem Mudden und Torfe abgelagert, welche eine geringe Baugrundstabilität aufweisen. Deichbauten welche auf diesen Substraten gegründet sind, weisen eine hohe Anfälligkeit gegenüber seitlichem Druck und Grundbruchgefahr auf.

Entsprechend wichtig ist die frühzeitige Identifikation solcher Gefährdungsbereiche. Hierzu wurde in Ergänzung zu den herkömmlichen Vor-Ortkartierungen durch geophysikalische Sondierungen erstmals in der Arbeit von KÜHN & BROSE (1998) auch die Möglichkeiten der Fernerkundung zur Detektion von baugrundbedingten Schwächezonen im Deichkörper aufgezeigt.

¹Dr. Andreas Müterthies, EFTAS Fernerkundung Technologietransfer GmbH, Ostmarkstr. 92, 48145 Münster, e-mail: andreas.mueterthies@eftas.com

²Dipl.-Geol. Oliver Müllenhoff, EFTAS Fernerkundung Technologietransfer GmbH, Ostmarkstr. 92, 48145 Münster, e-mail: oliver.muellenhoff@eftas.com

Auf den Ergebnissen dieser Untersuchung von Schwarzweiß-Luftbildern aufbauend dient das vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderte Projekt **SediSAR** zur Erkundung der Möglichkeiten der effizienten flächendeckenden Erfassung der Deichuntergrundstabilität mit Fernerkundungsmethoden. SediSAR stellt damit einen wichtigen Baustein zum Aufbau von Planungs-, Sicherungs- und Sanierungskonzepten im Rahmen eines präventiven Hochwasserschutzes in Flussgebieten dar.

Schwerpunkt der Studie ist dabei der Einsatz wetterunabhängiger Radarsensoren. Die Befliegungen des Testgebietes wurden daher mit dem flugzeuggetragenen experimentellen Synthetic Aperture Radar (E-SAR) des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR, Institut für Hochfrequenztechnik) durchgeführt. SediSAR wird von EFTAS Fernerkundung unter der Mitwirkung des Landesamtes für Geowissenschaften und Rohstoffe Brandenburg (LGRB) durchgeführt und ist derzeit weltweit das einzige Projekt, das gezielt ein Verfahren zur Erweiterung des Einsatzes von flugzeug- oder satellitengestützten Radarsensoren für den präventiven Hochwasserschutz in Flussgebieten entwickelt. Die entwickelten Verfahren sollen in einem Folgeprojekt auch für die Auswertung von satellitengestützten Radarsensordaten, wie z.B. TerraSAR-Daten (geplanter Satellitenstart 2005) angepasst werden.

2 Untersuchungsgebiet

Als Testgebiet für SediSAR wurde ein 140 km² großer Abschnitt des Oderbruches an der deutsch-polnischen Grenze bei Kietz ca. 20 km nördlich von Frankfurt/Oder ausgewählt (Abb. 2.1). Das Oderbruch erstreckt sich als glazial überprägte tektonische Senke über eine Länge von ca. 50 km. Seine durchschnittliche Breite beträgt ca. 12 km. Der heutige Verlauf des Odertals bzw. des Oderbruchs sind bereits durch das weichseleiszeitliche Thorn-Eberswälder Urstromtal vorgeprägt (WOLDSTEDT 1955). Entsprechend finden sich im Oderbruch vorwiegend fluvioglaziale Sedimentdecken. Fruchtbare Auenlehme führten bereits frühzeitig zu einer intensiven agrarischen Nutzung des Oderbruchs, die bis heute andauert.

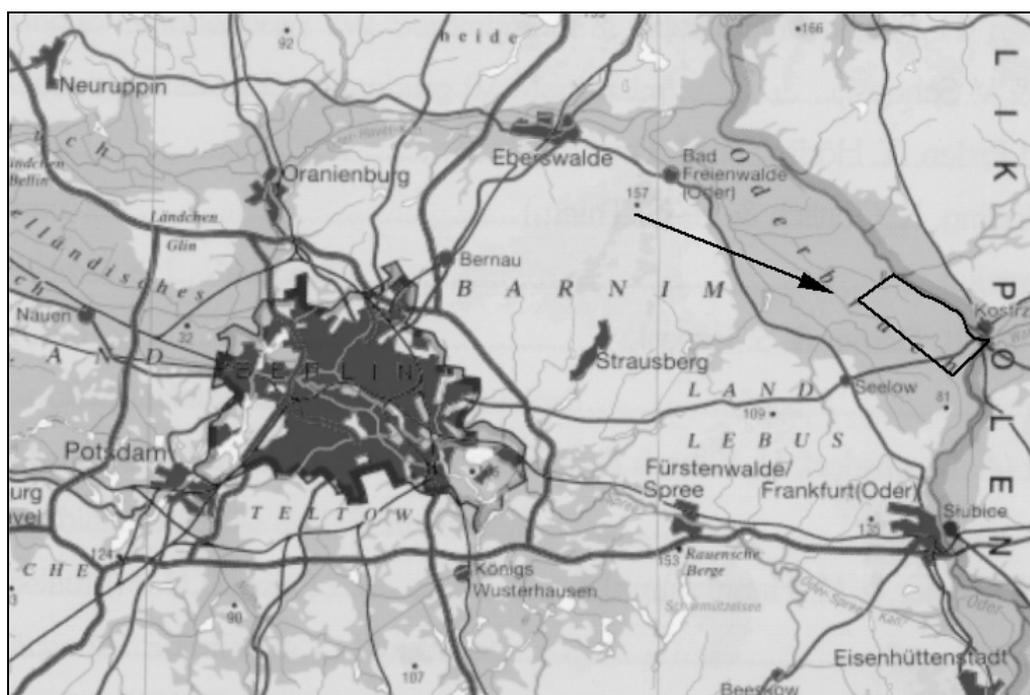


Abb. 2.1: Lage des Untersuchungsgebietes

3 Synthetic Aperture Radar (SAR)

Das Wort Radar ist abgeleitet aus dem englischen *Radio Detection and Ranging* und beschreibt die ursprüngliche Aufgabe der Lokalisierung und Entfernungsmessung von Objekten mittels Radiowellen. 1951 wurde von Carl Wiley das Abbildungsradarsystem mit synthetischer Apertur (SAR: **S**ynthetic **A**perture **R**adar) zum Patent angemeldet. Flugzeug- und satellitengestützte SAR-Systeme finden zunehmend Anwendung in der Fernerkundung. Vorteil dieses Systems ist eine wesentliche Verbesserung der geometrischen Auflösung in Azimutrichtung.

Radarsysteme arbeiten im Mikrowellenbereich mit einer Wellenlänge von 1 [m] bis 1 [mm], dies entspricht einem Frequenzbereich von 1.2 [GHz] bis 0.3 [GHz]. Im Gegensatz dazu wird der Spektralbereich des sichtbaren Lichtes durch Wellenlängen von 0.4 bis 0.7 [μm] abgebildet (z.B. durch Satellitensysteme wie Landsat, IKONOS, Quickbird). Der Spektralbereich der Mikrowellen wird in sogenannte „Bänder“ unterteilt. Ihre Bezeichnung geht auf eine ursprünglich aus Geheimhaltungsgründen gewählte Codierung zurück und findet noch heute Verwendung.

Mit abbildenden Radarsysteme (*Imaging Radar*) wird eine zweidimensionale Abbildung (CURLANDER & MCDONOUGH, 1991) des überflogenen Gebietes ermöglicht. Aus der Rückstreuung des Radarsignals können wichtige Informationen über Rauigkeit, geometrische Struktur und dielektrische Eigenschaften der Oberfläche und der unmittelbaren Bereiche unter der Oberfläche abgeleitet werden.

Der Einsatz von aktiven Mikrowellensensoren bietet gegenüber den passiven optischen Fernerkundungssystemen in bestimmten Bereichen deutliche Vorteile, die einen komplementären Einsatz der unterschiedlichen Sensoren nahe legen. Im Gegensatz zu passiven Fernerkundungsverfahren, die eine Szene durch Aufnahme des reflektierten Sonnenlichts oder der emittierten Wärmestrahlung abbilden, beleuchten Radarsysteme aktiv eine Szene und nehmen die an der Szene gestreute Strahlung auf. Die Mikrowellenfernerkundung ist damit nahezu unabhängig von Tageszeit und Wetterbedingungen. Ein zusätzlicher Informationsgewinn gegenüber den optischen Sensoren ist auf die Fähigkeit zurückzuführen, in natürliche Oberflächenmaterialien einzudringen und sie zu durchdringen sowie die Oberflächenrauigkeit und den Feuchtigkeitsgehalt des streuenden Mediums wiederzuspiegeln.



Abb. 3.1: Deichumfeld im Orthophoto von 1997.

Unter identischen Rahmenbedingungen (Einfallswinkel u. Frequenz) gilt für Radarsysteme: Je rauer die Oberfläche, desto diffuser ist die Rückstreuung bzw. je glatter die Oberfläche, desto gerichteter die Reflexion. Dabei kann eine Oberfläche, die bei kurzwelligem Radar (z.B. X-Band) rau erscheint, bei größeren Wellenlängen (z.B. P-Band) Eigenschaften einer glatten Fläche aufweisen.

Die Änderung der Dielektrizitätskonstante bei Änderung des Bodenwassergehaltes führt zu einer veränderten Rückstreuung. Dabei spielt der große Unterschied der Dielektrizitätskonstante von Wasser (80) und trockenem Boden (3-5) die entscheidende Rolle. Bei steigendem Bodenwassergehalt nimmt die Dielektrizitätskonstante zu. Die hohe Dielektrizitätskonstante von Wasser ist in der leichten Polarisierbarkeit der Wasserdipole begründet. Bei Änderung des angelegten elektrischen Feldes (Umpolung) richten sich die Dipole neu aus. Besonders die Verwendung von niedrigen Frequenzen (z.B. L- und P-Band) eignen sich, um Bodenfeuchteunterschiede zu detektieren, da die Wasserdipole genügend Zeit haben sich neu zu orientieren (anstieg der Dielektrizitätskonstante). Die Ausrichtung der Dipole ist für die Höhe der Dielektrizitätskonstante entscheidend.

Die Bindung des freien Wassers ist von der Bodentextur und Lagerungsdichte abhängig. Die freien Wassermoleküle bewirken einen immer stärkeren Anstieg der Dielektrizitätskonstante. Tonige Böden mit großer spezifischer Oberfläche binden eine größere Menge Wasser fest an der Oberfläche als sandige Böden. Im Allgemeinen gilt: je länger die Wellenlänge, je kleiner der Einfallswinkel und je trockener das Material, desto tiefer dringt die Welle in ein Medium ein (HAJNSEK, I.,1999).

4 Datengrundlage

In diesem Pilotversuch kam das flugzeuggetragenen E-SAR (**E**xperimentelle **S**ynthetic **A**perture **R**adar) des Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR, Institut für Hochfrequenztechnik) zum Einsatz. Dabei wurde das kurzwellige X-Band in horizontaler Polarisation sowie die langwelligen multipolarimetrischen L- und P-Bänder auf ihre Verwendbarkeit hin getestet. Das E-SAR ist eines der modernsten flugzeuggetragenen SAR-Systeme weltweit und dient zur SAR-Verfahrenserprobung sowie für grundsätzliche Signaturmessungen. Das E-SAR arbeitet zur Zeit im P-, L-, S-, C- und X-Band einschließlich Polarimetrie und Interferometrie (HORN, 1997). Es wurde je eine Frühjahrs- und eine Spätsommerbefliegung des Untersuchungsgebietes in 2001 und 2002 durchgeführt.

Die Validierung der Fernerkundungsergebnisse und -verfahren durch verschiedene geologische Untersuchungen (geologische Detailuntersuchungen, Schürfe und Bohrungen im Untersuchungsgebiet, boden- und geophysikalische sowie sedimentpetrographische und mineralogische Datengewinnung an Bohrproben) wurden durch das Landesamt für Geowissenschaften und Rohstoffe Brandenburg (LGRB) durchgeführt.

Zu den jeweiligen Befliegungskampagnen hat das LGRB ausgewählte Testflächen beprobt (0-4 cm und 4-8 cm) und später den Wassergehalt nach DIN 18121 bestimmt. Zusätzlich stehen ein Laserscann-DGM, Orthophotos (1997, 2001), CIR-Aufnahmen von 1997 und 2002, Grundwasserpegelmessungen sowie Witterungsdaten vom DWD (Station Manschnow) zur Verfügung. Um auszuschließen, dass es sich bei den Bereichen mit einem hohen Bodenfeuchtegehalt um Senken oder Rinnen handelt, in denen sich der Niederschlag sammelt, wur-

den die Radarergebnisse mit einem durch das Laserscann-Verfahren generierten Digitalen Geländemodell (DGM) verglichen.

5 Datenaufbereitung

Durch den Einsatz des kurzwelligen X-Bandes (3,1cm) in der horizontalen Polarisation sowie der vollpolarisierten langwelligen L- (23,5cm) und P-Bänder (68cm) standen neun Kanäle und ihre jeweiligen Rückstreuintensitäten zur Verfügung, die auf ihre Eignung zur Substratunterscheidung hin geprüft wurden:

X_{HH} , L_{HH} , L_{HV} , L_{VH} , L_{VV} , P_{HH} , P_{HV} , P_{VH} , P_{VV}

wobei $_{HH}$ die horizontale Polarisation, $_{VV}$ die vertikale Polarisation und $_{HV}$ sowie $_{VH}$ die Kreuzpolarisation beschreiben.

Die Bildverarbeitung und Auswahl von geeigneten Bilddaten für eine geologische Interpretation stellt den Bearbeiter grundsätzlich vor das Problem, subjektive und objektive Entscheidungskriterien miteinander zu verknüpfen. Die statistische Analyse der Grauwerte der Bilddaten stellt in diesem Zusammenhang eine wichtige Grundlage dar, um die visuelle Analyse und Interpretation anhand mathematischer Parameter zu stützen und zu überprüfen. Durch die Berechnung statistischer Kenngrößen können Rückschlüsse auf die Helligkeit und den Kontrastreichtum von einzelnen Kanälen gezogen werden. Zudem lässt sich mit ihrer Hilfe abschätzen, inwieweit sich Kanäle hinsichtlich ihres Informationsgehaltes gleichen. Statistische Kenngrößen wie der niedrigste bzw. höchste Grauwert einer Verteilung, ihr arithmetischer Mittelwert und ihre Standardabweichung erlauben es, die Gesamthelligkeit und den Kontrastreichtum von Einzelkanälen zu quantifizieren. Die statistische Analyse der neun Einzelkanäle hat gezeigt, dass sich die einzelnen Bänder statistisch voneinander unterscheiden. Zudem wurde deutlich, dass die beiden Kreuzpolarisationen (HV u. VH) jeweils im L- und P-Band nahezu identische statistische Parameter aufweisen. Durch die visuelle Analyse konnte dieses Ergebnis bestätigt werden. Infolge dessen wurde zur Datenreduktion auf die jeweilige Kreuzpolarisation (VH) im L- und P-Band verzichtet.

Anhand der statistischen Analyse der Grauwerte ist die Bildqualität der einzelnen Kanäle quantitativ erfassbar. Aussagen, inwieweit der spektrale Informationsgehalt zweier Kanäle miteinander korreliert und eine Datenredundanz in beiden Kanälen vorliegt, sind auf ihrer Grundlage jedoch nicht möglich. Die Korrelation der Kanäle kann als Matrix der Korrelationskoeffizienten angegeben werden. Der Korrelationskoeffizient errechnet sich aus der Kovarianz und kann Werte in einem Bereich von -1 bis $+1$ annehmen. Je stärker die Kovarianz gegen den Wert 0 strebt, desto unabhängiger ist die Information der Kanäle. Die Berechnung des Korrelationskoeffizient für die sieben verbliebenen Kanäle zeigt deutlich, dass eine geringe Korrelation zwischen dem X- und L-Band sowie zwischen dem X- und P-Band besteht. In ihnen ist somit die spektrale Variation am deutlichsten ausgeprägt. Eine starke Korrelation wird zwischen dem L- und P-Band angezeigt.

Die visuelle Analyse der sieben Einzelkanäle zeigte zudem, dass das P-Band in der Kreuzpolarisation und der vertikalen Polarisation durch starke Störungen gekennzeichnet ist und für die gegebene Fragestellung keine Informationen liefern kann. Die horizontale Polarisation des P-Bandes weist schwächere Störungen auf, so dass diese Polarisation für die weitere Analyse mit Einschränkungen genutzt werden kann. Vermutlich sind diese Störungen auf das Systemrauschen des Sensors sowie auf TV-/Mobilfunk- Sende- und Empfangsanlagen im Untersuchungsgebiet zurückzuführen.

Um dem Farbempfinden des menschlichen Auges Rechnung zu tragen und den Informationsgehalt der SAR-Daten weiter zu steigern, wurde im Rahmen der Bildverarbeitung die Generierung von Falschfarbenkompositen durchgeführt. Folgende Drei-Kanal-Kombinationen haben sich durch die statistische und visuelle Analyse für die Interpretation von Substratwechseln als besonders geeignet erwiesen:

X_{HH} , L_{HH} , P_{HH} (s. Abb. 5.1 und 5.2)

L_{VV} , L_{HV} , L_{HH}

L_{VV} , L_{HH} , L_{HV}

L_{VV} , L_{HH} , L_{HK1} (s. Abb. 5.3 und 5.4)



Abb. 5.1: E-SAR Falschfarbenkomposite X_{HH} , L_{HH} , P_{HH} (April 2001).



Abb. 5.2: E-SAR Falschfarbenkomposite X_{HH} , L_{HH} , P_{HH} (April 2002).

Die Auswertung der Daten belegt, das sich besonders das langwellige L-Band durch eine hohe Sensitivität für Bodenfeuchtevariationen, die auf einen Substratwechsel im Untergrund hindeuten, auszeichnet. Dabei unterscheidet sich das Rückstreuverhalten der Oberfläche und der oberen Bodenschichten im L_{VV} von denen im L_{HH} und L_{HV} durch eine insgesamt höhere Rückstreuung. Die vertikale Polarisation des L-Bandes zeichnet sich zudem durch einen geringeren Einfluss der Vegetation aus. Grund hierfür ist die vertikale Oberflächenstruktur der Vegetation. Sie bedingt im L_{VV} ein stärkeres Durchdringen der Vegetationsschicht und liefert mehr Informationen über dielektrische Eigenschaften des Oberbodens. Das kreuzpolarisierte L-Band zeigt eine insgesamt niedrigere Rückstreuung, da nur die depolarisierte Strahlung aufgezeichnet wird.

Um die Datenredundanz in stark korrelierten Radardaten zu reduzieren, kommt die Hauptkomponentenanalyse (HKA) zur Anwendung (s. DRURY 1993). Sie erzeugt zusätzlich einen künstlichen Datensatz, der die Reflexion aller Kanäle enthält und ermöglicht übergeordnete Rückstreuvariabilitätsmuster aus verschiedenen Kanälen abzuleiten. Die höherwertigen Hauptkomponenten zeigen dabei eine Verbesserung des Signal/Rausch-Verhältnisses sowie weiterer radiometrischer Effekte (z.B. Speckle). Die Verfahrensweise kann am Beispiel der Grauwertverteilung zweier Kanäle erläutert werden. In einem von zwei Kanälen aufgespannten Merkmalsraum streuen die Grauwerte gering entlang einer linear durch den Ursprung verlaufenden Geraden, was auf eine hohe Korrelation der Kanäle hinweist. Im ersten Schritt der HKA wird der Ursprung des Koordinatensystems durch Verschieben der Achsen an den

Punkt versetzt, an dem die Mittelwerte der beiden Kanäle definiert sind. Die Achsen werden an diesem Punkt rotiert, so dass sie mit der breitesten Streuung der Pixelwolke zusammenfallen. Die neu definierten Achsen stellen die erste bzw. zweite Hauptkomponente (HK) des Datensatzes dar. Die Grauwerte werden senkrecht auf die Hauptkomponente projiziert und auf diese Weise in dekorrelierte, neue Grauwerte überführt. Eine HKA kann analog auch für einen n -dimensionalen Raum durchgeführt werden, wobei aus den Ursprungsdaten n neu definierte HK errechnet werden. Hauptkomponenten höherer Ordnung erfassen dabei zunehmend geringere Streuungsunterschiede, die vor allem durch sensorbedingte Störungen (Rauschen) entstehen. Nach visuellen Kriterien erweist sich die 1. Hauptkomponente aus den multipolarimetrischen L-Banddaten als nützlich für die weitere Analyse der Bilddaten.



Abb. 5.3: E-SAR Falschfarbenkomposite L_{VV}, L_{HH}, L_{HK1} (April 2001).



Abb. 5.4: E-SAR Falschfarbenkomposite L_{VV}, L_{HH}, L_{HK1} (April 2002).

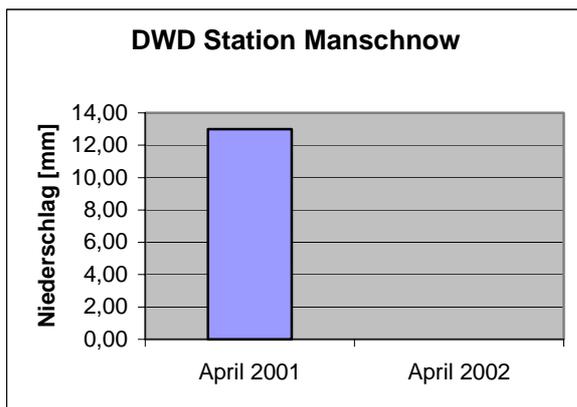


Abb. 6.1: Vergleich der Niederschlagsmengen für die Woche vor der jeweiligen Befliegungskampagne.

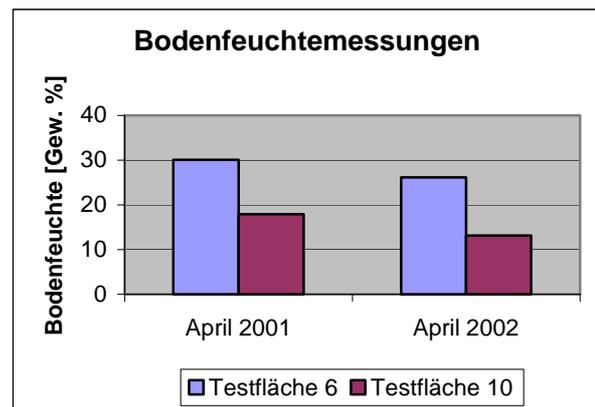


Abb. 6.2: Vergleich der Bodenfeuchtemessungen für April 2001 und 2002.

6 Korrelation von Niederschlag, Grundwasser und SAR

Der Vergleich der April-Daten von 2001 mit den April-Daten von 2002 zeigt deutlich eine leichtere Identifikation von mäanderähnlichen Strukturen in den Daten aus 2002 (vergl. Abb. 5.1 bis 5.4). Die DWD-Daten für die Woche vor der jeweiligen Befliegungskampagne weist für 2001 eine höhere Niederschlagsmenge aus, als für 2002 (s. Abb. 6.1). Dieses Ergebnis spiegelt sich auch in den Bodenfeuchtemessungen, die zu den jeweiligen Befliegungskampagnen durchgeführt wurden wieder. Für 2001 ist eine höhere Bodenfeuchte festzustellen, als für 2002 (s. Abb. 6.2). Eine Analyse der Grundwasserpegelmessungen für die Befliegungszeiträume zeigt keinen nennenswerten Unterschied des Grundwasserabstand von der Geländeoberkante, so dass eine Beeinflussung der E-SAR Daten durch Grundwasserspiegelschwankungen ausgeschlossen werden kann.

7 Schlussfolgerungen

Das dargestellte Verfahren zur Aufbereitung der Radardaten eignet sich besonders zur Identifikation von Substratwechslern im Untergrund. In den Radardaten aus den Frühjahrs- sowie den Spätsommerbefliegungen sind deutlich mäanderähnliche Strukturen zu erkennen, die auf ehemalige Flussläufe schließen lassen. Diese Strukturen werden von der amtlichen Bodenschätzungskarte (1 : 25 000) des Landes Brandenburg nicht wiedergegeben. Eine Kartierung dieser Strukturen anhand der Radardaten ist mit Hilfe einer visuellen Interpretation möglich. Durch die Berücksichtigung interpretatorischen Wissens, können so frühzeitig Schwachpunkte erster Ordnung im Deichumfeld erkannt werden.

Der Vergleich der aufbereiteten Radardaten mit Daten optischer Fernerkundungssysteme zeigt eindrucksvoll die Vorteile eines langwelligen multipolarimetrischen Radarsystems für die Erfassung von Substratwechslern im Untergrund. Die Radardaten zeigen auch in Bereichen Bodenfeuchtevariationen an, die auf einen Substratwechsel hindeuten, in denen die optischen Fernerkundungssysteme keine Informationen mehr liefern (vergl. Abb. 3.1 mit Farbabbildungen 5.1-5.4).

8. Literatur

- BRANDT, G. & RICHTER, CH., 1998: Geophysikalische Untersuchungen der Beschaffenheit der Deichanlagen und der geohydraulischen Eigenschaften des Untergrundes. – Brandenburgische Geowissenschaftliche Beiträge, 5: 43-49.
- CURLANDER, J.C. & MCDONOUGH, R.N., 1991: Synthetic Aperture Radar: Systems and Signal Processing. – New York: Wiley.
- DRURY, S.A., 1993: Image Interpretation in Geology. – 2. Aufl.- 283 S.; London (Chapman and Hall).
- HAJNSEK, I., 1999: Pilotstudie Radarbefliegung der Elbaue. – Endbericht zum Verbundvorhaben Morphodynamik der Elbe (FKZ 0339566), FU Berlin.
- HORN, R., 1997: The DLR Airborne SAR Project E-SAR. – Oberpfaffenhofen.
- KÜHN, F. & BROSE, F., 1998: Die Auswertung von Fernerkundungsdaten zur Deichzustandseinschätzung. – Brandenburgische Geowissenschaftliche Beiträge, 5: 59-63.
- WOLDSTEDT, P., 1955: Norddeutschland und angrenzende Gebiete im Eiszeitalter. Stuttgart (Koehler).

Fernerkundung auf Schutz- und Förderflächen - zwei Projekte des Bayerischen Landesamtes für Umweltschutz

MARTIN BUCERIUS¹, RAINER FUß²

Zusammenfassung: Das Landesamt für Umweltschutz ist als Brücke zwischen Theorie und Praxis bestrebt, die Leistungen moderner hochauflösender Fernerkundungssensoren unter Zugrundelegung der ökologischen Fachanforderungen auf Schutz- und Förderflächen zu erproben. Dabei wurde 2001 die satellitengestützte Erfassung der aktuellen Nutzungen bzw. Bewirtschaftungsformen und Biotop- sowie Lebensraumtypen mit 1 – 4 m Bodenauflösung auf dem Gebiet einzelner Flurkarten in Bayern untersucht. Gleichzeitig wurde im Auftrag des Bayer. Umweltministeriums die Evaluierung der Möglichkeiten und Grenzen der Fernerkundung unter den verwaltungstechnischen und fachlichen Rahmenbedingungen des Bayerischen Vertragsnaturschutzprogramms (VNP) betrieben. Dabei wurden ausgewählte VNP-Flächen auf der Grundlage der von der Landwirtschaft zur Verfügung gestellten Fernerkundungsdaten aus der KULAP-Kontrolle unter realitätsnahen Kontrollbedingungen untersucht.

1 Einführung und rechtlicher Rahmen für die beiden Projekte

1.1 Rechtsgrundlage

Das Landesamt für Umweltschutz (LfU) hat als Behörde im Geschäftsbereich des Bayer. Staatsministeriums für Landesentwicklung und Umweltfragen (StMLU) nach § 1 Ziff. 1 u. 2 der Verordnung über das LfU vom 15.12.1971, zuletzt geändert am 1.5.1994 „die Ermittlung von Grundlagen auf dem Gebiet des Umweltschutzes (§ 3)“ und „die Behandlung von Grundsatzfragen ... (§ 4)“ vorzunehmen.

Dabei sind nach § 2 Ziff. 4 „die Behandlung von Fachfragen auf den Gebieten des Naturschutzes, des Landschaftsschutzes, der Landschaftspflege ...“, durchzuführen und nach § 3 Ziff. 5 „die Erfassung und Beurteilung der geschützten und schützenswerten Landesteile“ sicherzustellen. Schließlich umfasst die a.a.O. in § 4 geregelte Behandlung von Grundsatzfragen dort in Ziff. 1 auch „die Untersuchung und Entwicklung von Systemen zur Kontrolle der Umweltbelastungen“.

1.2 Organisatorischer Rahmen

In diesem rechtlichen Rahmen sieht der Geschäftsverteilungsplan des LfU für das Referat 5/1 „Landschaftsökologie, NATURA 2000“ die Bereiche „Landesweite Landschaftsbeobachtung“ und „Anwendung der Fernerkundung“ vor.

Im Jahr 2001 wurde daher jeweils ein Projekt zur „Ermittlung und Erprobung hochauflösender Fernerkundungssensoren für naturschutzfachliche Zwecke“ mit Fa. EFTAS/Münster sowie ein Projekt zur „Kontrolle von Flächen des Vertragsnaturschutzprogrammes in Bayern mit Fernerkundung“ mit Fa. GAF/München durchgeführt.

Während der erstgenannte Auftrag in Zusammenarbeit mit LfU Ref. K7 „Flächenschutz und

¹ Dr. Ing. Martin Bucerius, Bayerisches Landesamt für Umweltschutz, Abt. 5 Naturschutz und Landschaftspflege, Bürgermeister-Ulrich-Str. 160, 86179 Augsburg, Tel. 0821/9071-5081, e-mail: martin.bucerius@lfu.bayern.de

² Dipl.-Ing. Rainer Fuß, Bayerisches Landesamt für Umweltschutz, Abt. 5 Naturschutz und Landschaftspflege, Bürgermeister-Ulrich-Str. 160, 86179 Augsburg, Tel. 0821/9071-5099, e-mail: rainer.fuss@lfu.bayern.de

Erfolgskontrollen“ abgewickelt wurde, hat das Referat 64 „Landschaftspflege, Vertragsnaturschutz“ des Bayerischen Staatsministeriums für Landesentwicklung und Umweltfragen die zweite Studie finanziert und das LfU bei der Erarbeitung fachlich begleitet.

2 Projekt zur Ermittlung und Erprobung hochauflösender Fernerkundungssensoren für naturschutzfachliche Zwecke

2.1 Aufgabenstellung

Inhalt des Auftrags war ein gebietsbezogenes Feinmonitoring für den Bereich von vier Flurkarten in Moorgebieten des Chiemgau. Das Projekt gliederte sich dabei in einen theoretischen Teil, in dem auf der Grundlage der satellitengestützten Erfassung von

- landwirtschaftlichen Nutzungen bzw. Bewirtschaftungsformen sowie
- naturschutzfachlich relevanten Biotop- und Lebensraumtypen

hochauflösende Fernerkundungssensoren bezüglich ihrer Eignung für den Themenschwerpunkt Naturschutz und Monitoring von Vegetationskomplexen bewertet wurden, sowie einen praktischen Teil, in dem diese Bewertungen für die Bearbeitung unterschiedlicher naturschutzfachlicher Fragestellungen auf Flurkartenbasis verifiziert wurden.

2.2 Bearbeitungsmethodik

Theoretischer Teil:

- Übersicht über aktuell nutzbare Satellitensysteme mit ihren jeweiligen Sensoren
- Analyse der räumlichen und zeitlichen Verfügbarkeit der Satellitensysteme für Bayern
- Gegenüberstellung von Gebietsmerkmalen des Naturschutzes für den Einsatz beim landesweiten/regionalen und beim gebietsbezogenen/örtlichen Monitoring
- Gegenüberstellung von Sensorleistungen und ökologischen Fachanforderungen

Praktischer Teil:

- Verifizierung der theoretisch abgeleiteten Sensorbewertungen für die Bearbeitung unterschiedlicher naturschutzfachlicher Fragestellungen auf Flurkartenbasis mittels einer panchromatisch geschärften 4-Kanal IKONOS-Szene:
 - o Digitale Satellitenbilddauswertung mit Entzerrung und visueller Interpretation
 - o Schärfung der 4 m Daten mit (panchromatischen) 1 m Daten
 - o Feldkontrollen mit Ermittlung der durchschnittlich zu erwartenden Trefferquoten bei der Erfassung und Interpretation der einzelnen untersuchten Bewirtschaftungsformen bzw. Biotop- und Lebensraumtypen
- Erläuterung der Klassifikationsergebnisse
- Gegenüberstellung/Darstellung der Genauigkeit unterschiedlicher Klassifikationsverfahren
- Gegenüberstellung erfassbarer Bedeckungsklassen

2.3 Ergebnisse des Projekts

Verfügbarkeit hochauflösender Fernerkundungssensoren für Bayern

Zum Zeitpunkt der Bearbeitung standen drei hochauflösende Satelliten zur Verfügung:

- IKONOS: multispektral / panchromatisch

- EROS: panchromatisch (multispektral geplant)
- CORONA: panchromatisch (histor. Analysen, 1960 – 1972)

Tab. 1: Projektverlauf tabellarisch

PROJEKTSCHRITTE	DOKUMENTATION DER ARBEITSSCHRITTE
Satellitenbild-Akquisition	Auswahl einer IKONOS-Szene in Abstimmung mit dem LfU Region Rosenheim, Hölswang; 4-Kanal IKONOS-Szene, panchrom. geschärft, 11bit, Auflösung 1m
Recherche nach Fernerkundungssystemen	Informationen von Geschäftspartnern; Produktinformationen von Ver- treibern; Umfangreiche Internetrecherche
Gliederung und Gruppierung von Vegetationseinheiten	Spektral- und Textureigenschaften von Vegetationseinheiten; Allgemein Vegetationskundliche Grundlagen; Gliederung nach FFH-Richtlinie
Zwischenbericht	Vollständige Erläuterung der Ergebnisse des theoretischen Teils
Referenzflächenerhebung	Beschreibung von ca. 200 Referenzflächen; Erfassung von 80 Referenzflächen mittels GPS
Georeferenzierung	Bild zu Bild-Entzerrung mit 4 gescannten Flurkarten (1:5.000) der IKONOS-Szene; Polynomial 2. Grades; Gauß-Krüger / Bessel Streifen 4; RMSE 0,45
Klassifikation	Unüberwachte Klassifikation der Gesamtszene; Überwachte Klassifikationen der 4 Flurkartenausschnitte
Vor-Ort-Kontrolle	Überprüfung von 270 Einzelflächen zur Kontrolle und zur Klärung von Zweifeln; Weitere Erfassung von 35 Referenzflächen mittels GPS
Auswertungen	Gegenüberstellung der Klassifikationsmethoden; Vergleich der Klassifikationsergebnisse mit Referenzlisten; Vergleich Klassifikationsergebnisse mit Zusatzinformationen; Vergleich der Ergebnisse bez. kleinräumiger / großflächiger Erfassung; Verifizierung der Genauigkeit der Klassifikationen
Schlussbericht	Zusammenfassung der Ergebnisse; Aufwandsvergleich von Fernerkundung und Felderhebung; Vorrausichtl. Aufwand für bayernweiten Einsatz; Verbesserungsmöglichkeiten

Diese geringe Zahl hochauflösender Multispektralsensoren und deren Verfügbarkeit ist derzeit (2001) der entscheidende limitierende Faktor bezüglich des Einsatzes dieser Daten. Es ist jedoch davon auszugehen, dass in den kommenden Jahren erhebliche Verbesserungen bei der Datenverfügbarkeit eintreten und mit steigenden Nutzerzahlen auch die Datenpreise sinken werden.

Klassifizierung

Bei der Gegenüberstellung von Biotopkomplexen und Lebensraumtypen auf der einen und erfassten Sensorwerten auf der anderen Seite konnte durch die Kombination verschiedener statistischer Bearbeitungsmethoden eine Anzahl von Klassen herausgearbeitet werden, die sich zum Aufnahmezeitpunkt mit hoher Genauigkeit bestimmen ließen. Bedingt durch Aufnahmezeitpunkt und Phänologie traten jedoch spektrale Überlagerungen verschiedener Vegetati-

onstypen auf. Diese konnten jedoch zum Teil durch gezieltes Festlegen von Trainingsflächen bereinigt werden, z.T. wären zusätzliche Aufnahmen zu weiteren Zeitpunkten nötig. Mit den gebildeten Vegetationsklassen, die infolge der Gebietsauswahl hauptsächlich im Bereich von Moorstandorten lagen, konnten jedoch sehr differenzierte Karten erstellt werden, die inhaltlich die Aufgliederung der Biotopkartierung übertrafen.

Tab. 2: Klassen, die bereits mit monotonaler Analyse gesichert differenziert werden konnten

Gewässer
Flachgewässer und Schwimmblattgesellschaften
Ried- und Röhrichtgesellschaften
Hochmoorgesellschaften
Moorges. mit versch. Stadien des Baumbestands
Nadelwald versch. Wuchshöhen
Mischwald
Laubwald
Jungwald und Gebüsch
Grünland mit kräftigem Aufwuchs
Grünland mit geringem Aufwuchs
Felder
Vegetationslose Flächen

Tab. 3: Auswahl von Klassen, die mit monotonaler Analyse nicht gesichert differenziert werden konnten

Fliessgewässer	kleine nur mit aufwändigen Bildverarbeitungsverfahren
Hecken / Gebüsch, Ranken / Raine	erst ab ca. 1m Breite erfassbar
Streuobst / Streuobstwiesen	schwer von anderen Obstanbauformen zu unterscheiden
Gebüsch, Aufforstungen	ohne visuelle Nachdigitalisierung starke Überlappung mit Grünland und Laubwald

Lagegenauigkeit

Die anhand der durchgeführten Klassifizierung erfolgte räumliche Abgrenzung verschiedener Vegetationseinheiten im Bereich von Moorstandorten stimmt mit der Flächenabgrenzung durch Feldbegehungen sowie den i.d.R. darauf aufbauenden vorhandenen Bestandsplänen im Maßstab 1: 5.000 in der Lagegenauigkeit meist weitgehend überein oder übertrifft sie sogar teilweise deutlich.

So waren die Grenzverläufe verschiedener Moorgesellschaften mit denen des Bestandsplans vergleichbar; Nadel- und Mischwaldkomplexe konnten in der 1-m-Klassifikation dagegen sogar genauer abgegrenzt werden, als dies im Bestandsplan der Fall war.

Damit ist sowohl die methodisch-technische als auch die sachlich-inhaltliche Voraussetzung für ein weiterführendes Monitoring solcher Moorflächen grundsätzlich nachgewiesen.

3 Projekt zu Kontrollmöglichkeiten von Flächen des Vertragsnaturschutzprogramms in Bayern mit Fernerkundung

3.1 Aufgabenstellung

Das Projekt gliederte sich in einen theoretischen und einen praktischen Teil zur testweisen Übertragung der von der Landwirtschaftsverwaltung in Bayern betriebenen Fernerkundungs-

Kontrolle von KULAP-Förderflächen auf die von der Naturschutzverwaltung geförderten VNP- und EA-Flächen.

3.2 Bearbeitungsmethodik

Theoretischer Teil:

Analyse der verwaltungstechnischen Rahmenbedingungen unter Einbezug der Vorstellungen des StMLU.

Analyse der technisch-fachlichen Aufgabenstellung in Bezug auf die VNP-Maßnahmen.

Vergleich der Aufgabenstellung VNP-InVeKoS.

Analyse der Vor-Ort-Kontrollen (VOK) im VNP-Bereich mit persönlicher Teilnahme / Analyse der Kontrollmerkmale.

Evaluierungsgespräche zur (kostenlosen) Integration der InVeKoS-Raster/Vektordaten in einem Testgebiet.

Praktischer Teil:

Technische Evaluierung der fernerkundlichen Möglichkeiten zur Kontrolle von VNP auf Grundlage zur Verfügung gestellter Daten (Raster + Vektor):

Screening

Flächengrößen

Flächenänderungen

Acker-Grünland Veränderungen

Methodische und technische Vorbereitung der Tests unter Verwendung der entsprechenden Software

Durchführung der Tests an ausgewählten VNP-Flächen auf mindestens 2 Flurkarten unter realitätsnahen Bedingungen

Tab. 4: Bilddaten aus der KULAP- Fernerkundungskontrolle 2001 (für das VNP-Projekt verwendet)

Typ	Kontrollzone „BURG“	Kontrollzone „EICH“
Satellitenbild	SPOT XI 16.02.01	SPOT XS 03.11.00
Satellitenbild	SPOT XI 30.04.2001	SPOT XI 30.04.2001
Luftbild	CIR 21.05.2001	CIR 21.05.2001
Satellitenbild	-	SPOT XI 15.06.2001
Satellitenbild	SPOT XI 27.06.2001	SPOT XS 05.07.2001

Für die Fernerkundungskontrolle der Vertragsnaturschutzflächen des VNP-Projekts wurden dabei aus methodischen Gründen der Vergleichbarkeit sowohl die gleichen Fernerkundungsdaten (vgl. Tab. 2 oben) als auch die gleiche Auswertungsmethodik (vgl. Abb. 1 unten) wie bei der KULAP-Fernerkundungskontrolle 2001 auf den Landwirtschaftsflächen in Bayern verwendet.

3.3 Ergebnisse des Projekts

Bei der Untersuchung der Übertragbarkeit der bestehenden KULAP-Fernerkundungskontrollen für Zwecke der VNP-Vor-Ort-Kontrollen konnten auf etwa 30% der Flächen sowohl die VNP-Haupt- als auch die Nebenmaßnahmen aus der Sicht der Fernerkundung mit dem für die KULAP-Kontrolle entwickelten Fernerkundungssystem der Fa. GAF sicher erkannt und kontrolliert werden.

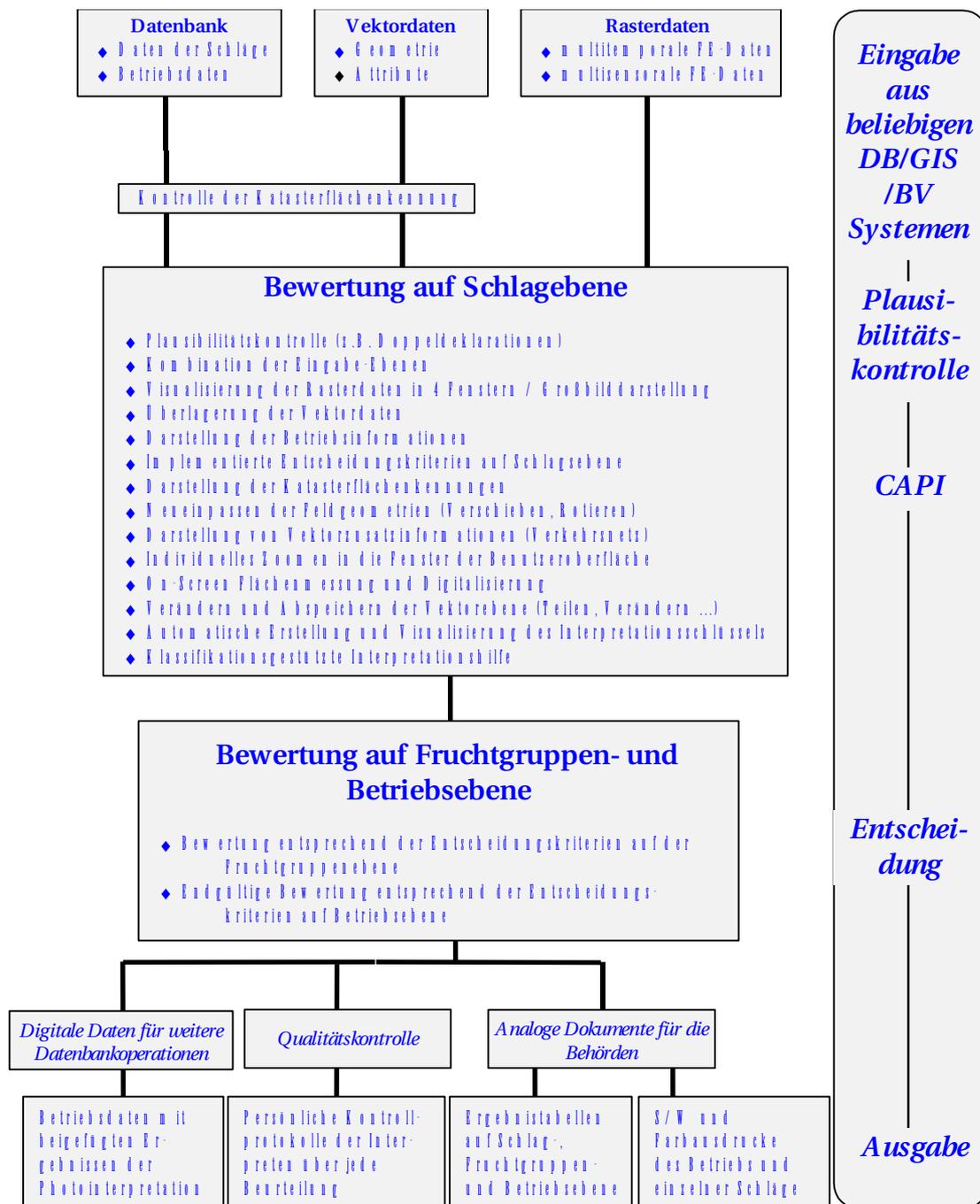


Abb. 1: Arbeitsablauf d. KULAP-Fernerkundungskontrolle mit GAF- Interpretationssoftware- ZEUS

Dabei haben sich drei Problembereiche abgezeichnet:

Zeitliche Problemdimension

- Mehrjährige VNP-Vertragsabläufe verlangen andere Kontrollmechanismen als die streng auf das einzelne Wirtschaftsjahr bezogenen KULAP-Kontrollen.
- Viele VNP-Maßnahmen weisen tagesbezogene Kontrollerfordernisse auf (Mahdtermine), während KULAP-Flächen (Feldfrüchte) sich kontinuierlich entwickeln, und deswegen stichprobenweise ohne exakten Datumsbezug ausreichend kontrolliert werden können.

Räumliche Problemdimension

- Die geringere Lagedichte der VNP-Flächen gegenüber den KULAP-Flächen würde zumindest eine Erweiterung der Kontrollzonen um das 3fache auf etwa 10% der Landesfläche in Bayern erfordern, um die 5% Prüfvorgabe der EU mit rund 12.000 VNP-Flächen pro Jahr zu erreichen. Entsprechend würden sich die Fernerkundungsaufwendungen für VNP gegenüber KULAP erheblich erhöhen.
- Gegenüber der KULAP-Schlagflächenerfassung sind im VNP-Bereich viele Teilflächen und Teilflurstücke zu beachten.

Probleme bezüglich der VNP-Prüfinhalte

- Hohe Differenzierung der VNP-Maßnahmen erschwert den Einsatz pauschal wirkender Kontrollinstrumente, z.B. Wechsel zwischen Mahd und Brache. Deswegen können nur ca. 30% der VNP-Flächen (s.o.) mit Fernerkundung hinreichend genau bearbeitet werden.
- Viele VNP-Maßnahmen entziehen sich grundsätzlich einer Fernerkundungskontrolle, z.B. können Hinweise im Bewuchs, die auf einen Düngereinsatz schließen lassen, ihre Ursache auch in unterschiedlichen Wasser- und Bodenverhältnissen haben.
- Im Naturschutzbereich fehlt sowohl die bei der Landwirtschaft übliche Büro-GIS-Ausstattung (LaFIS), als auch „schnelle Feldteams“ mit mobiler GIS-Ausstattung.

Die bereits hohe Quote von 30% Erfolg bei der Kontrolle von VNP-Flächen mit dem KULAP-Kontrollsystem der Fa. GAF könnte durch raum-, zeit- und inhaltsbezogene Optimierungen im gesamten Vertragsnaturschutzprogramm erheblich gesteigert werden.

Dazu müsste jedoch auch ein neu konzipiertes, GIS-basiertes Kontrollsystems entwickelt und eingesetzt oder ein solches bereits bestehendes System genutzt werden (vgl. Fußnote).

4 Ausblick

4.1 Einsatz hochauflösender Fernerkundungssensoren im Naturschutz

Die positiven Ergebnisse bzgl. Klassifizierung und Lagegenauigkeit kombiniert mit der schnellen und regelmäßigen Aktualisierbarkeit von Nutzungs- und Biotoptypen legen die Erwartung nahe, aufwändige Geländekartierungen in Zukunft durch die Unterstützung von hochauflösenden Satelliten zu erleichtern, zu verbessern und zu aktualisieren, oder langfristig sogar zumindest teilweise zu ersetzen. Dies erfordert jedoch

- die Wahl des für die Fragestellung optimalen Aufnahmezeitpunktes und
- gezielte Fragestellungen nach konkreten Monitoringaspekten in der Landschaft sowie
- bei fachlich abgestimmten Fragestellungen die Durchführung multitemporaler Analysen mit ggf. weiteren Informationen (Kartierungen, Bodendaten o.a.).

Zudem muss berücksichtigt werden, dass die hier angewandte und zu detaillierten Ergebnissen führende Vorgehensweise derzeit für einen bayernweiten Einsatz aus Gründen der hohen Datenkosten für solche Fernerkundungssensoren derzeit noch nicht denkbar ist.

Vgl. EU-Verordnung (EG) Nr. 1593/00 der Kommission vom 17. Juli 2000 zur Änderung der VO (EWG) 3508/92 (Abl.Nr. L182/4) vom 21.07.2000 für die flächendeckende Einführung eines InVeKos-GIS in allen EU-Mitgliedstaaten bis 1.1.2005

4.2 Einsatz von Fernerkundungskontrollen auf Vertragsnaturschutzflächen

Das Projekt zur Kontrolle von Vertragsnaturschutzflächen hat zu folgenden drei Kernaussagen zum Einsatz der Fernerkundung geführt:

- Mindestens 30% der VNP-Förderflächen könnten in Haupt- und Nebenmaßnahmen mit dem für die KULAP-Kontrolle entwickelten Fernerkundungssystem der Fa. GAF erfolgreich kontrolliert werden.
- Diese Fernerkundungsleistung könnte durch raum-, zeit- und inhaltsbezogene Optimierungen im gesamten Vertragsnaturschutzprogramm weiter gesteigert werden.
- Diese Leistungen der Fernerkundung können nur im Rahmen eines neu konzipierten, GIS-basierten Kontrollsystems rationell erbracht werden.

Die Kalkulation der in Bayern für die VNP-Kontrolle sinnvollerweise einzubringenden Fernerkundungsleistungen kann jedoch erst dann erfolgen, wenn aus fachlicher Sicht über die ermittelten Optimierungsbedingungen hinaus über einen wirtschaftlich sinnvollen Fernerkundungseinsatz grundsätzlich entschieden worden ist.

4.3 Möglichkeiten und Grenzen der Fernerkundung im Naturschutz

Insgesamt gesehen erlauben die in den beiden Projekten erarbeiteten Ergebnisse den Schluss, dass der Einsatz moderner Fernerkundungssensoren für landschaftsökologische Fragestellungen und Monitoringaufgaben

- fallweise zu erheblichen inhaltlichen Verbesserungen auf bestehenden Kartierflächen führen kann und
- in der Regel Rationalisierungsvorteile bei der Bearbeitung großflächiger Aufgabenstellungen im Bereich fernerkundungsgerechter Biotop- und Lebensraumtypen erbringt sowie
- eine wirklichkeitsnahe und zugleich ortstreue Grundlage für die Zusammenführung von Monitoringdaten unterschiedlicher Datenerfassungssysteme - seien es nun Satelliten, Flugzeugscanner und Digitalkameras oder GPS-Kartiersysteme - schaffen kann.

Aus methodischer Sicht ist daher in einem Flächenstaat wie Bayern mit über 70.000 km² zu erwarten, dass die Fernerkundung in der Landschaftsökologie zunehmend an Bedeutung gewinnen wird.

5 Literatur

- ALBERTZ, J., 2001: Einführung in die Fernerkundung. Grundlagen der Interpretation von Luft- und Satellitenbildern. 2. Aufl. 249 S. Wiss. Buchgemeinschaft, Darmstadt
- BUCERIUS, M., LEISER, M., 1994: Satellitenbildeinsatz zur ökologischen Langzeitbeobachtung in Bayern - Berichte aus dem Bayerischen Landesamt für Umweltschutz (6) Schriftenreihe **126**: S. 57-67 sowie 19 Abb. S. 200 – 205, München
- BUCERIUS, M., WÖLFL, E., 1996: Fernerkundungsmethoden für Aufgaben des Naturschutzes - Berichte aus dem Bayerischen Landesamt für Umweltschutz (7) Schriftenreihe **132**: S. 117-130, München
- BUNDESAMT FÜR NATURSCHUTZ (Hrsg), GLÄSSER, C. (Bearb.), 2001: Naturschutz und Fernerkundung – Referate der gleichnamigen Tagung der DGPF und des BfN 11.-12. Mai 2000, INA, Insel Vilm, BfN-Skripten **42** 119 S., Bonn

- KONECNY, G., 1995: Hochauflösende Fernerkundungssensoren für kartographische Anwendungen – B. 4 Vorträge zur 15. Wissenschaftlich-Technischen Jahrestagung der DGPF am 4.-6.10.1995 Universität Hannover
- RELIN, A., 1996: Kontrolle flächengestützter Beihilfen in der Landwirtschaft durch Satellitenfernerkundung – Bd. 8 Schriftenreihe d. Zentralstelle f. Agrardokumentation und Information „Informationsmanagement in den Agrarwissenschaften“ Bonn

Erfahrungen und Ergebnisse bei der Operationalisierung von Prozessschritten für die Verarbeitung von SAR-Daten

HORST WEICHEL¹, FRANK LÜNSMANN²

Zusammenfassung: Für die Entwicklung operationeller Prozessketten zur Verarbeitung von TerraSAR – Daten waren zunächst die Eigenschaften und Parameter zu definieren, die für den jeweiligen einzelnen Bearbeitungsschritt bedeutsam sind sowie die Parameter und Formate, die bei der Verkettung der Prozessschritte jeweils übernommen und übergeben werden (Schnittstellendefinition). Auf der Basis dieser Untersuchung und der dabei getroffenen Festlegungen konnte jeweils eine vereinheitlichte Prozesskette für die Datenvorverarbeitung und die Segmentierung entwickelt werden.

Die in der ersten Projektphase entwickelten Lösungen für die Vorverarbeitung und auch für die Segmentierung waren zum großen Teil noch mit einem sehr hohen manuellen Aufwand und sehr unflexiblen Arbeitsschritten auf der Basis verschiedener Einzelprogramme verbunden. Deshalb wurde für die gegenwärtige zweite Projektphase der Schwerpunkt auf die Operationalisierung der Prozessketten gelegt. Gegenwärtig ist die konzeptionelle Phase dieser Projektarbeiten abgeschlossen und die Entwicklung der einzelnen Module für die Prozesskette hat begonnen.

1 Problemstellung

Im Rahmen der ProSmart – Initiative werden im Zusammenhang mit der Vorbereitung der europäischen TerraSAR Mission zur Bereitstellung hochauflösender multipolarisierter SAR – Fernerkundungsdaten im X- und L-Band auch die Methoden und Verfahren zur Verarbeitung und Analyse dieser Daten, untersucht und entwickelt. Dazu werden in verschiedenen vom DLR geförderten Forschungsprojekten, die in der gegenwärtigen Phase unter der Projektbezeichnung ProSmart II E laufen und durch die Infoterra GmbH koordiniert werden, entsprechende Demonstrationsbeispiele für Schlüsselanwendungen der TerraSAR – Daten erstellt. Neben der Demonstration der Machbarkeit für den jeweiligen Anwendungsbereich und der Untersuchung der dabei erreichbaren Aussagequalität, z.B. in Bezug auf Genauigkeit, Auflösung und Detailtiefe, geht es in diesen Projekten vorrangig auch um die Entwicklung von modular aufgebauten Prozessketten zur Verarbeitung der SAR-Daten, auf deren Basis dann eine möglichst weitgehende Operationalisierung der SAR-Datenverarbeitung erreicht werden kann.

Ausgangspunkt der Verarbeitungsketten sind dabei die vom Datenprovider bereitgestellten Standarddatenprodukte wie Multi-Look Detected Data oder Single-Look Complex Data. Als zusätzliche Informationsquellen sollte auch die Integration von aufgaben- und nutzerspezifischen Daten aus verschiedenen Quellen, z.B. öffentlichen Datenbanken und Informationssystemen oder auch vom Nutzer betriebenen und für die Aufgabe speziell bereitgestellten Datenbeständen vorgesehen werden.

¹ Dr. Horst Weichelt, ILV-Fernerkundung GmbH, Warthestr. 20, 14478 Teltow, Tel.: 03328 330 66 15, e-mail:ilv-fernerkundung@t-online.de

² Frank Lünsmann, DELPHI IMM GmbH, Dennis-Gabor-Str. 2, 14469 Potsdam, Tel.: 0331 6200026, e-mail: frank.luensmann@DELPHI IMM-imm.de

2 Konzeption einer Prozesskette zur SAR-Datenvorverarbeitung

Der technologische Ablauf der Prozessierung wurde dazu in Form von Prozessketten entworfen, die den Zusammenhang und die Abfolge der einzelnen Prozess- bzw. Verarbeitungsschritte zeigen. Ein Beispiel für eine solche Prozesskette für den Abschnitt ‚Datenvorverarbeitung‘ zeigt Abbildung 1.

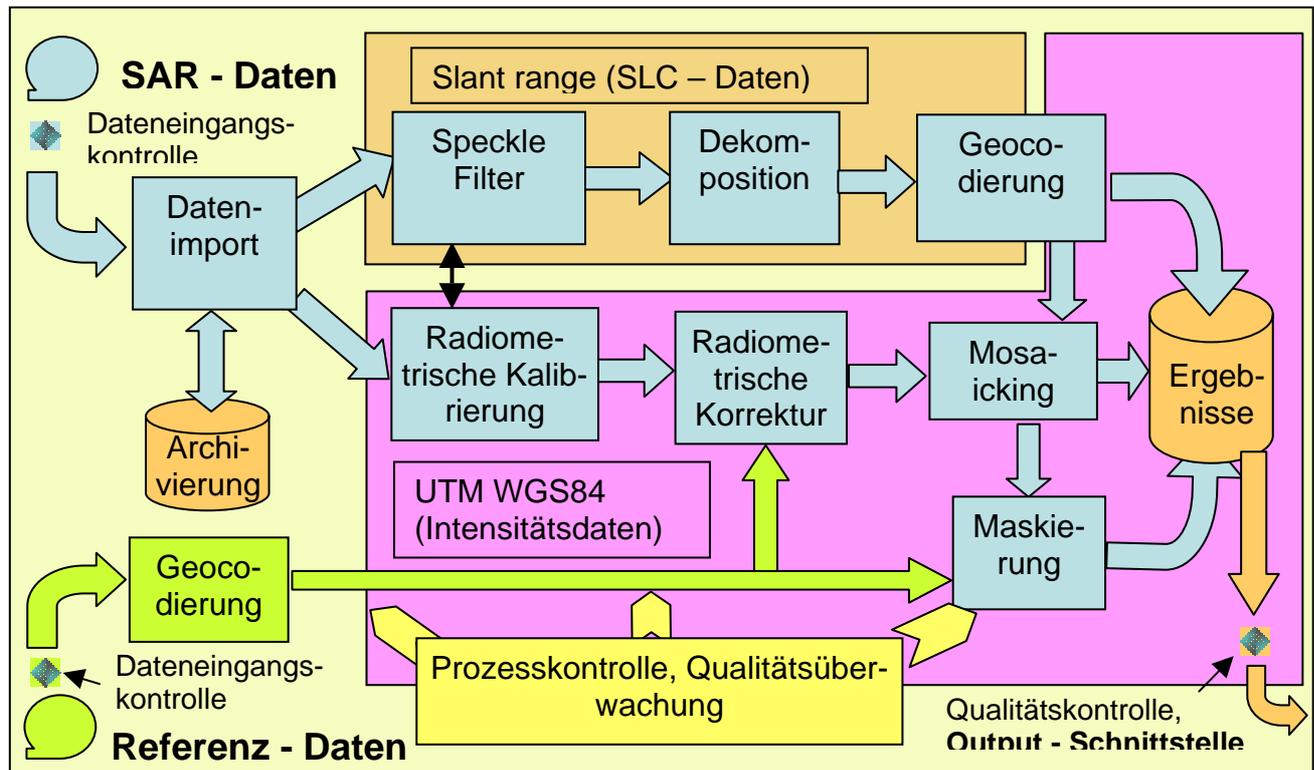


Abb. 1: Prozesskette für die Vorverarbeitung von TerraSAR - Fernerkundungsdaten

Diese hier gezeigte Prozesskette, die, genauso wie auch die in einem folgenden Abschnitt vorgestellte Prozesskette zur Segmentierung, in ihrer Konzeption unter Einbeziehung der Erfahrungen und entsprechender Inputs aller beteiligten ProSmart – Partner entwickelt wurde, schließt im gegenwärtigen Vorschlag sowohl die Vorverarbeitung von komplexen multipolarisierten Daten (Dekomposition) als auch von Intensitätsdaten mit ein. Bei letzteren werden die verschiedenen Polarisierungen dann lediglich als getrennte Informationskanäle eines SAR-Bandes betrachtet. Die generelle Zielstellung hierbei besteht darin, optimale und vor allem vergleichbare Eingangsdaten für die weitere Verarbeitung, d.h. für die Auswertung und Extraktion der in den Daten enthaltenen Information, bereitzustellen. Insbesondere bei der für viele konkrete Aufgaben notwendigen multi-temporalen Datenanalyse muss die Vergleichbarkeit der Ausgangsdaten gesichert sein. Im Folgenden konzentrieren sich die weiteren Ausführungen auf den Verarbeitungszweig für die Vorverarbeitung der Intensitätsdaten.

In diesem Vorverarbeitungszweig werden 4 Prozessschritte durchlaufen. Die Prozesskette beginnt mit dem Datenimport, bei dem die Formatkonvertierungen, Initialisierung der Datenbeschreibungsfiler und Generierung bzw. Zuweisung der File-Namen, Herstellung der Geocodierung, Layer-stack für die Polarisierungsebenen und ggf. die Anlage einer Archivie-

rungs- bzw. Sicherungskopie erfolgen. Nach dem Datenimport erfolgt eine radiometrische Kalibrierung, bei der in Abhängigkeit von der Aufgabenstellung die jeweilige Anpassung des Datenbereiches, die Umwandlung in relative Intensitätswerte oder die Berechnung von Rückstreuoeffizienten in einem logarithmischen Wertebereich (dB) vorgenommen werden. Im Gegensatz dazu erfolgt bei der radiometrischen Korrektur eine Untersuchung des Datensatzes auf radiometrische Störungen und Fehler und ggf. deren Eliminierung oder Reduzierung. Tabelle 1 zeigt die Prozessschritte in den jeweiligen Arbeitsblöcken.

Ein generelles Problem bei der Konzipierung und Erstellung von Prozessketten und insbesondere deren Operationalisierung ist die Definition und Implementierung der erforderlichen Schnittstellen sowohl zwischen den einzelnen Prozessschritten als auch zur Prozesssteuerung und zur Qualitätsbewertung und -kontrolle. Für die in diesem Projekt erstellten Prozessketten wurden, um eine schnelle und günstige Realisierung zu ermöglichen, die einzelnen Programmteile in ein ERDAS – Imagine – Testbed integriert, wodurch die Schnittstellendefinition durch die Vorgaben und Bedingungen der ERDAS – Programmierschriften festgelegt wurden. Damit wurde gleichzeitig gewährleistet, dass die Daten- und Parameterübergabe zwischen den Prozessschritten reibungslos funktioniert. Allerdings waren damit auch bestimmte Einschränkungen und Restriktionen verbunden, die z.B. daraus resultieren, dass im wesentlichen auf die in ERDAS – Imagine implementierten Bearbeitungsfunktionen aufgesetzt wurde.

3 Realisierung der Prozesskette zur SAR - Datenvorverarbeitung

Die in der ersten Projektphase entwickelten Lösungen für die Vorverarbeitung waren noch mit einem sehr hohen manuellen Aufwand und sehr unflexiblen Arbeitsschritten auf der Basis verschiedener, nicht kompatibler Einzelprogramme verbunden. Deshalb wurde für die gegenwärtige zweite Projektphase der Schwerpunkt auf die Operationalisierung der Vorverarbeitungsprozesskette gelegt. Dazu gehören insbesondere:

- Vereinheitlichung der bisher auf einzelne konkrete Datensätze ausgelegten Arbeitsschritte.
- Konzeption einer vereinheitlichten Prozesskette für die Vorverarbeitung.
- Definition der Schnittstellen zwischen den Prozessmodulen.
- Entwicklung von Prozessmodulen entsprechend den Anforderungen der vereinheitlichten Prozesskette.
- Definition und Entwicklung von Prüf- und Bewertungsmodulen für die Prozesskette.
- Test und Qualitätsbewertung der entwickelten Prozesskette.

Die Entwicklung der einzelnen Module für die Prozesskette ist gegenwärtig in vollem Gange und hat für die einzelnen Prozessschritte der Vorverarbeitung einen unterschiedlichen Stand erreicht. Dabei muss berücksichtigt werden, dass für die verschiedenen Arbeitsschritte jeweils ein unterschiedlicher Aufwand für die Realisierung erforderlich ist. So genügen für einzelne Arbeitsschritte einfache Batch – Anweisungen, die entweder in der Testbed – Umgebung implementiert oder durch eine übergeordnete Prozesssteuerung kontrolliert werden; für andere Arbeitsschritte ist dagegen eine umfangreichere Programmierung mit interaktiven Einflussmöglichkeiten, z.B. Parametereingaben durch einen Operator, erforderlich. Zu letzteren gehört z.B. auch der Prozessabschnitt ‚Radiometrische Korrektur‘, bei dem der komplette Prozessablauf in ein entsprechendes ERDAS – Imagine – Programm eingebettet

wurde. Die Eingabe der erforderlichen Parameter erfolgt über ein für ERDAS typisches Eingabefenster (Abb. 2).

Tab. 1: Prozessschritte für die Bearbeitung der SAR – Intensitätsdaten in der Prozesskette zur TerraSAR – Datenvorverarbeitung

Arbeitsabschnitt	Nr.	Prozessschritt
SAR – Daten - Vorverarbeitung	1.	<i>Einlesen vom Datenträger – Abspeichern als binäres Datenfile</i>
	2.	<i>Import als ‚Generic Binary‘ in ERDAS IMAGINE,</i>
	3.	<i>Horizontale Spiegelung, Zuweisung der Eckpunktkoordinaten,</i>
	4.	<i>Ggf. Addition/Mittelung der Kreuzpolarisationslayer, Layer-Stack der Polarisationssebenen</i>
	5.	<i>Benennung (Namenskonvention) und Speicherung,</i>
	6.	<i>Initialisierung des Beschreibungs- und/oder des History - Files</i>
	7.	<i>Archivierung.</i>
Radiometrische Kalibrierung	1.	<i>Bereitstellung von Intensitäten und/oder logarithmierter (S0) Werte:</i> <ul style="list-style-type: none"> • <i>Sigma-0 Kalibrierung auf der Basis der Incidence Angle Map oder mit konstantem Einfallswinkel (z.B. 35°)</i> • <i>Interaktive relative Skalierung zur Begrenzung des Grauwertspektrums (Delphi IMM, IT),</i>
	2.	<i>Interaktive Festlegung der Datentypen</i>
	3.	<i>Test bzw. Filterung für Ausreißer,</i>
	4.	<i>Qualitätskontrolle</i>
Radiometrische Korrektur	1.	<i>Zerlegung der Flugstreifen in Gebiete, für die jeweils eine Korrekturfunktion zu bestimmen ist (z.B. objektabhängig)</i>
	2.	<i>Bestimmung der ortsabhängigen Störfunktion getrennt für die einzelnen Gebiete</i>
	3.	<i>Berechnung von Korrekturfaktoren aus den ermittelten Störwerten</i>
	4.	<i>Durchführung der Korrektur mittels eines entwickelten ERDAS-Imagine Modellprogramms</i>
	5.	<i>Überprüfung der Ergebnisse und Qualitätskontrolle, Ermittlung der Restabweichungen</i>

4 Konzeption einer Prozesskette zur SAR-Segmentierung

Die präsentierte Prozesskette zur SAR-Daten-Segmentierung (Objektgenerierung) umfasst zum aktuellen Zeitpunkt alle funktionalen Methoden und Verfahren, die für eine weitestgehend operationelle Auswertung von SAR-Daten notwendig sind. Sie stellt, genau wie die Prozesskette zur Datenvorverarbeitung, einen Teil des komplexeren Gesamtauswerteprozesses dar. Das Ziel in diesem Teilprozess ist dabei, eine möglichst umfassende Methodik zur Objektgenerierung zu implementieren, die alle Anforderungen hinsichtlich einer themati-

schen Auswertung von SAR-Daten umfasst (s. Tab. 2). Die Aspekte Standardisierung, Nachvollziehbarkeit, Automatisierung, Übertragbarkeit stellen dabei zentrale Punkte der Konzeption und der Realisierung dar.

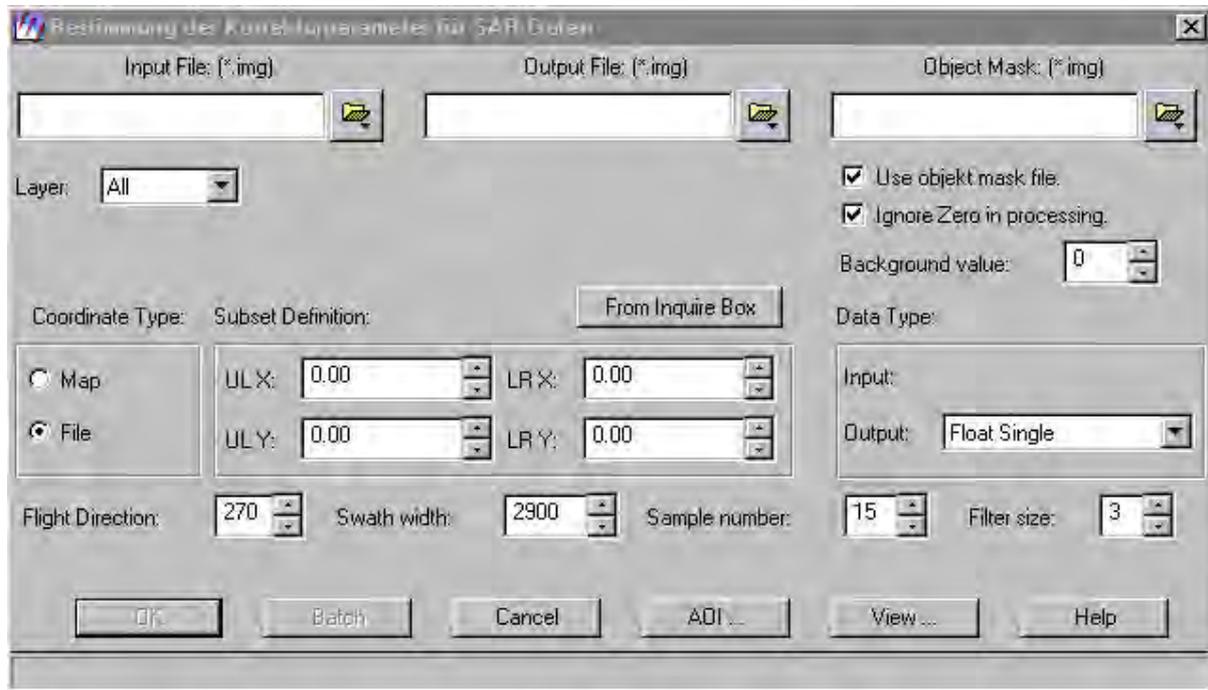


Abb. 2: Parametereingabefenster für den operationellen Prozessabschnitt ‚Radiometrische Korrektur‘ von Terra-SAR - Daten

Bei der SAR-Segmentierung werden 4 Prozessschritte durchlaufen. Die Prozesskette beginnt mit der Integration von Zielobjekten und der Auswahl der Basisdaten für den Durchlauf. Die Zielobjekte beschreiben dabei die vom Kunden gewünschten Geometrien mit entsprechender Klassenzugehörigkeit, z.B. Objekt „Wasserfläche“. Als Basisdaten fungieren zum einen die eigentlichen Fernerkundungsdaten (SAR), aber auch die sogenannten Zusatzdaten wie thematische Layer, die auf vorhandenen Datensätzen basieren. Abschließend muss hier eine Plausibilitäts-, bzw. Qualitätskontrolle durchgeführt werden. Der nächste Prozessschritt umfasst das Kernverfahren, die Segmentierung. Damit die anschließende Bewertung der Segmente umfassend erfolgen kann, muss ein entsprechender Datenpool an Ergebnissen bereitstehen. Dies soll durch eine gesteuerte Segmentierung, die auch Iterationen und Parameterspannen umfasst, gewährleistet werden. Nach den erfolgten Segmentierungsdurchläufen sind Aussagen und Bewertungen im Hinblick auf die erreichten Qualitäten notwendig, um die weitere Bearbeitungsstrategie zu entscheiden. Hierbei sollen sowohl visuelle Maße als auch möglichst robuste geometrische Bewertungskriterien einfließen. Aufgrund der potentiell möglichen Variationen innerhalb der Prozesskette soll der gesamte Prozess der Objektgenerierung kontinuierlich dokumentiert werden, um eine Nachvollziehbarkeit zu gewährleisten.

Ebenso wie bei der SAR-Datenvorverarbeitung stellt auch hier die Schnittstellendefinition einen umfangreichen Arbeitsposten dar. Da zur Realisierung der Prozesskette auf unterschiedliche Werkzeuge zurückgegriffen werden muss, soll jede potentielle Standardisierungsmöglichkeit genutzt werden.

Tab. 2: Prozessschritte zur Bearbeitung der SAR – Daten in der Prozesskette: Segmentierung

Arbeitsabschnitt	Nr.	Prozessschritt
Initialisierung/Vorbereitung (SAR-Input-Daten, Zusatzdaten)	1.	<i>Aufbereitung Zielobjekte (Kunde, Interaktion)</i> a) <i>aus bestehenden Datensätzen (z.B. CLC)</i> b) <i>Neudigitalisierung (Kunde/Anwender)</i>
	2.	<i>Auswahl Basisdaten für Auswertung</i> • <i>Fernerkundungsdaten</i> • <i>Thematische Layer (z.B. ATKIS)</i>
	3.	<i>Qualitätskontrolle</i>
Segmentierung	1.	<i>Aufruf und Startparameter für Steuerungstool Segmentierung:</i> • <i>Inputdaten</i> • <i>Parameterfestlegung (Beispiel eCognition):</i> <i>Optional: Festlegung von zu berechnenden Rangesbereichen (z.B. Scale 10 bis 100)</i> • <i>Ablage Outputdaten</i>
	2.	<i>Ausführung Segmentierung (Server-Programm)</i>
	3.	<i>Qualitätskontrolle</i>
Qualitätsmanagement	1.	<i>Bewertung Segmentierungsqualität Variante A:</i> <i>Vergleich Zielobjekte und Segmentierungsergebnisse (geometrisch, automatisiert)</i>
	2.	<i>Bewertung Segmentierungsqualität Variante B:</i> <i>Evaluierung der generierten Segmente auf visueller Basis:</i> • <i>verbale Beschreibung</i> • <i>basierend auf Formmaßen</i>
	3.	<i>Qualitätsentscheidung : Vergleich der internen und/oder externen Bewertungen durch:</i> a) <i>Übertragbare Werte, abstrakte Maße</i> b) <i>Maße basierend auf Erfahrungswerten</i>
	4.	<i>Prozessabfolge nach Qualitätsprüfung:</i> a) <i>Kriterium erfüllt: Weitere Bearbeitung /Auswertung (z.B. Klassifikation)</i> b) <i>Kriterium nicht erfüllt:</i> • <i>Neuer Lauf mit variierten Parametern</i> • <i>Prüfung des Auswertungsansatzes</i>
Protokollierung / Dokumentation	1.	<i>Protokollierung aller durchgeführten Operationen</i>
	2.	<i>Metainformationen zu allen erstellen Daten (Layern)</i>

5 Realisierung der Prozesskette zur SAR-Segmentierung

Die Prozesskette zur Objektgenerierung (Segmentierung) wurde mit Hilfe von bereits vorhanden und neu entwickelten Tools in wesentlichen Teilen zum gegenwärtigen Projektzeitpunkt realisiert. Zur Umsetzung der oben genannten Verfahren und Methoden wurde ein modularer Aufbau der Auswertestruktur angestrebt (s. Abb. 3). Mit dem von der Fa. DELPHI IMM entwickelten Tool „ETIC“ können von externer Seite her Zielobjekte definiert und an den eigentlichen Auswerteprozess übergeben werden. Nach dieser Initialisierungsphase können die Zielobjekte zusammen mit den ausgewählten Basisdaten in das Steuerungselement einfließen, wo schließlich alle nötigen Parametereinstellung vorgenommen werden. Aus dem Steuerungstool heraus werden anschließend die entsprechenden Segmentierungsläufe gestartet (Tool: eCognition). Die generierten Ergebnisse können mit dem Tool „SEQ“ geometrisch bewertet werden (Standardverfahren) und/oder wahlweise mit dem Tool ETIC wiederum in ihrer Qualität extern evaluiert werden. Die Ergebnisse aus beiden Qualitätsbewertungen fließen anschließend in die Qualitätsentscheidung ein. Nach der abschließenden Bewertung kann entschieden werden,

- ob die generierten Daten für die weitere Auswertung (Klassifizierung) verwendet werden können,
- ob zusätzliche Iterationsläufe notwendig und sinnvoll wären,
- oder ob die angewandte Strategie zur Objektgenerierung überdacht werden muss.

Nach erfolgreicher Prozessierung sollen die gewonnenen Erkenntnisse in eine Wissensdatenbank einfließen, um bei späteren Läufen zur Generierung ähnlicher Produkte auf ein evaluiertes Verfahren zugreifen zu können.

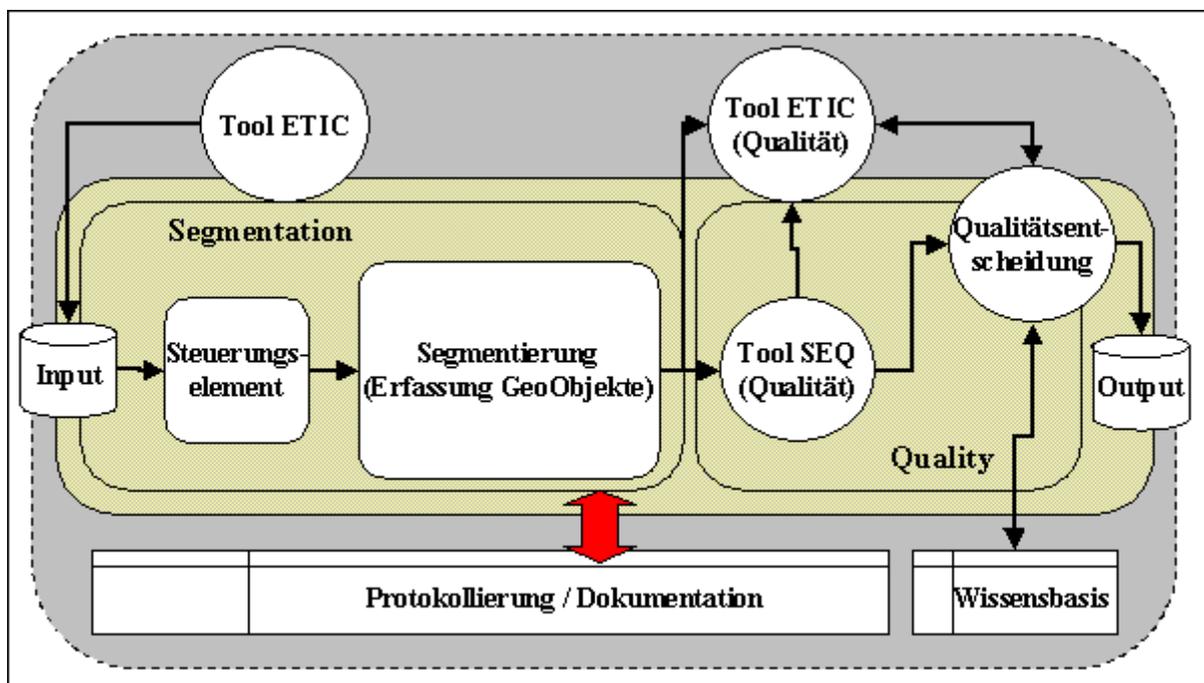


Abb. 3: Realisierte Prozesskette „Segmentierung“ zur Auswertung von SAR-Daten

Mit der Implementierung der erläuterten Prozesskette zur Segmentierung konnten wichtige funktionale Kernmodule realisiert werden. Die Automatisierung ist in weiten Teilen erreicht worden (z.B. Stapelverarbeitung). Um die Übertragbarkeit zu gewährleisten, wurde ein

strukturiertes modularer Ansatz umgesetzt, der einzelne Module und somit inhaltliche Komponenten sinnvoll und variabel miteinander kombiniert. Eine Standardisierung hinsichtlich der Normen (OGC, ISO) wurde für die eingesetzten Werkzeuge verfolgt; durch eine kontinuierliche Protokollierung wird die Nachvollziehbarkeit gesichert. Um die unerlässlichen Interaktionen an der weitestgehend automatisierten Prozesskette zu gewährleisten, wurden an den entscheidenden Prozessschritten Möglichkeiten zur Steuerung vorgesehen. Gegenwärtig befindet sich die beschriebene Prozesskette in der Testphase. Hierbei werden unterschiedlichen Datensätze und deren Ergebnisse geprüft, sowie die robuste Lauffähigkeit der Einzelmodule sowie die Plausibilität der gesamten Prozesskette evaluiert.

6 Ausblick

Für die Prozesskette der SAR-Vorverarbeitung sind im weiteren Projektverlauf die Umsetzung und Implementierung der noch fehlenden Prozessschritte in Form ähnlicher Prozessmodule vorgesehen. Zunächst wird dabei weiter auf die ERDAS-Imagine – Entwicklungsumgebung aufgesetzt und die Schnittstellen zwischen den einzelnen Modulen sowie zur Parametereingabe entsprechend gestaltet. Unabhängig davon wird aber auch an der Integration der Prozesskette insgesamt bzw. einzelner Module der Prozesskette in eine eigenständige, ebenfalls im Rahmen des Gesamtprojektes von anderen ProSmart – Prozesspartnern entwickelte Prozesssteuerung gearbeitet. Dadurch soll eine durchgehende und von einer konkreten Softwareumgebung weitgehend unabhängige operationelle Steuerung des gesamten Verarbeitungsprozesses realisiert werden.

Ein wichtiger Punkt für eine solche Implementierung ist die Entwicklung von Qualitätsmerkmale und Prüfprozeduren, die eine Bewertung der Ergebnisse der einzelnen Prozessschritte erlauben. Diese Parameter sind die eigentliche Voraussetzung dafür, dass die Prozesssteuerung tatsächlich weitgehend operationell arbeiten kann und interaktive Eingriffe nur dort erfolgen müssen, wo sie wirklich notwendig sind. Dieser Fragestellung der Qualitätsbewertung der jeweiligen Ergebnisse einzelner Prozessschritte wird daher in der weiteren Projektarbeit verstärkt Aufmerksamkeit zu widmen sein.

Für die Prozesskette der SAR-Segmentierung werden weitere Aspekte der Automatisierung, der Nachvollziehbarkeit und der Übertragbarkeit verfolgt. Nach umfangreichen Testläufen werden die aufgestellten Qualitätsmaße einer Validierung im Hinblick auf Robustheit und Aussagekraft unterzogen. Um die funktionalen Eingriffe in die Prozesskette zu minimieren, wird aufgrund der Testergebnisse ein Katalog der notwendigen und der entbehrlichen Interaktionen aufgestellt und bewertet. Die Protokollierung der durchgeführten Prozessschritte im Verbund mit den genutzten Daten wird in ein Konzept zur Archivierung von Metainformationen einfließen. Als folgende thematische Weiterentwicklung wird die Prozesskette der Klassifikation schematisiert, funktional umgesetzt und getestet werden.

Monitoring von Vegetationsstrukturen auf ehemaligen Truppenübungsplätzen mittels multitemporaler Fernerkundungsdaten

Möglichkeiten und Grenzen zur Operationalisierung

ULRIKE NOCKER¹, MONIKA PILARSKI² & PETRA VAN DORSTEN³

Zusammenfassung: Es werden Erfahrungen mit Analyse und Monitoring von Vegetationsstrukturen von Offenlandschaften auf der Basis von DAEDALUS-Daten und CIR-Luftbildern dargestellt. Das Verfahren beruht auf Auswertungen der Fernerkundungsdaten mittels Bildsegmentierung, Nearest-Neighbour- und Fuzzy-Set-Algorithmen in Kombination mit GIS-Funktionalitäten. Diese Studien wurden im Rahmen des BMBF-Verbundvorhabens „Offenland - Management auf ehemaligen und in Nutzung befindlichen Truppenübungsplätzen...“ (FKZ 01LN008) durchgeführt.

1 Naturschutz und Fernerkundung

Ehemalige Truppenübungsplätze (TÜPs) im Osten Deutschlands stellen aus Sicht des Naturschutzes häufig ökologisch wertvolle Offenlandschaften dar, insbesondere weil sich hier Vegetationsstrukturen und seltene Arten entwickeln konnten, die sonst in großer Ausbreitung nicht mehr anzutreffen sind. Es handelt sich bei diesen Gebieten vor allem um Sandlandschaften, deren charakteristische Vegetationstypen mehr oder weniger offene kryptogamenarme oder kryptogamenreiche Silbergrasfluren, Sandtrockenrasen, Hochgrasfluren, Calluna-Heide, Ginster-Gebüsch und Vorwald sind. Genaue Kenntnisse über die Verbreitung und Ausprägung bestimmter Pflanzengemeinschaften und deren Sukzessionsverlauf sind eine wesentliche Voraussetzung, um für diese Gebiete Entwicklungsziele und darauf abgestimmte Managementmaßnahmen vorzuschlagen.

Diese Gebiete sind nach wie vor durch eine generelle Kampfmittelbelastung geprägt und damit zum großen Teil nicht zugänglich. Damit ist der Einsatz von Fernerkundung als Methodik zur Erfassung von Vegetationseinheiten bzw. -strukturen und deren Art und Verteilung geradezu prädestiniert. Solche Ergebnisse sind nicht nur für aktuelle Zustände von Interesse, sondern auch für vergangene und zukünftige, d.h. ein Monitoringansatz zur Beobachtung der Vegetationsentwicklung ist gefragt.

Im Rahmen des oben genannten Verbundprojektes zum Offenland-Management DAEDALUS-Daten vom 02/08/2001 mit einer räumlichen Auflösung von 2m zur Verfügung. Zum Aufbau eines Monitoringsystems musste, wie es häufig in der Praxis der Fall ist, auf sehr unterschiedliches Luftbildmaterial zurückgegriffen werden. Das entwickelte Verfahren zum Veränderungsnachweis, basierend auf einem segmentbasierten Bildauswertungsmodul in Kombination mit GIS-Funktionalitäten und der Auswertung von Landschaftsstrukturparametern wird unter dem Aspekt von Operationalisierungsmöglichkeiten beleuchtet.

¹Ulrike Nocker, BTU Cottbus, Allgem. Ökologie, PF 101344, 03013 Cottbus, unocker@uni-cottbus.de,

²Dr. Monika Pilarski, ILV Wagner, Warthestr. 20, 14513 Teltow, ilv-fernerkundung@t-online.de

³Dipl.-Geoökologin Petra van Dorsten, Univ. Potsdam, Inst. für Biochemie und Biologie, Maulbeerallee 2a, 14469 Potsdam, vdorsten@rz.uni-potsdam.de

2 Untersuchungsgebiete

Innerhalb des Verbundprojektes Offenland wurden 6 TÜPs in Brandenburg und Sachsen untersucht. Die Abbildung 1 veranschaulicht deren Lage.

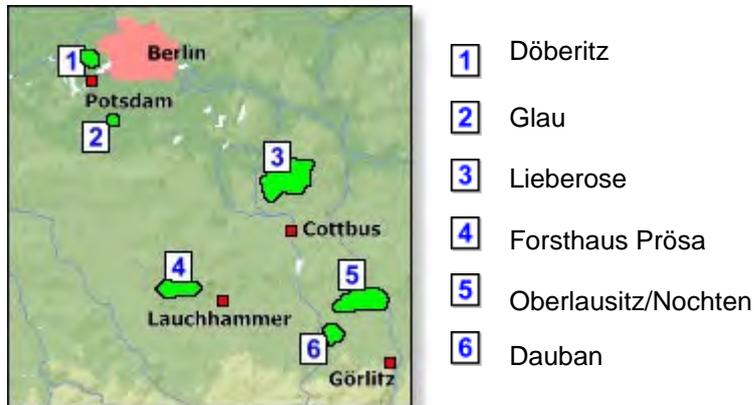


Abb. 1: Lage der Untersuchungsgebiete im Offenland-Verbundprojekt – www.offenland.de

Der Schwerpunkt der Ausführungen liegt dabei auf den Untersuchungsgebieten Dauban im Norden von Sachsen mit einer Gesamtfläche von 167 ha und Glau südlich von Berlin (Gesamtfläche von 165 ha) – [2] und [6] in Abbildung 1.

3 Datenauswahl und Methodik

Die Gebiete Dauban und Glau liegen auf 2 von 6 Trassen, die am 2. August 2001 mit dem Sensor DAEDALUS-ATM (TM) befliegen wurden. Ein wesentliches Merkmal des eingesetzten Sensors besteht in seinen 11 Spektralkanälen. Als ein Vorteil ist die spektrale Auflösung in verschiedenen Infrarotbereichen zu sehen, da sie zur Differenzierung der unterschiedlichen Vegetationseinheiten in Offenlandbereichen von Bedeutung sind.

Weiterhin standen Archivluftbilder (CIR) von 1992 und 1998 zur Verfügung.

Zur Erfassung von im Bild erkennbaren Objekten, wurde eine segmentbasierte digitale Klassifizierung der drei Datensätze mittels des Softwarepaketes eCognition durchgeführt. Die vorgeschaltete Segmentierung, basierend auf spektralen und Formhomogenitäten (BAATZ & SCHÄPE, 2000) ermöglichte eine Auswertung der Datensätze auf verschiedenen Maßstabsebenen. Bei der thematischen Zuordnung der Segmente wurde durch die zusätzliche Einbindung des NDVI, der Ergebnisse der Hauptkomponentenanalyse und Varianzfilterung ein größerer Detaillierungs- und Differenzierungsgrad erreicht.

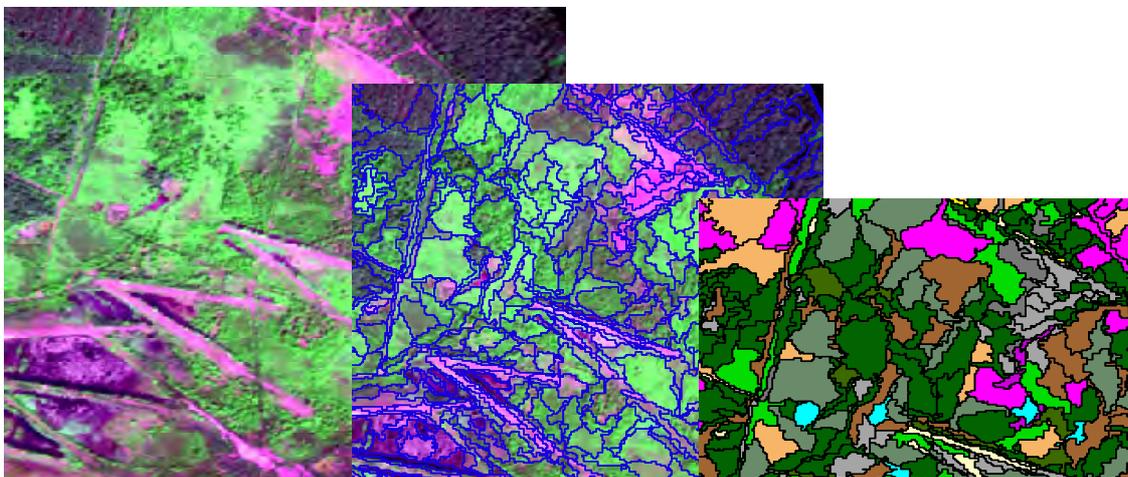
Die Klassifizierung der Segmente der DAEDALUS-Daten erfolgte mittels eines kombinierten Verfahrens von Fuzzy-Regeln und einer Nearest-Neighbor-Klassifizierung.

Für das angestrebte Monitoring zur Vegetationsentwicklung von Offenlandschaften, mussten die in ihren spektralen Eigenschaften nur sehr bedingt geeigneten vorhandenen CIR-Luftbilder genutzt werden. Daraus ergab sich, dass für die thematische Zuordnung der in den Luftbildern gewonnenen Segmente ein kombiniertes digital/visuelles Verfahren gewählt wurde, bei dem auch verstärkt Felderfahrungen integriert werden konnten. Obwohl die zu erwartenden Biotoptypen vor der eigentlichen Bildanalyse festgelegt waren, ergaben sich aus den Bildinhalten selbst doch immer wieder neue Varianten bestimmter Vegetationstypen, so dass für den Vergleich mit aggregierten Typen gearbeitet werden musste. Die einzelnen Auswertungsergebnisse wurden mittels Overlay-Funktionen im GIS miteinander verschnitten. Zur Erfassung zusätzlicher Veränderungsindikatoren wurden für die einzelnen Auswertungslayer

Landschaftsstrukturparameter entsprechend des Patch- Matrix-Konzeptes von FORMAN & GORDON (1986) ermittelt und miteinander verglichen. Es wurden gängige Flächen-, Patch-, Kanten-, Form- und Diversitätsmaße in die Auswertung eingebunden. Detaillierte Beschreibungen der einzelnen Maße finden sich u.a. bei MCGARIGAL & MARKS (1995) und LAUSCH (2000).

4 Ergebnisse

Die relativ gute spektrale Differenzierung der DAEDALUS-Daten und die Segmentierungsmöglichkeiten mit eCognition zur Homogenisierung der Bildinhalte und zur Bildung realistischer aufgabenbezogener Objekte sind wesentliche Voraussetzungen für eine erfolgreiche, den Biologen und Naturschutzfachmann zufriedenstellende automatische Biotoptypenklassifizierung von Offenlandschaften. Abbildung 2 zeigt am Beispiel von Dauban, wie ein strukturreiches Sukzessionsgebiet mittels Fernerkundung typisiert werden kann. Zur Differenzierung verschiedener Offenlandtypen waren die Kanäle des NIR und SWIR von entscheidender Bedeutung.



Dark Green	Kiefernwald
Medium Green	Mischwald (Eiche/ Birke)
Light Green	Mischwald (Birke, Fichte, Eiche)
Bright Green	Birkenwald
Light Grey	Hochgrasbestand
Dark Grey	Calamagrostisfluren
Medium Grey	Mosaik- Calamagrostis/ Gehölze
Orange	Calluna- Heide
Pink	Mosaik- Birke/ Callunaheide
Purple	Ginster
Brown	Spireengebüsch
Yellow	Offene Sandflächen
Cyan	Röhricht
Dark Blue	Wasser

Abb. 2: Biotoptypenklassifizierung auf der Basis von DAEDALUS-Daten 2001 und Segmentierung – Ausschnitt des ehemaligen TUP Dauban

Zwei Zeitschnitte aus dem Vegetationsmonitoring des ehemaligen Truppenübungsplatzes Glau zeigt Abbildung 3.

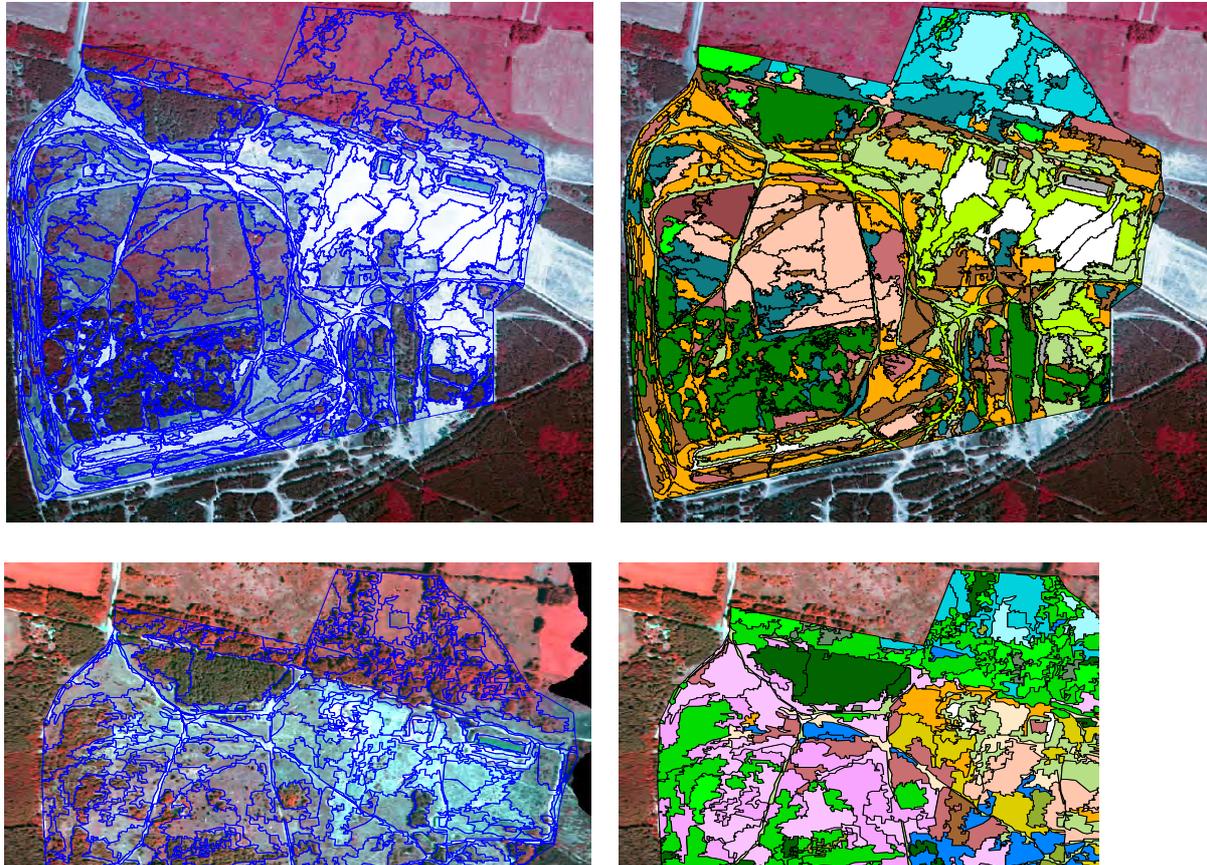


Abb. 3: Biotoptypenkartierung durch Segmentierung und Klassifizierung, CIR-Luftbild 1992 (oben), DAEDALUS-Daten 2001 (unten)

In Abbildung 4 wird das Ergebnis einer chronologischen Verschneidung visualisiert, die mittels GIS-Overlay-Funktionalitäten durchgeführt wurde. Die Ergebnisse wurden zur Visualisierung in einzelne thematische Layer aufgesplittet (im Beispiel eine Sandtrockenrasenentwicklung), die dann als Basis für weitere Szenarienanalysen verwendet wurden.

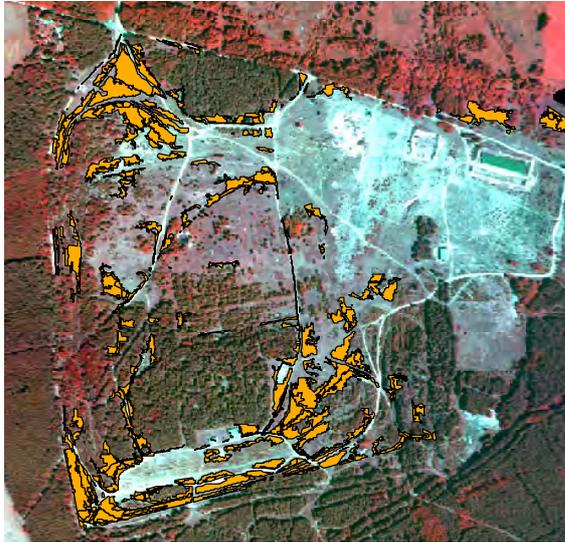


Abb. 4: Flächen, die sich zwischen 1992 und 2001 von Sandtrockenrasen zu Trockenrasen und Grasfluren mit Gehölzen entwickelt haben

Als zusätzliche Informationen für die Analyse von Entwicklungstendenzen dienen Landschaftsstrukturparameter. Die ausgewählten Parameter auf Landschaftsebene lassen grobe Einschätzungen zur Gesamtsituation und deren Veränderungen zu. Integriert man in die Auswertung zusätzlich diese Maße/ pro Klasse kann man detaillierte Aussagen zu Tendenzen machen.

Tab. 1: Ausgewählte Landschaftsstrukturparameter für die verschiedenen Zeitschnitte

Strukturparameter	Jahr		
	1992	1998	2001
Flächengröße	1287927,02		
Number of Patches	575,00	447,00	413,00
Mean Patch Size	2239,87	2881,27	3118,47
Edge density	0,23	0,22	0,14
Shape Index	2,91	3,10	2,18
Shannon Diversity Index	2,42	2,77	2,67
Shannon Evenness Index	0,85	0,88	0,88

Der Index Number of Patches ist u.a. Ausdruck für die Heterogenität der Landschaft. Der sinkende Wert weist auf eine Tendenz zur Homogenisierung des Untersuchungsgebietes hin. Korrelierend steigt die mittlere Patchgröße innerhalb der Jahre kontinuierlich an. Damit wird deutlich, dass die Kleinstrukturiertheit der Landschaft immer stärker verloren geht.

Das Kantenmaß Kantendichte (Kantenlänge eines Elementes im Verhältnis zu dessen Fläche) besitzt bezüglich der Beschreibung der Konfiguration der Landschaftsstruktur eine hohe Aussagekraft (LAUSCH, 2000). Mit sinkenden Werten im Verlauf der Jahre steigen Formen mit einer geringen Kantenlänge an, im Gegensatz zu Elementen mit unregelmäßigen Grenzverläufen und kleineren Flächengrößen. Bezieht man den Shape Index in die Auswertung mit ein wird nochmals bestätigt, dass komplexere Formen durch einfachere Formen abgelöst werden. Dabei geht man grundsätzlich davon aus, dass Landschaftselemente natürlichen Charakters komplexere Formen aufweisen.

Mittels Maßen der Diversität und Verteilung wird die Komposition des Untersuchungsgebietes quantifiziert. Dazu wird die Reichhaltigkeit (Shannon Diversity Index) als Parameter für die Anzahl der in einem Raum vorkommenden Klassen und Gleichmäßigkeit (Shannon Evenness Index) für die Verteilung der verschiedenen Klassen im Raum verwendet. Dabei ist festzustellen, dass die steigenden Werte des Diversitätsindex im Zusammenhang mit einer ansteigenden Klassenvielfalt stehen.

Die für den ehemaligen TÜP Glau ermittelte Tendenz der Homogenisierung in den Jahren 1992 bis 2001 kann durch unterschiedliche Managementmaßnahmen beeinflusst werden, so dass diese Entwicklung verstärkt oder verlangsamt wird. Um dies zu prognostizieren wurden für das Gebiet Glau, das seit 1998 als Wildgehege genutzt wird, Szenarien berechnet. Dazu gingen die Flächenbilanzen der festgestellten Vegetationsentwicklungen in unterschiedliche Management-Szenarien zur Offenhaltung ein (Abb. 5). Das Szenario „Freie Sukzession“ beschreibt den Fall, dass die Landschaftspflege durch die Wildtiere nicht mehr gewährleistet werden kann. Dadurch würde es zu einem weitgehend ungehinderten Wachstum der Vegetation, insbesondere auch der Gehölze kommen. Da zwischen 1992 und 1998, also vor Einrichtung des Wildgeheges, bereits ein Zustand freier Sukzession gegeben war, lässt sich die Vegetationsentwicklung anhand oben beschriebener Luftbildinterpretationen aus diesen Jahren wie in Abbildung 5 links dargestellt vorhersagen.

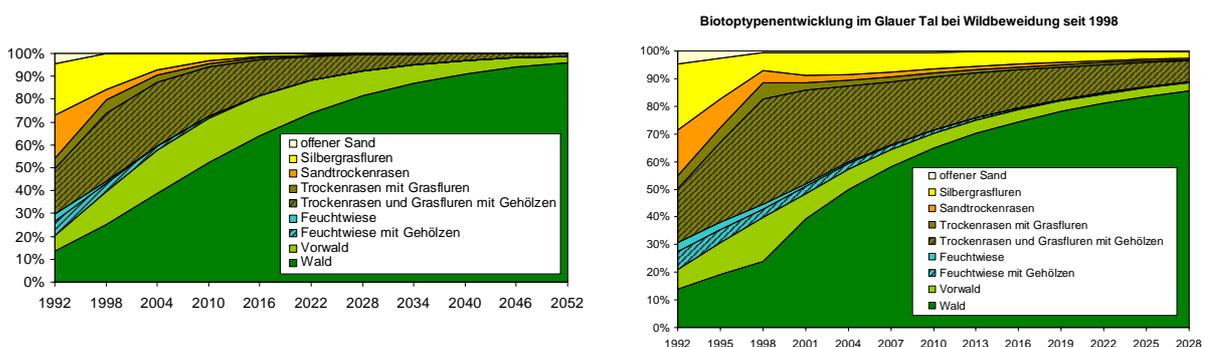


Abb. 5: Szenariendarstellung zur Vegetationsentwicklung auf dem ehemaligen TÜP Glau: links – bei freier Sukzession und rechts – bei Wildtierbeweidung

Das Szenario „Ist-Verfahren“ bedeutet eine Fortsetzung des gegenwärtigen Managements, d.h. es wird davon ausgegangen, dass der Wildbestand bei etwa einem Tier pro Hektar konstant gehalten werden kann. Die weitere Entwicklung der Vegetation bei Fortführung des gegenwärtigen Managements wurde anhand der Bildauswertungen aus den Jahren 1998 und 2001 vorausgesagt.

5 Möglichkeiten und Grenzen zur Operationalisierung

Generell sei angemerkt, dass es sich bei dem Untersuchungsgegenstand: Vegetationseinheiten/Biototypen von Offenlandschaften, die durch freie Sukzession entstanden sind, um sehr komplexe Objekte handelt, wie aus Sicht der Fernerkundung ausführlich von LESER (2002) dargestellt. Die Grenzen solcher Vegetationseinheiten sind meist sehr unscharf, bilden Übergangsbereiche. Durch das oben dargestellte Vorgehen bei der Erfassung solcher Vegetationsstrukturen ergeben sich für einen Monitoringansatz folgende Vorteile:

1. Mit digitalen Segmentierungen der Scanner- und Luftbilddaten konnten die im Bild erkennbaren Objekte verschiedenen Größenordnungen abgegrenzt werden. Vergleicht man

die Ergebnisse der durch digitale und visuelle Auswertung gewonnenen Einheiten wird deutlich, dass eine befriedigende Abgrenzung von Objekten mittels digitaler Auswertung gewonnen werden konnte. Der digitale Segmentierungsprozess löst damit die klassische arbeits- und zeitaufwendige Methode der manuellen Erfassung von Grenzen und deren anschließender Digitalisierung oder auch die „on- Screen“- Digitalisierung mittels visueller Interpretation ab.

2. Durch ein Zusammenspiel von Fernerkundung und GIS kann die jeweilige Einzelklassifizierung nachträglich bearbeitet werden, insbesondere kann durch eine Aggregation von Typen die Vergleichbarkeit der Auswertung unterschiedlicher Ausgangsdaten überhaupt gewährleistet werden.
3. Durch die Einbindung von Landschaftsstrukturmaßen konnten zusätzliche Informationen zur Landschaftsstruktur und deren Veränderung analysiert werden.

Ein erster Schritt zur Operationalisierung ist die Festlegung von Verfahrensabläufen. In Abbildung 6 wird der generelle Ablauf für die Ermittlung von Veränderungen von Vegetations-einheiten wie Biotop- und Nutzungstypen (BTNT) dargestellt, wie er im Offenland-Projekt erarbeitet wurde. Dabei ist die Kombination von Fernerkundung und GIS wesentlich. Auf solchen Lösungsansatz wies bereits LESER (2002) hin.

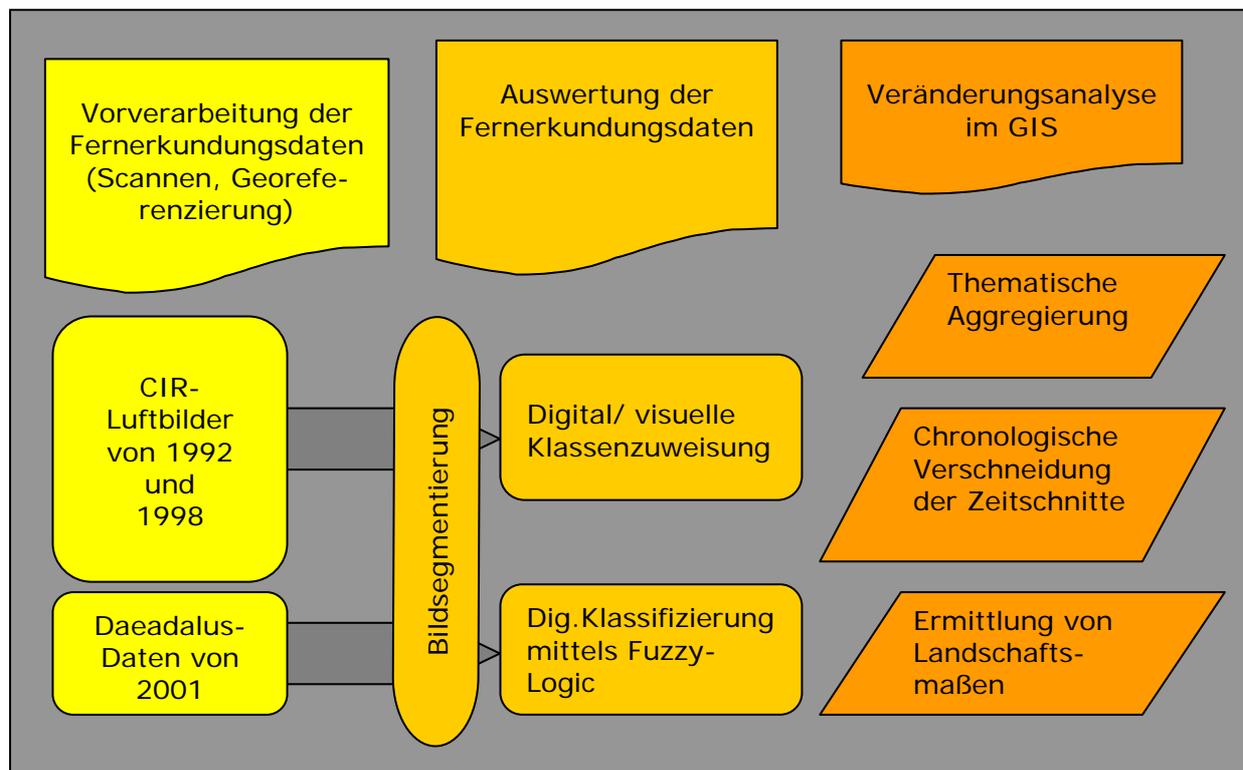


Abb. 6: Genereller Verfahrensablauf zur Ermittlung von Veränderungsnachweisen von BTNT

Aus Sicht der Autoren erfüllt dieser Verfahrensablauf 2 Aspekte der Operationalisierung, Nachvollziehbarkeit und Übertragbarkeit; Übertragbarkeit auf andere Ausgangsdaten und andere Gebiete. Allerdings besteht weiterhin ein großer Schritt, um bei dieser Aufgabenstellung, des Nachweises von BTNT-Entwicklungen, Standardisierung und Automatisierung zu erreichen. Standardisierung setzt exakte, möglichst formalisierbare Definitionen der Zieltypen voraus. Das ist bei den BTNT-Definitionen nur beschränkt der Fall. Automatisierung ist in gewissen Grenzen vorhanden, wenn kommerziell verfügbare Software eingesetzt wird (in diesem Fall (ERDAS-Imagine 8.5, eCognition 3.2 und ArcView 3.2).

6 Literaturverzeichnis

FORMAN, R.T.T., GODRON, M., 1986: Landscape Ecology, United States.

LAUSCH, A., 2000: Raumzeitliches Monitoring von Landschaftsstrukturen in der Tagebauregion Südraum Leipzig mit Methoden der Fernerkundung und Geoinformation. Bonn.

LESER, C., 2002: Biotoptypenkartierung anhand hochauflösender Flugzeugscannerdaten – Entwicklung operationeller Methoden unter komplizierten Rahmenbedingungen. Vorträge 22. Wiss.-Techn. Jahrestag. der DGPF, Neubrandenburg 2002, Bd.11: 175-183.

MCGARIGAL, K. & B. MARKS, 1995: FRAGSTAT: Spatial Pattern Analysis Program for Quantifying Landscape Structure. Portland.

Ein Prozessmodell zur Analyse von Hyperspektraldaten in urbanen Gebieten

MATHIAS BOCHOW¹, ANSGAR GREIWE² & MANFRED EHLERS³

Zusammenfassung: In diesem Beitrag werden verschiedene Ansätze zur Optimierung des Klassifikationsprozesses von hyperspektralen Fernerkundungsdaten in urbanen Gebieten untersucht. Hierbei werden zusätzlich Informationen aus Thermal- sowie Höhendaten herangezogen und mit den Hyperspektraldaten fusioniert. Methodik und Ergebnisse zweier Fusionsansätze auf Signal- sowie auf Entscheidungs-Ebene werden diskutiert. Für letztere werden aus allen Datenquellen Merkmale zur Unterscheidung der Endmember abgeleitet. Die Merkmale führen durch Erzeugung von Masken zu einer räumlich-thematischen Vorselektion. Einige Endmember können auf diese Weise durch die Kombination weniger Merkmale bereits klassifiziert werden. Durch andere Merkmalskombinationen lassen sich thematische Endmember-Gruppen vorselektieren, welche mit gezielt ausgewählten Endmembers und Methoden klassifiziert werden.

1 Einleitung

Urbane Gebiete zeichnen sich zum einen durch eine sehr kleinräumige Struktur, zum anderen durch eine hohe Heterogenität an Landnutzungen bzw. Oberflächen aus. Um diese Vielzahl an unterschiedlichen Klassen unterscheidbar zu erfassen, bieten sich hyperspektrale Fernerkundungsdaten an. Durch die enge Abtastung des elektromagnetischen Spektrums mit sehr vielen engbandigen Kanälen haben diese bereits in zahlreichen Anwendungsgebieten (z.B. Geologie) materialgenaue Klassifikationen ermöglicht.

Für die Verarbeitung und Auswertung von Hyperspektraldaten existiert ein umfangreicher Methoden-katalog. Neben den Verfahren zur Datenaufbereitung wird hier zwischen Vollpixel- und Subpixel-basierten Verfahren unterschieden. Mit letzteren ist es möglich, Flächenanteile von Klassen (genannt Endmember) in Mischpixeln zu ermitteln. Dennoch führt die Anwendung gängiger Methoden in urbanen Gebieten zu häufigen Klassifikationsfehlern. Diese werden durch verschiedene Faktoren hervorgerufen: Zum einen besteht zwischen vielen urbanen Endmembers eine spektrale Ähnlichkeit aufgrund einer ähnlichen Materialzusammensetzung. Eigene Ergebnisse zeigen, dass vor allem Subpixel-Methoden (z.B. Linear Spectral Unmixing), die eine spektrale Unabhängigkeit der Endmember voraussetzen, hier nur eingeschränkt oder mit Anpassungen anwendbar sind (BOCHOW, 2002, S. 82 ff.). Zum anderen besitzen urbane Endmember selten deutliche spektrale Merkmale (z.B. materialspezifische Absorptionsbanden). Ein weiterer Aspekt sind die Randbedingungen bei der Aufnahme von Hyperspektraldaten. Aufnahme- und Objektgeometrien (z.B. Neigungswinkel der Dachflächen), sowie der Einstrahlungswinkel des Lichtes, aber auch der Zustand der urbanen Oberflächen (Alter, Verschmutzung, Feuchtigkeit u.ä.) führen zu unterschiedlichen Ausprägungen der spektralen Signaturen (im Folgenden kurz als Spektren bezeichnet) und streng genommen zu unterschiedlichen Endmembers.

¹Dipl.-Umweltwiss. Mathias Bochow, Tel. +49-4441-15 480, Fax +49-4441-15 583, e-mail: mbochow@fzg.uni-vechta.de

²Dipl.-Umweltwiss. Dipl.-Ing. (FH) Ansgar Greiwe, Tel. +49-4441-15 324, Fax +49-4441-15 583, e-mail: agreiwe@fzg.uni-vechta.de

³Prof. Dr.-Ing. Manfred Ehlers, Tel. +49-4441-15 423, Fax +49-4441-15 583, e-mail: mehlers@fzg.uni-vechta.de

^{1,2,3}Forschungszentrum für Geoinformatik und Fernerkundung, Hochschule Vechta, Postfach 1553, 49364 Vechta

Diese Arbeit wird gefördert durch das BMBF, FKZ 50EE0032

In dieser Arbeit werden daher verschiedene Ansätze zur Optimierung des Klassifikationsprozesses untersucht. Das Ziel ist eine Landnutzungsklassifikation bzw. eine Identifikation urbaner Oberflächen. Anstelle einer vollständigen Erfassung aller oben genannten Ausprägungen für jede Landnutzungs-kategorie bzw. urbane Oberfläche werden Merkmale gesucht, die diese unabhängig ihrer Ausprägungen unterscheidbar machen. Neben den hyperspektralen Daten werden zusätzliche Informationen aus Thermaldaten sowie Höhendaten zur Merkmalsextraktion herangezogen und auf diese Weise mit den Hyperspektraldaten fusioniert.

2 Untersuchungsgebiet und Daten

Ein ca. 1 km² großes Gebiet der Stadt Osnabrück wird für die Untersuchungen ausgewählt. Es zeigt sowohl den dicht bebauten Stadtkern, als auch locker bebautes Gebiet, Industrie- und Grünanlagen.

DAIS 7915

DAIS 7915 ist ein flugzeuggetragener Hyperspektralscanner nach dem Whiskbroom-Prinzip und wird vom DLR, Oberpfaffenhofen geflogen. Für die Auswertungen wurden die Reflexionsbänder im Bereich von 0,4-2,5 µm sowie ein Thermalband (Radiance in mW/m² sr µm) bei 8,57 µm verwendet.

Die Reflexionsbänder 14, 41-48, 54 sowie 65-72 wurden aufgrund eines visuell erkennbaren Rauschens aus dem Datensatz entfernt. Ferner wurden die übrigen Bänder einer Minimum Noise Fraction Transformation (MNF) unterzogen, um das Rauschen zu minimieren (GREEN et al., 1988). Da bei einer urbanen Bildszene mit hohem Informationsgehalt auch höhere MNF Bänder teilweise noch Information enthalten, wurden 39 von 54 MNF Bändern für die Rücktransformation verwendet. Ein Plot des kumulativen Informationsgehaltes der MNF Bänder zeigt, dass bei dieser vorsichtigen Rauscheliminierung 99,9% der Gesamtinformation des Datensatzes erhalten bleibt. Bei Analysen im MNF-transformierten Merkmalsraum wurden die ersten 16 MNF Bänder berücksichtigt.

Höhenmodell (DOM) aus HRSC-A Aufnahmen

Das zur Verfügung stehende DOM ist durch das Multi-Image-Matching-Verfahren aus einer HRSC-A Aufnahme entstanden (WEWEL, 2000). Da dieses Erzeugungsverfahren vor allem bei urbanen Bildszenen zu zahlreichen Fehlern führt (BOHMANN, 2001, S. 12 ff.), welche das Klassifikationsergebnis stark beeinflussen würden, sind eine Reihe von Korrekturschritten notwendig, um das für die Analyse verwendete normalisierte DOM (nDOM) zu erzeugen. Folgende Korrekturen wurden durchgeführt:

- Erzeugung eines nDOM (= Objekthöhen) (BOHMANN, 2001, S. 5):

$$\text{nDOM} = \text{DOM} - \text{DGM} \quad (1)$$

Hierbei ist das DGM durch Interpolation von Punkten erzeugt worden, die an der Geländeoberkante gesetzt worden sind.

- Korrektur der fließenden Ränder von real scharf abgegrenzten hohen Objekten:

Unter der Annahme, dass hohe Objekte entweder Gebäude, Bahndämme oder Bäume sind, werden für Erstere deren Grenzen mittels Vektordaten (ALK) ausgeschnitten und die Höhenwerte beibehalten. Ferner werden alle Höhenwerte der Vegetation (vertreten durch NDVI) beibehalten. Alle übrigen positiven Höhenwerte werden auf 0 ge-

setzt, was zu einer scharfen Abgrenzung der urbanen Objekte führt (s. Abb. 2-1). Negative Höhen, d.h. Senken, die durch das interpolierte DGM nicht erfasst worden sind, werden ebenfalls übernommen.

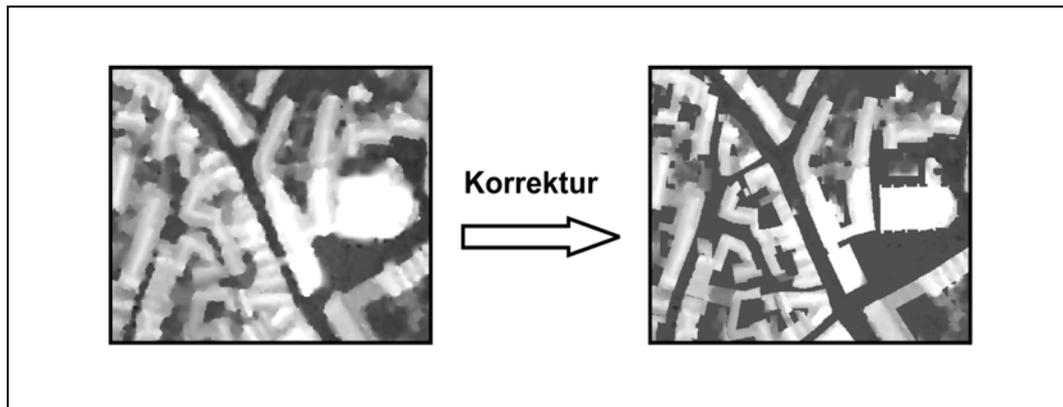


Abb. 2-1: DOM aus HRSC-A und nDOM nach Korrektur

3 Datenfusion und Klassifikation

Ziel einer Datenfusion ist es, mehrere Datenquellen gemeinsam auszuwerten, um ein Ergebnis von einer höheren Qualität zu erhalten (WALD et al., 1999) – in diesem Fall eine höhere Qualität des Klassifikationsergebnisses in der Hinsicht, dass

- eine höhere Gesamtgenauigkeit erreicht wird,
- insbesondere Verwechslungen zwischen einigen urbanen Endmembern begrenzt werden und
- die räumliche Genauigkeit durch die höhere geometrische Auflösung des DOM gesteigert wird.

Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird die Auswertung ausschließlich der hyperspektralen Daten (DAIS Reflexionsbänder) (3.1) gegenübergestellt mit verschiedenen Fusionsstrategien mit Thermal- und Höhendaten (3.2 und 3.3).

3.1 Auswertung der DAIS Reflexionsbänder

Der aus der Geologie stammende Ablauf der Analyse von Hyperspektraldaten zu Klassifikations- oder Detektionszwecken (Abb. 3-1) gliedert sich in eine spektralen Datenreduktion durch die MNF, gefolgt von der Selektion von Endmembern (EM) im n-dimensionalen Merkmalsraum. Hierfür wird der Pixel Purity Index (PPI) in Verbindung mit dem n-dimensional Visualizer (NDV) der Software ENVI verwendet (s. BOARDMAN, 1995).

Der PPI basiert auf dem Prinzip der linearen spektralen Mischung und setzt voraus, dass die gesuchten Endmember spektral unabhängig sind, was dazu führt, dass sie in der Hülle der Punktwolke des Merkmalsraumes liegen. Die ersten Probleme entstehen hierbei aufgrund der Eigenschaften einiger urbaner Oberflächen, deren Spektren keine signifikanten Merkmale aufweisen und insgesamt sehr flach verlaufen. Sie liegen dadurch nicht in der Hülle der Punktwolke und können mit dem PPI nicht erfasst werden. Alternativ wurden die Endmem-

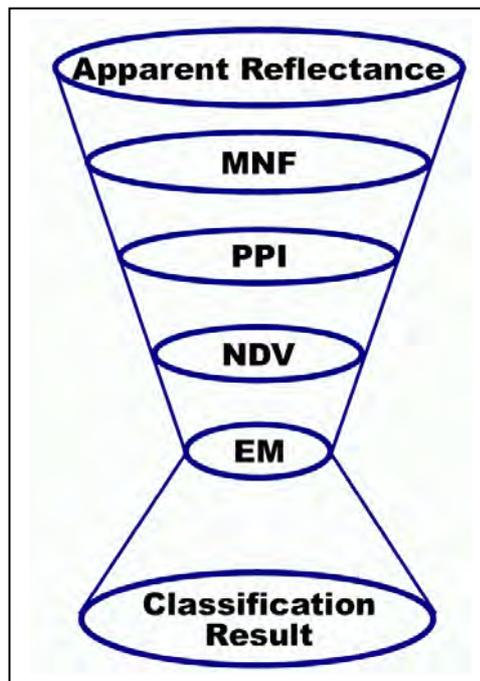


Abb. 3-1: Ablauf der Analyse von Hyperspektraldaten (nach: BOARDMAN, 1995)

ber dieser Oberflächen im Bildraum bestimmt und durch eine hochauflösende Aufnahme des HRSC-A Sensors sowie durch Ground Truthing validiert. Für die Klassifikation mit dem Spectral Angle Mapper (SAM) wurden die ersten 16 MNF Bänder (Eigenwert: 4,66; kumulativer Informationsgehalt: 99,58%) verwendet. SAM misst den Winkel zwischen den Vektoren der Bildelemente und der Endmember im n-dimensionalen Raum. Diese Winkel wurden mit empirisch ermittelten individuellen Schwellenwerten belegt, so dass Mischpixel nicht klassifiziert werden.

3.2 Fusion auf Signal-Ebene

Die ersten 16 MNF Bänder werden mit einem Thermalband und dem nDOM zu einem Datensatz vereint und auf die geometrische Auflösung der Höhendaten (0,5 m) hochgerechnet. Betrachtet man nicht die physische, sondern die anschließende inhaltliche Fusion der einzelnen Datenquellen durch die gemeinsame Klassifikation mit dem SAM, so handelt es sich hier um eine Fusion auf der Signal-Ebene, da der Vektor eines Pixels im Merkmalsraum durch die Einzelsignale (Grauwerte) des Pixels in jedem Band bestimmt wird. Jeder Grauwert in jedem Band beeinflusst die Größe des SAM Winkels. Da das Thermalband Grauwerte bis ca. 14000 mW/m² sr µm aufweist und die Reflexionsbänder auf den Bereich von 0-800 normiert sind (Begrenzung auf 800 statt 1000, da sehr hohe Werte bei der atmosphärischen Korrektur die Nachbarpixel verfälschen (Auskunft R. Richter, DLR)), beeinflusst das Thermalband die Größe des SAM Winkels überproportional. Deshalb wird eine Normierung des Thermalbandes und des nDOM mit einer z-Transformation vorgenommen, so dass diese (wie auch die MNF Bänder) einen Mittelwert von 0 und eine an die des ersten MNF Bandes angepasste Standardabweichung besitzen.

Auch hier werden bei der Klassifikation individuelle empirisch ermittelte Schwellenwerte für die SAM Winkel verwendet.

3.3 Entscheidungsbasierte Fusion

Zum Aufbau von Entscheidungsbäumen existieren verschiedene Strategien, SWAIN & HAUSKA (1977; zitiert in: RICHARDS & JIA, 1999, S. 283) stellen jedoch fest, dass vor allem für eine spezielle Klassifikationsaufgabe ein Entscheidungsbaum häufig manuell entworfen werden kann, wenn eine entsprechende Kenntnis der Daten vorhanden ist (RICHARDS & JIA, 1999, S. 286).

Einer der größten Vorteile einer entscheidungsbasierten Fusion ist ihre Flexibilität. Mit ihr können Daten unterschiedlicher Quellen und Typen gemeinsam ausgewertet werden, ohne dass eine Normierung der unterschiedlichen Datenquellen vorgenommen werden muss. An jedem Knoten des Entscheidungsbaumes kann dabei eine andere Entscheidungsregel in Form eines einfachen Schwellenwertes oder eines komplizierteren Klassifikationsverfahrens angewendet werden.

Der verwendete Entscheidungsbaum vereint eine Vielzahl an Merkmalen bzw. Masken, die aus den DAIS Reflexions- und Thermalbändern, sowie aus dem normierten DOM abgeleitet wurden (s. Abb. A-1). Im einzelnen sind diese:

- *Objekthöhe*
- Der „*First-order Derivative Green Vegetation Index Derived Using Local Baseline*“ (*IDL_DGVI*) (ELVIDGE & CHEN, 1995) wird anstelle des NDVI verwendet. Dieser basiert auf der Steigung anstelle von absoluten Reflexionswerten und trennt so besser zwischen Vegetation und urbanen Oberflächen. Ein Nachteil des *IDL_DGVI* ist, dass Kupfer hier relativ hohe Werte erhält, da es im roten Bereich des elektromagnetischen Spektrums eine negative Steigung aufweist. Dieses Problem wird dadurch umgangen, dass Kupfer vor der Berechnung des *IDL_DGVI* durch den SAM klassifiziert und ausmaskiert wird.
- Die Bhattacharyya Distance (LANDGREBE, 2000) und *Decision Boundary Feature Extraction (DBFE)* (LEE & LANDGREBE, 1993) wurden eingesetzt, um die Trennbarkeit ähnlicher Materialien zu erhöhen.
- Aufgrund der Erzeugungsart des nDOM besitzt **Wasser negative Höhenwerte**. Diese Eigenschaft wird in Kombination mit der *geringsten Strahlungstemperatur* aller Oberflächen einer urbanen Bildszene zur Bestimmung von Wasser benutzt.
- **Schatten** weist neben Wasser eine sehr *geringe durchschnittliche Reflexion* („spectral mean“ in Abb. A-1) auf. Ein weiteres Merkmal ist der erhöhte Anteil des blauviolettten Bereiches des in Schattenflächen einfallenden diffusen Lichtes, welcher auch in den spektralen Signaturen von Schattenpixeln festgestellt werden kann. Zur Detektion eignet sich ein *Band-Ratio (496 nm / 514 nm)*.

4 Ergebnisse

Analog zu Kapitel 3 werden in den folgenden Abschnitten die Ergebnisse der drei Verfahren diskutiert.

4.1 Auswertung der DAIS Reflexionsbänder

Einige urbane Oberflächen (Tonpfannen, rote Zementpfannen, Metalldächer) können mit dem SAM gut differenziert werden. Die verschiedenen Vegetationsarten werden gut erkannt.

Wasserflächen können mit den Standardverfahren in einer urbanen Bildszene nicht klassifiziert werden, da sie sich anhand der spektralen Information nicht von Schattenpixeln unter-

scheiden lassen. Ebenfalls nicht ausreichend erfasst werden Gleise, dunkle Hausdächer (Zementpfannen und Teerpappe), Asphalt und Betonpflaster. Aufgrund hoher spektraler Ähnlichkeiten dieser urbanen Oberflächen entstehen Klassifikationsfehler, die nur zum Teil durch Begrenzung der SAM Winkel mit Schwellenwerten vermieden werden können. So werden z.B. viele Gebäude (Teerpappe) als Asphalt klassifiziert (s. Abb. 4-1). Die Unterscheidung, ob es sich um ein Gebäude oder eine Straße handelt ist auf Grundlage der hyperspektralen Daten nicht möglich. In diesem Zusammenhang stellt ein digitales Höhenmodell eine sinnvolle Ergänzung dar.

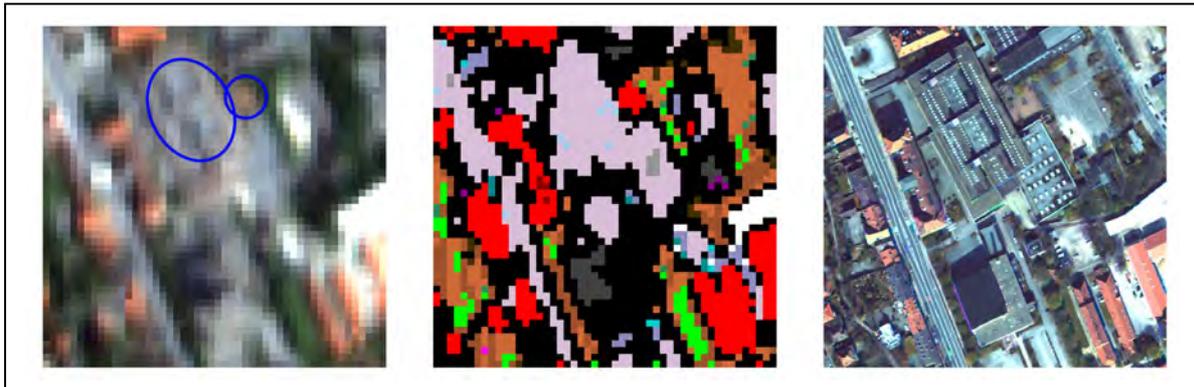


Abb. 4-1: Beispiel einer Fehlklassifikation – eine Gebäude wird als Asphalt klassifiziert, ein mit roten Steinen gepflasterter Platz als Hausdach mit roten Tonpfannen. (Links: DAIS; Mitte: Klassifikation; Rechts: HRSC-A)

4.2 Fusion auf Signal-Ebene

Diese Fusionsart ist sinnvoll, wenn die Informationen aller Datenquellen detailliert ausgewertet werden sollen. Das nDOM sowie die Thermaldaten beinhalten allerdings teilweise Informationen, die für die Klassenzuweisung nicht relevant sind. Z.B. kann durch die Höheninformation zwischen einem mit Teerpappe gedecktem Hausdach und einer asphaltierten Straße unterschieden werden (beide Materialien sind spektral sehr ähnlich). Allerdings differenzieren die Höhendaten auch zwischen einem 10 m und einen 30 m hohem Gebäude der gleichen Dachbedeckung. Diese Information ist nicht gewünscht und kann zu Fehlklassifikationen führen, wenn die durch Mittelung entstandene Höhe eines Endmembers stark von der Höhe eines speziellen Gebäudes abweicht. Vor allem bei Dächern sind diese Fehler im Ergebnis zu erkennen, da diese sowohl in der Höhe als auch in der Temperatur stark differieren.

Aufgrund dieser Erkenntnisse wurde diese Fusionsart nicht weiter verfolgt und eine entscheidungsbasierte Fusion entwickelt, die die Informationen der unterschiedlichen Datenquellen effizienter nutzt.

4.3 Entscheidungsbasierte Fusion

Das Ergebnis der Klassifikation wird in Abbildung A-2 gezeigt. Durch die höhere geometrische Auflösung des nDOM kann die räumliche Genauigkeit der Klassifikation an Stellen gesteigert werden, die einen starken Höhenunterschied aufweisen (z.B. Gebäudegrenzen). Die Einbindung der thermalen und der Höheninformation ermöglicht eine einfache und ge-

naue Klassifikation von Wasserflächen. Weiterhin werden durch Letztere Verwechslungen zwischen Dächern und versiegelten Flächen am Boden vermieden.

Durch die Beleuchtungsinvarianz des SAM können mit diesem vorher detektierte Schattenpixel den entsprechenden beschatteten Materialien zugeordnet werden.

Die im Vergleich zum Ergebnis aus Kap. 3.1 schlechtere Erkennung von Bäumen resultiert aus zu geringen oder nicht erkannten Höhenwerten und ist auf das Erzeugungsverfahren des DOM aus HRSC-A Daten zurückzuführen.

Obwohl für einige Klassen nur eine geringe Anzahl an Trainingspixeln für die DBFE zur Verfügung standen, liefert diese eine bessere Transformation des Merkmalsraumes als die MNF bezüglich der Trennbarkeit ähnlicher Klassen. Es wird angenommen, dass die Performance mit einer größeren Anzahl an Trainingspixeln noch gesteigert werden, da diese hier einen entscheidenden Faktor darstellt (HSIEH, 1998).

5 Schlussfolgerungen und Ausblick

Es wurde gezeigt, dass aufgrund der hohen Diversität des urbanen Raumes durch die gemeinsame Nutzung und Auswertung verschiedener Datenarten der Fernerkundung ein qualitativ höheres Ergebnis erzielt werden kann. Ein Entscheidungsbaum stellt hierbei eine geeignete Methode zur Datenfusion dar.

Die aus den verschiedenen Datenarten abgeleiteten Merkmale sind klassenspezifisch. Ziel weiteren Untersuchungen wird es sein, zu prüfen, ob die Merkmale sowie die Struktur des Entscheidungsbaumes auf andere Datensätze urbaner Untersuchungsgebiete übertragbar sind.

6 Literaturverzeichnis

- ALBERTZ, J. (Hrsg.), 2000: Photogrammetrie und Fernerkundung – Neue Anwendungen. - Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung; **8**: 57-67.
- BOARDMAN, J.W., KRUSE, F.A., AND GREEN, R.O., 1995: Mapping target signatures via partial unmixing of AVIRIS data. - Summaries, Fifth JPL Airborne Earth Science Workshop, JPL Publication **95-1** (1): 23-26.
- BOCHOW, M., 2002: Entwicklung und Vergleich verschiedener Algorithmen zur Klassifikation ausgewählter Versiegelungsarten in urbanen Gebieten aus hyperspektralen Scannerdaten. Diplomarbeit, Hochschule Vechta, IUW.
- BOHMANN, G., 2001: Entwicklung eines Methoden-Netzwerks zur Integration Digitaler Oberflächenmodelle (DOM) in den Prozeß der Objektextraktion. Diplomarbeit, Hochschule Vechta, IUW.
- DLR, 2001: The Digital Airborne Imaging Spectrometer DAIS 7915. Internetseite: <http://www.op.dlr.de/dais/dais-scr.htm> , zuletzt besucht am 13.Juni 2003.
- ELVIDGE, C. D. AND CHEN, Z., 1995: Comparison of Broad-Band and Narrow-Band Red and Near-Infrared Vegetation Indices. – Remote Sensing The Environment, **54**: 38-48.
- GREEN, A. A., M. BERMAN, P. SWITZER AND CRAIG, M. D., 1988: A Transformation for Ordering Multispectral Data in Terms of Image Quality with Implications for Noise Removal. - IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing, **26** (1): 65-74.

- HEINZ, D. C. AND CHANG, C.-I., 2001: Fully Constraint Least Squares Linear Spectral Mixture Analysis Method for Material Quantification in Hyperspectral Imagery. - IEEE Transactions On Geoscience And Remote Sensing, **39** (3): 529-545.
- HSIEH, P.-F. AND LANDGREBE, D., 1998: Linear Feature Extraction for Multiclass Problems. - Proceedings of the International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Seattle, WA, July 6-10.
- LANDGREBE, D. A., 2000: Information Extraction Principles and Methods for Multispectral and Hyperspectral Image Data. - Information Processing for Remote Sensing, C. H. Chen Ed., Chapter 1, World Scientific Publishing Co., River Edge, NJ.
- LEE, C. AND LANDGREBE, D. A., 1993: Feature Extraction Based on Decision Boundaries. – IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, **15**(4): 388-400.
- RICHARDS, J. A. AND JIA, X., 1999: Remote Sensing Digital Image Analysis. Third, revised and enlarged edition, Springer Verlag, Berlin.
- SWAIN, P. H. AND HAUSKA, H., 1977: The Decision Tree Classifier: Design and Potential. – IEEE Transaction On Geoscience Electronics, **GE-15**: 142-147.
- WALD, L., 1999: Definitions and Terms of Reference in Data Fusion. - International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, **32** (7-4-3): 2-6.
- WEWEL, F. AND SCHOLTEN, F. (2000): „Erstellung von Digitalen Oberflächenmodellen mit dem Mehrzeilen-Stereoscanner HRSC-A“. – in: ALBERTZ, J., 2000.

Anhang A

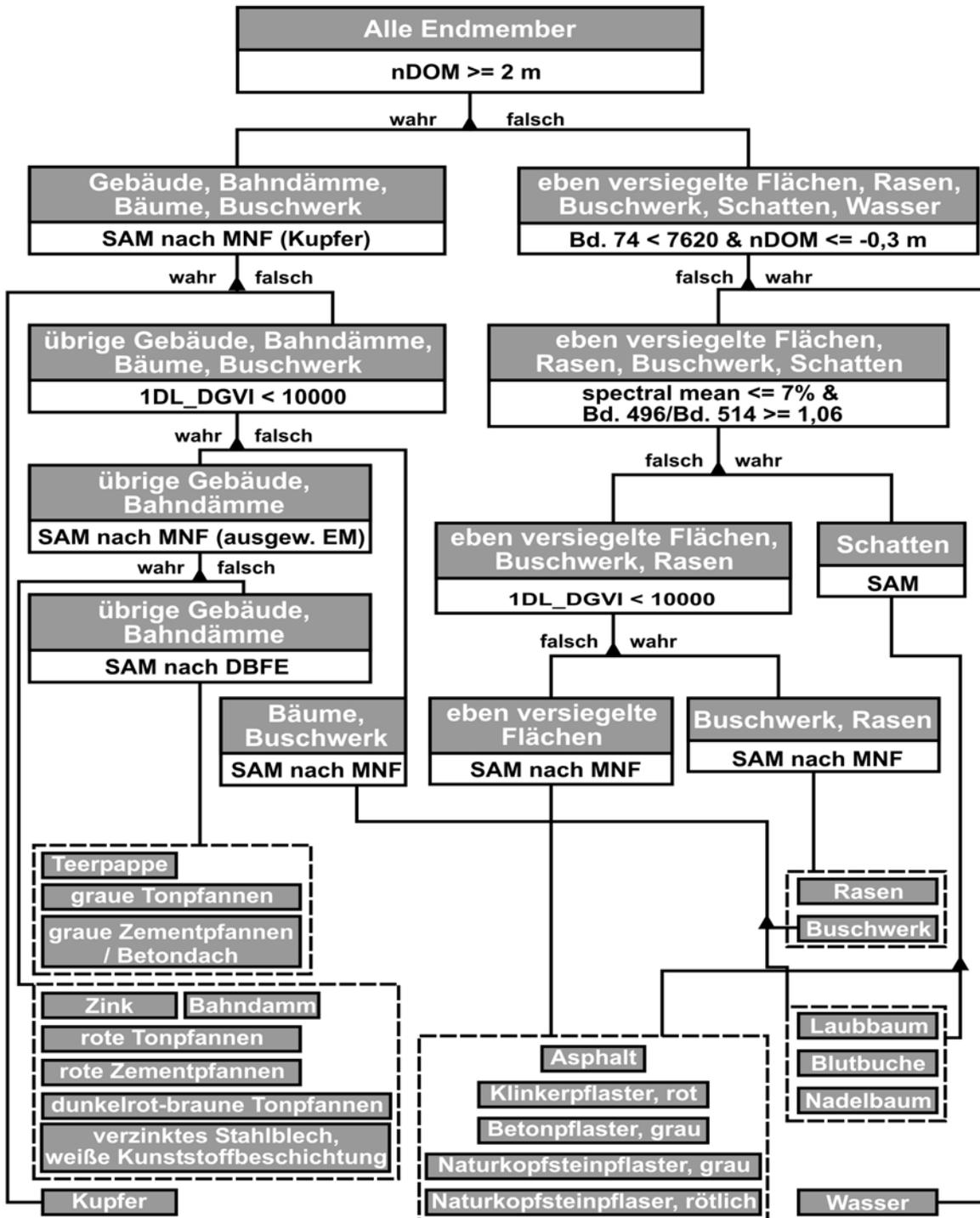


Abb. A-1: Struktur des verwendeten Entscheidungsbaumes

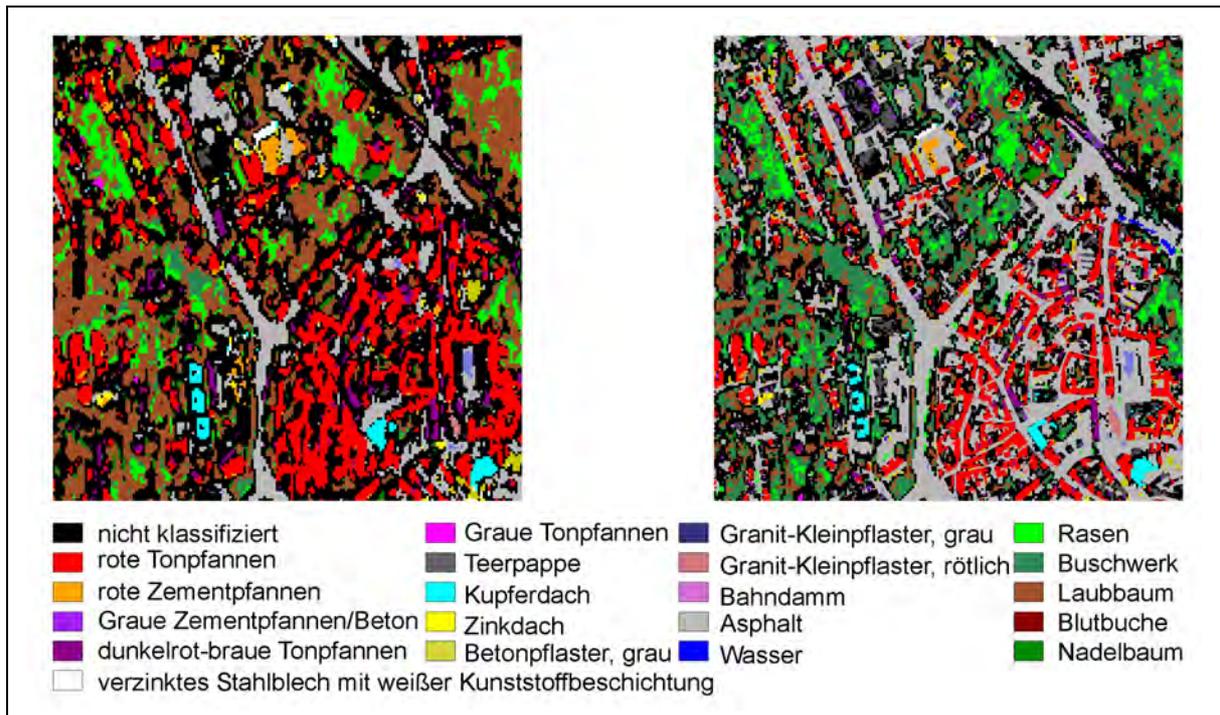


Abb. A-2: Ergebnis der Klassifikationen der Kapitel 3.1 und 3.3. (Links: Auswertung der hyperspektralen Daten mit SAM; Rechts: Fusion auf Entscheidungs-Ebene)

STEREO - GISPLAY

FRANK NEIDHART¹

Zusammenfassung: Die Forderung nach einer photogrammetrischen Fortführung dreidimensionaler objektorientierter GIS-Datensätze stellte die Anbieter photogrammetrischer Systeme in den vergangenen Jahren vor immer größer werdende Herausforderungen:

- Gängige GIS-Systeme hatten überwiegend nur eine 2- oder 2,5-D Datenvorhaltung,
- Photogrammetrische „GIS“-Systeme wie PHOCUS fanden nur eine begrenzte Verbreitung
- Photogrammetrische Erfassungssysteme waren zumeist CAD-basierend, so dass eine objektorientierte, topologische Erfassung / Fortführung online nicht möglich war.

Durch Extrahieren der Stereofunktionalität in eine Art „Stereo-Toolbox“ ist Z/I Imaging in der Lage, als einziger Anbieter quasi auf jedes gängige GIS oder CAD verschiedener Anbieter aufzusetzen. Im Einzelnen bedeutet dies für den Anwender:

- Freie Wahl der GIS- oder CAD-Plattform, die für die Anwendungen oder Kundenaufträge am besten geeignet ist.
- Z/I Imaging stellt hierbei die Plattform für Stereodisplay direkt im GIS zur Verfügung.
- Die unmittelbare photogrammetrische Fortführung von topologisch aufbereiteten Datensätzen wird somit ermöglicht.
- Ein API (Application Programming Interface) ermöglicht die Programmierung der Schnittstelle zwischen Stereodisplay und GIS.

Der Markt fordert, GIS-Projekte unter Minimierung der Kosten schnellstmöglich zu erfassen und ggf. zu späteren Zeitpunkten fortzuführen. Es wird gezeigt, wie eine innovative Produktionsumgebung mit den obigen Herausforderungen umgeht und bestehende Beschränkungen aufhebt.

1. Einführung

Die Forderung nach einer photogrammetrischen Erfassung und Fortführung dreidimensionaler Daten gibt es seit Bestehen einer direkten Verbindung analytischer Plotter und leistungsstarker graphischer Workstations. Bereits in den Anfängen dieser Technologie während der 80er Jahre des letzten Jahrhunderts waren die Forderungen der Anwender nahezu die gleichen wie heute, man könnte sie wie folgt zusammenfassen:

“Wir wollen in einer objektorientierten Umgebung arbeiten, die uns:

- Topologie und Connectivity,
- Die einfache Kartenfortführung (Geometrie und Attribute),
- Arbeiten in einer 3-D-Umgebung mit hochproduktiven Photogrammetrie-Werkzeugen
- Und einer Datenbankanbindung die Kompatibilität zu ESRI, Intergraph, Smallworld, CAD, etc. ermöglicht”

Diese Forderungen sind über die Jahre gleich geblieben, konnten aber bisher von den Anbietern photogrammetrischer Systeme nicht komplett umgesetzt werden. Die Hauptgründe dafür waren vielfältig:

¹ Frank Neidhart, Z/I Imaging GmbH, Ulmer Str. 124, 74341 Aalen, E-Mail: f.neidhart@ziimaging.de

- Gängige GIS-Systeme hatten überwiegend nur eine 2- oder 2,5-D Datenvorhaltung,
- GIS-orientierte photogrammetrische Systeme wie PHOCUS fanden im GIS-Markt nur eine begrenzte Verbreitung,
- Photogrammetrische Erfassungssysteme waren zumeist CAD-basierend, so dass eine objektorientierte, topologische Erfassung / Fortführung online nicht möglich war.

Im Laufe der Jahre stellten sich somit zwei Trends bei der Datenerfassung ein: die Entwicklung von Schnittstellen zu Quasi-Standards im CAD Bereich sowie die Entwicklung proprietärer Erfassungssysteme speziell für die Photogrammetrie.

1.1 Schnittstellen zu CAD Systemen

Der Trend in der Photogrammetrie ging schnell in Richtung einer Anbindung der Analytischen Plotter – und später der Digitalen Plotter – an bestehende CAD Systeme. Unabhängig vom Anbieter photogrammetrischer Systeme kristallisierten sich hier schnell zwei CAD Plattformen als besonders prädestiniert und beliebt heraus: AutoCAD von Autodesk und MicroStation von Bentley. Beide Anbieter erfüllten in hohem Maße die Anforderungen ihrer Kunden hinsichtlich der Ersterfassung. Sie stellten standardmäßig Werkzeuge zur Verfügung, die eine schnelle und saubere Erfassung der Bildinhalte ermöglichten. Auf eine Auflistung dieser Funktionalitäten wird hier verzichtet, da sie jedem Leser vertraut sein dürften.

Besonders in den 80er und frühen 90er Jahren war dies den meisten photogrammetrischen Dienstleistern eine ausreichende Plattform. Das Gros der Aufträge bestand aus photogrammetrischer Ersterfassung für GIS-Systeme und der Datenerfassung für Kartensystemen sowie Digitaler Höhenmodelle. Die Fortführung bestehender Bestände spielte zu dem Zeitpunkt noch keine große Rolle. Für die Ersterfassung wurde deshalb oft auf den teuren photogrammetrischen Arbeitsstationen eine topologisch unkorrekte „Spaghetti-Digitalisierung“ durchgeführt. Attribute wurden in der Regel nicht vergeben. Die topologischen Strukturen im Endsystem wurden somit erst am GIS-Arbeitsplatz erstellt, ebenso wie das Zuweisen von Attributen.

Mit günstiger werdenden photogrammetrischen Arbeitsstationen zeitgleich mit dem Wechsel des Betriebssystems nach Microsoft Windows und den damit verbundenen günstigen PC-Workstations konnten auch auf den Stereoarbeitsplätzen Daten strukturierter erfasst werden. Somit konnte eine Doppelbearbeitung des selben Datensatzes bis hin zur Übergabe ins GIS weitgehend reduziert werden. Der Operateur war und ist in der Lage, die Daten genau in derjenigen Struktur in Geometrie und Attribution zu erfassen, wie das vom Zielsystem bzw. Endkunden gefordert wird. Somit kann man heute an einem photogrammetrischen CAD-Arbeitsplatz den Grundforderungen „hochproduktive Werkzeuge“ und „einfache Fortführung“ und „Datenbankanbindung“ gerecht werden, nicht jedoch der Vorgabe von „Topologie“ und „Connectivity“.

1.2 Schnittstellen zu GIS-ähnlichen Systemen

Für Anwender, denen die obigen Systeme nicht ausreichend waren, entwickelten photogrammetrische Anbieter weitere Software, die einem GIS nahe kamen, trotzdem aber bis heute nicht alle Forderungen abdecken konnten.

So war z.B. eine Datenerfassung in Intergraph's MGE – einem bis vor kurzem weit verbreiteten GIS – möglich. Hier etwa konnte Intergraph's Stereodisplay direkt über MGE gestartet werden. MGE war zwar in der Lage, Topologie innerhalb eines bestehenden Datensatzes zu

erzeugen und somit räumliche Abfragen zu gestatten, die Verbindung eines Punktes mit mehreren Objekten war aber auch hier nicht möglich. In anderen Worten: auch bei MGE war man nicht in der Lage, Topologie in einem Datensatz zu speichern, bzw. „intelligente“ Verbindungen zweier oder mehrerer Objekte herzustellen, um bei der Fortführung entsprechend nur Knoten oder jeweils ein Objekt zu bearbeiten. Bestehende Verbindungen werden aufgebrochen und müssen jeweils neu generiert werden.

Das gleiche gilt für Geographics basierend auf MicroStation. Diese Lösung wird von vielen photogrammetrischen Herstellern als GIS-Anbindung verkauft. Die strukturierte Ersterfassung und die Übergabe an Dritt-GIS wie ArcGIS oder GeoMedia stellt auch hier kein Problem dar. Aber auch diese Lösung hat die selben Einschränkungen, wie sie MGE hatte. Die Limitierung zeigt sich dann, wenn bestehende Datensätze in obigen GIS fortgeführt werden sollen. Enthaltene Topologien und Verbindungen im Endsystem werden beim Wandeln nach MicroStation aufgebrochen und gehen verloren.

Um die Forderungen nach Topologie und Objektstrukturen direkt in einem photogrammetrischen System abzudecken, entwickelte Carl Zeiss bereits 1987 sein eigenes Quasi-GIS namens „Phocus“. Mit Phocus war es möglich, sämtliche photogrammetrische Arbeiten in einem System abzudecken. Topologie konnte direkt in der objektorientierten Datenstruktur erzeugt werden und hatte Bestand. Es wäre jedoch verwegen zu behaupten, Phocus sei ein vollwertiges GIS, da das System auf Datenerfassung ausgelegt war und nicht auf die Analyse von Daten, wie es heute in klassischen GIS der Fall ist. Trotzdem war und ist das System prädestiniert für die Fortführung und Pflege bestehender Datensätze und ist deshalb bei vielen Anwendern noch in täglichem Gebrauch. Phocus kommt auch deshalb den eingangs gelisteten Anforderungen am nächsten, da es mittlerweile viele kommerzielle und eigenentwickelte Umsetzer zu anderen GIS am Markt gibt. Trotzdem konnte Carl Zeiss und später Z/I Imaging nicht an der langen Phocus-Tradition festhalten, da das UNIX-basierende Programm nicht auf Windows portiert werden kann und weil eine Neuentwicklung bei der heutigen Fülle an GIS nicht gerechtfertigt wäre.

1.3 Schnittstellen zu kommerziellen GIS Systemen

Die in den letzten beiden Abschnitten erwähnten Nachteile lassen demnach nur einen logischen Schluss zu: die Anbieter photogrammetrischer Systeme sollten das Bestreben haben, eine direkte Schnittstelle zu einem bestehenden GIS bereitzustellen. Dieser Schluss jedoch führt direkt zu neuen Herausforderungen:

- Welches ist „das richtige“ GIS, um darauf aufzusetzen? Viele GIS sind heute immer noch 2D oder 2.5D!
- Wie viele GIS-Interfaces muss man bereitstellen, um möglichst alle Anwendungen abzudecken? Bekanntermaßen haben sich verschiedene GIS auf bestimmte Fachrichtungen spezialisiert, die aber alle von photogrammetrischen Produzenten bedient werden. Kann man verlangen, daß Produzenten deshalb alle geforderten GIS haben?
- Wie flexibel kann man reagieren, wenn der Trend im GIS Markt sich für andere GIS entscheidet oder
- Der Partner für das Stereointerface seine GIS Schiene umstellt?

Deshalb ist die eigentlich richtige Schlussfolgerung, dass zum einen eine offene Schnittstelle geschaffen werden muss, die durch einfache Adaptionen an beliebige GIS oder CAD angepaßt werden kann. Zum anderen muss genau „das“ GIS gefunden werden, das sowohl eine

große Verbreitung und Akzeptanz am Markt hat, als auch mit den meisten anderen GIS am Markt in beiden Richtungen kommunizieren kann.

2. Integration der Photogrammetrie ins GIS-Umfeld

In den letzten Jahren hat sich in der breiten Gemeinde der GIS-Anwender einiges verändert. Die meisten GIS sind heute in der Lage, Daten nicht nur in 3-D vorzuhalten, sondern neben Vektoren auch große Rasterdaten direkt im GIS darzustellen. Es ist daher nicht verwunderlich, dass GIS-Anwender heute mehr denn je ihre Daten abhängig von der Anwendung, der Aktualität, den Genauigkeitsanforderungen und dem Preis herausuchen. Die gängigsten Datenquellen sind hierbei:

- Luft- und Satellitenbilder
- Laserscanning
- Airborne SAR
- Abgeleitete Produkte wie Orthophotos, digitale Karten oder DGMs.

Der klassische GIS-Anwender unterscheidet heute demnach nicht mehr so sehr zwischen Photogrammetrie und Fernerkundung, die Felder verschmelzen unter der gemeinsamen Mutter GIS. Z/I Imaging hat schon vor einiger Zeit dieses Phänomen erkannt und die Begriffe EarthImaging bzw. GeoImaging kreiert. Diese Begriffe umfassen alle Felder und Datenquellen, die mit der Aufnahme und Verarbeitung von Bildern zu tun haben, die Teile der Erdoberfläche abbilden. Das Ziel von Z/I Imaging ist es, GeoImaging-Daten unabhängig ihrer Herkunft einem GIS zur Verfügung zu stellen. Demzufolge hat sich Z/I Imaging auch das Ziel gesetzt, Stereomodelle als eine besondere Art der Darstellung von GeoImaging-Bildern einem GIS zur Verfügung zu stellen, und zwar unabhängig, welches Zielsystem verwendet wird.

2.1 Grundlegendes Prinzip

Das Stereodisplay bei Z/I Imaging, unter der Bezeichnung ImageStation Stereodisplay ISSD als Marktführer über 1000 mal bewiesen, war bis vor wenigen Monaten fester Bestandteil von MicroStation. In anderen Worten: das Stereodisplay war fest in MicroStation integriert und optimal darauf abgestimmt. Die Anwender waren somit fest an MicroStation gebunden. Z/I Imaging verfolgte über - auf MicroStation basierende - Zusatzprogramme die unter Abschnitt 1.1 und 1.2 beschriebenen Ansätze, um dem Anwender für die strukturierte Datenerfassung optimale Werkzeuge mitzugeben.

Da - wie oben erwähnt - es das Ziel sein soll, Stereomodelle unabhängig von der Plattform darzustellen, wurde in einer ersten Stufe der „Stereo-Engine“, das Z/I-Werkzeug zur Steuerung sämtlicher Stereofunktionalitäten, aus MicroStation herausgetrennt. Dieses neue Stereo-Basismodul bildet heute den Kern aller Stereoanwendungen und wird als Produktamen StereoSoftcopy Enabler SSE bekommen.

Um einen fließenden Übergang für die Anwender zu gewährleisten, wurde das Basismodul SSE zunächst wieder an MicroStation gebunden. Bildlich betrachtet (siehe auch Abb. 1) heißt das, dass das Basismodul nicht mehr innerhalb MicroStation, sondern außerhalb MicroStation quasi „angeklebt“ sitzt, verbunden durch ein MicroStation-spezifisches Interface, dem MicroStation „Host-Adaptor“. Dieser Host-Adaptor wird durch ein Software Development Kit (SSE SDK) programmiert. Der Anwender hat von der Umstellung nichts mitbekommen. Durch weitere Anpassungen des SSE SDKs unter Bildung weiterer Host-Adaptors an andere

GIS oder CAD hat man nun die Möglichkeit, SSE schnell und einfach an andere GIS zu adaptieren.

2.2 SSE SDK: der Z/I-Host-Adaptor

Wie im vorherigen Abschnitt beschrieben, wird der Host-Adaptor durch den von Z/I gelieferten SSE SDK programmiert. Dieser ist nichts anderes als ein sog. API, ein Application Programming Interface, das die programmierbare Schnittstelle zwischen der gewünschten GIS/CAD-Anwendung und unseren gewohnt performanten Stereowerkzeugen darstellt. Folgerung: durch die Verknüpfung des Z/I-Stereos SSE und dem gewählten GIS oder CAD bestimmt der Anwender über die Auswahl des GIS, wie objektorientiert und topologisch strukturiert gearbeitet werden kann.

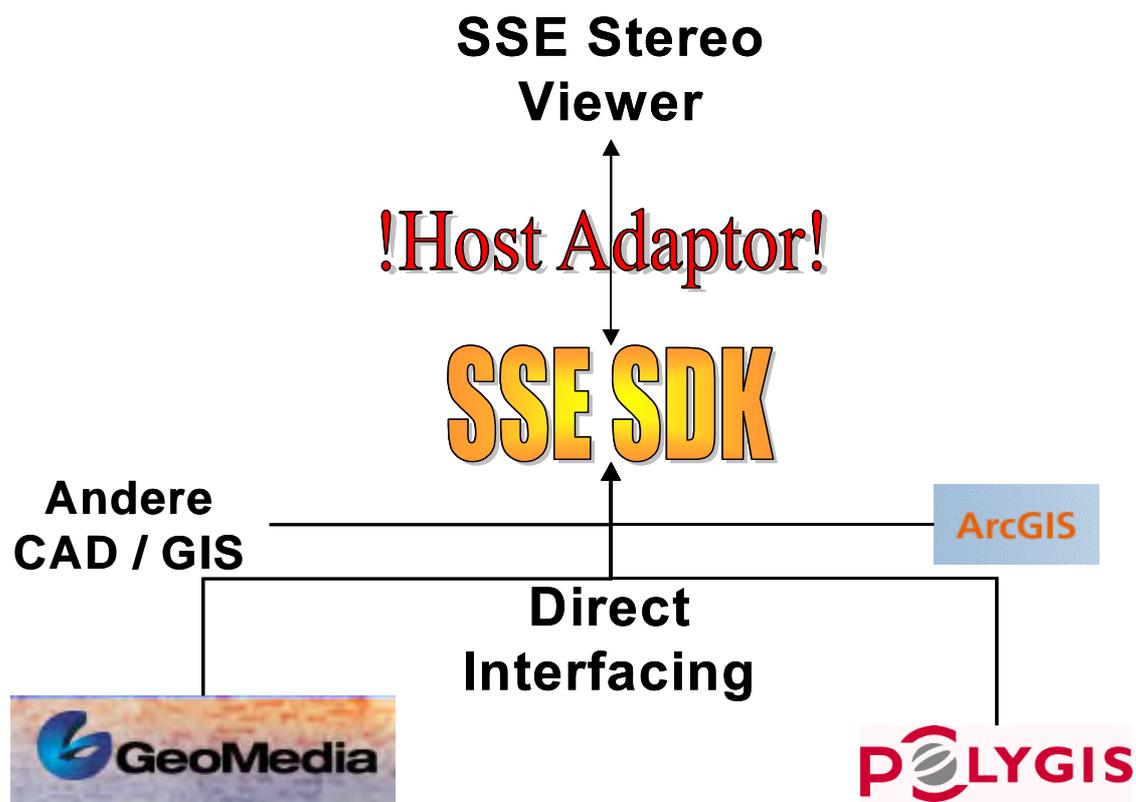


Abb 1: Systematische Darstellung SSE SDK

Der Host Adaptor beinhaltet den Code, der speziell für ein spezifisches GIS oder CAD über den SSE SDK entwickelt wurde. Quasi jedes verbreitete GIS oder CAD am Markt hat Basisfunktionalitäten für die graphische Darstellung seiner Objekte, die sich einander ähnlich oder gleich sind. Das SSE SDK hat Werkzeuge, die sich diese Komponenten zunutze machen und darauf aufsetzen können, um den Host Adaptor anzupassen. Da SSE auf Microsoft Component Object Model (COM) basiert, muss auch der Host Adaptor COM-basierend sein. Das heißt jedoch nicht, dass auch das GIS COM-basierend sein muss. Es wird dem Entwickler überlassen, in welcher Art und Weise er das Host-GIS mit dem Adaptor in Verbindung bringt. Die Programmierung kann wie üblicherweise entweder in Visual C++ (unter Verwendung von COM) oder in Visual Basic erfolgen. Die Ansprüche an den Entwickler sind die gleichen, als wenn mit ArcObjects von ESRI oder Extensions für GeoMedia geschrieben werden würden.

2.3 Stereo-Interfacing mit GeoMedia

Da nicht alle Kunden in der Lage sind, ihren eigenen Host Adaptor über das SSE SDK zu entwickeln und da es für die großen GIS am Markt unsinnig wäre, unzählige Parallelentwicklungen durch Endanwender zu haben, hat sich Z/I Imaging entschlossen, für eben diese „große“ GIS den Host Adaptor zu entwickeln und zu vertreiben. Wie oben erwähnt, ist dies mit MicroStation bereits erfolgt. Nach langer Prüfung hat man sich als ersten Host Adaptor an ein spezielles GIS für GeoMedia entschieden. Andere GIS Host Adapter werden mit Sicherheit in den nächsten Monaten und Jahren folgen, sollte sich der Bedarf dafür ergeben.

Der große Vorteil von GeoMedia ist nicht nur, daß es sich um ein Produkt mit großer Marktverbreitung handelt, sondern auch, dass es derzeit das Programm am Markt ist, das die meisten Schnittstellen zu anderen GIS hat (siehe Abb. 2) und dem OGC-Standard am Nächsten kommt. Über sogenannte Warehouses ist der Anwender in der Lage, alle gängigen Formate als Originaldatensatz ohne weitere Konvertierungen einzulesen. Somit kann man in einer graphischen Oberfläche Bestände unterschiedlicher Ursprungssysteme miteinander kombinieren. Sollte dies immer noch nicht genug sein, so gibt es vielfältige Umsetzungsprogramme, die von einem Ausgangssystem direkt nach GeoMedia eine Datentransformation durchführen können. So können sogar Phocus Daten nach GeoMedia eingelesen werden!

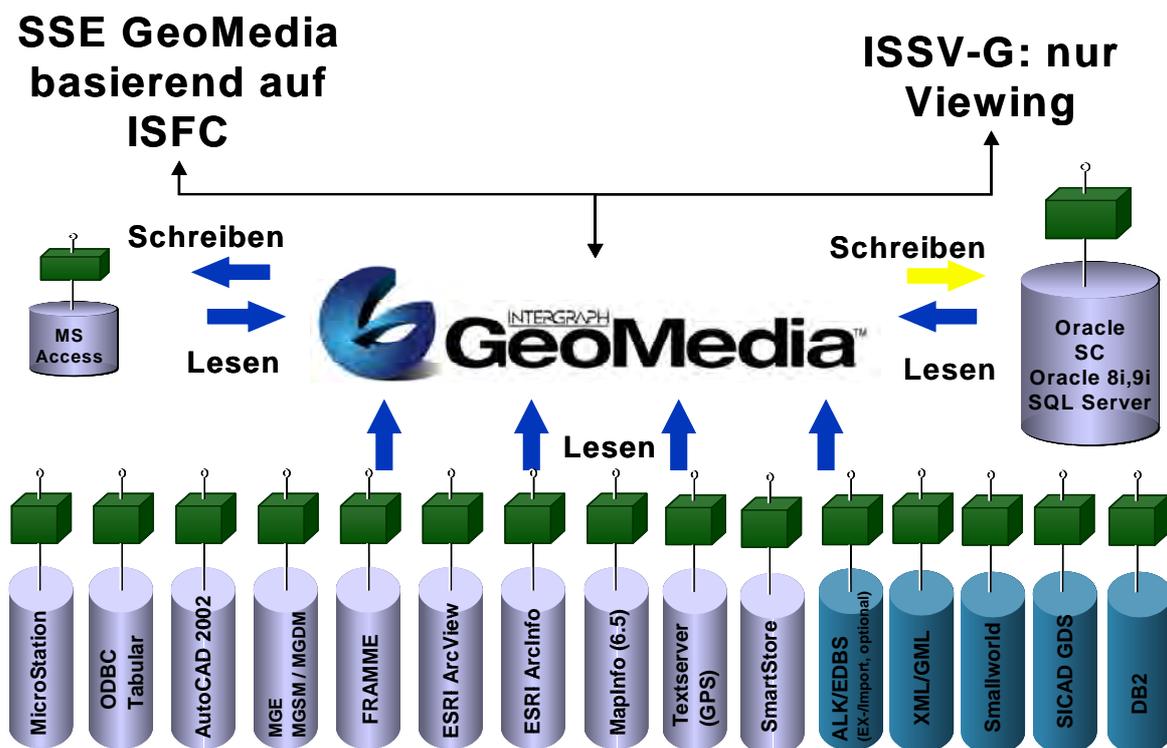


Abb. 2: Zweigeteilte Strategie: Datenerfassung und Viewing als separate Ausbaustufen

Mit der Einführung eines direkt auf ein GIS aufsetzenden Stereowerkzeuges eröffnen sich für Photogrammetrie-Anbieter natürlich auch neue Märkte. Nicht jeder GIS-Anwender will das GIS als Datenerfassungswerkzeug in Stereo verwenden, sondern lediglich 3-D-Qualitätskontrollen oder einfache Messungen innerhalb seines GIS durchführen. Dass dafür nicht für jeden Arbeitsplatz Tausende von Euro investiert werden wollen, liegt auf der Hand. Der Ruf

nach einem Low-Cost Stereoviewer wurde deshalb in den letzten Jahren immer lauter. Z/I arbeitet deshalb an einer zweigeteilten Stufenlösung: an einem Low-Cost Viewer und an einer High-End Stereo-Erfassungs-Oberfläche.

2.3.1 Viewing-Tool zur Qualitätskontrolle

Als erste Stufe der GeoMedia Anbindung wurde der ImageStation StereoViewer ISSV-G im März 2003 am Markt eingeführt. Im GeoMedia GUI wurde hier nur ein weiterer Menüpunkt eingeführt. Wählt man ihn an, öffnet sich innerhalb des GIS das aus der ImageStation gewohnte Stereo-Interface mit den bekannten, wenn auch leicht modifizierten Auswahlmenüs. So wählt man das photogrammetrische Projekt aus und das dazugehörige Stereomodell. In einer weiteren Oberfläche werden alle in GeoMedia verfügbaren Legendeneinträge gelistet und der Anwender kann auswählen, welche Vektoren er über das Stereomodell gelegt bekommen will. Ebenso wie in MicroStation sind multiple Views und Zoomfunktionen möglich, Werkzeuge für einfache Messungen wie Coordinate Readout, 3-D Strecke, Azimuth, Flächen, etc. sind vorhanden.

Die Bedienung und Steuerung des 3-D-Cursors erfolgt entweder mit photogrammetrischer Maus, wie sie z.B. in der SSK implementiert ist, oder aber durch eine handelsübliche 3-Button-Maus. In anderen Worten: der Viewer ist nicht nur ein einfaches Werkzeug zur 3-D-Messung, sondern auch eine preislich attraktive Alternative für die 3-D-Qualitätskontrolle, da die Hardwarekosten gering sind.

2.3.2 Stereoerfassung direkt in GeoMedia

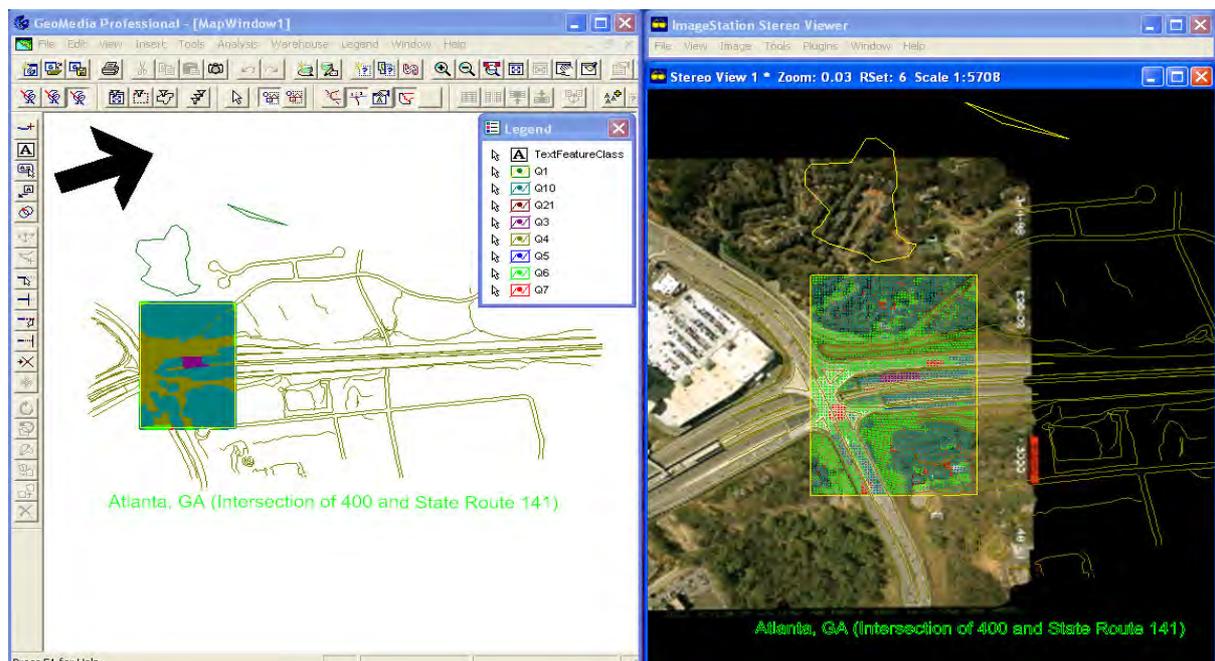


Abb. 3: Stereoerfassung in GeoMedia

Aufsetzend auf ISSV-G, dem Viewing-Tool für GeoMedia, gibt es ISFC-G, ImageStation Feature Collection für GeoMedia. Bei dieser High-End Ausbaustufe wurden die Erfassungswerkzeuge vom klassischen MicroStation-basierenden ISFC auf GeoMedia portiert. Nun hätte man gewiss auch nur die bestehenden Erfassungswerkzeuge innerhalb von GeoMedia Pro für ISFC-G verwenden können, dies wäre aber dem Anspruch des photogrammetrischen Da-

tenerfassers nicht gerecht geworden. Dies um so mehr wenn man bedenkt, dass die Erfassungswerkzeuge in einem CAD um Klassen besser und komfortabler sind, als die in einem GIS.

Die direkte Einbindung nach GeoMedia bringt aber noch andere offensichtliche Vorteile. So gibt es unzählige Anbieter im Markt, die Erweiterungen für GeoMedia geschrieben haben, die dem Anwender neue Perspektiven eröffnen. So kann z.B. der gleichzeitige Zugriff auf den selben Datensatz erfolgen, können Böschungsschraffen erzeugt werden oder über spezifische Fachschalen Daten aus ALK, ATKIS, BGRUND, EDDBS oder ALB endlich in Stereo bearbeitet werden.

2.4 Gehen wir nur in Richtung GIS?

Der Leser mag sich nun vielleicht fragen, ob alles, was er in den letzten Jahren gemacht hat, grundlegend falsch war, nur weil er nicht direkt im GIS gearbeitet hat. Dem ist natürlich nicht so. Es ist allgemein bekannt, daß die Werkzeuge zur Datenerfassung in CAD-Systemen weit aus besser sind, als die Werkzeuge, die dem Anwender in GIS zur Verfügung stehen. Dieser Tatsache trägt natürlich auch Z/I Imaging Rechnung. Deshalb wird es natürlich auch weiterhin möglich sein, direkt innerhalb der bewährten Kombination aus MicroStation und ImageStation Software zu arbeiten. Hier werden die beiden Module ISFC (Feature Collection) und P-Driver (CADMAP/dgn) systematisch weiter miteinander kombiniert, um dem Anwender ein hochproduktives Arbeitsumfeld zu bieten. Ziel ist es, aus beiden Teilen ein neues Modul ISCE (ImageStation Compilation Environment) zu generieren und den Spezifikationen unter Abschnitt 1.1 und 1.2 gerecht zu werden.

3. Die weitere Zukunft: Stereo-Informationssysteme

Wie bereits in Abschnitt 2 eingangs diskutiert, wird es in der GIS-Welt bald nur noch Datenpools geben, die alle möglichen Datenquellen beinhalten und je nach Anwendung gewählt werden. Diese Daten haben alle einen räumlichen Bezug (Vektoren, DTMs, georeferenzierte Orthophotos, Stereomodelle, etc.) und können somit in vollem Maße durch ein GIS verwendet werden. Die Datenvorhaltung wird in Zukunft durch Datenbanken gesteuert werden, wie dies z.B. heute schon in TerraShare von Z/I Imaging der Fall ist. In diesem Fall werden zwar die Files nicht direkt in der Datenbank gespeichert, um bei sehr großen Datenmengen die Performance nicht zu beeinträchtigen, dafür alle zum Bildfile gehörenden Metadaten inklusive des räumlichen Bezugs.

Da alle diese Metadaten in einer Datenbank verfügbar sind, ist es schon heute möglich, innerhalb eines GIS räumliche Abfragen zu starten. Dabei werden die räumlichen Abfragen verwendet, die standardmäßig im GIS vorhanden sind. Abfragen wie „Finde alle Bilder, die innerhalb eines Kilometers der geplanten Trasse liegen und nicht älter sind als 3 Jahre und eine Bodenauflösung von mindestens 30 cm haben“ sind heute leicht möglich. Als Resultat erscheinen dann die entsprechenden Footprints der Bilder und auf Doppelclick lassen sich diese im GIS öffnen. Nach dem selben Schema kann man sich in der Zukunft auch ein Szenario mit Stereomodellen oder ganzen Projekten vorstellen. Analysten haben dann die Möglichkeit, ohne großes photogrammetrisches Vorwissen nach Informationen und Stereomodellen zu suchen. Liegen Treffer bei der Suche vor, so kann der Analyst durch Auswählen des Stereo-Footprints automatisch in den Stereomodus wechseln und seine Messungen vornehmen. Um photogrammetrische Projekte oder Einstellungen muss er sich nicht kümmern, da dies das GIS für ihn übernimmt.

4. Zusammenfassung

In den vergangenen Abschnitten wurde diskutiert, welche Ansprüche der photogrammetrische Markt an die Anbieter photogrammetrischer Systeme stellt und warum dies bis vor kurzem nicht oder nur unzureichend zu realisieren war. Im Anschluss daran wurde vorgestellt, wie es heute möglich ist, innerhalb von der Z/I Imaging Produktionsumgebung „ImageStation“ flexiblere Modelle als bisher zu verwirklichen. So kann der Anwender gerade „die“ GIS- oder CAD-Plattform auswählen, die für seine Anwendungen oder Kundenaufträge am besten geeignet ist. Damit bestimmt er auch den Grad der Objektorientierung in seinen Datenbeständen. Z/I stellt dafür die Plattform für ein Stereodisplay über ein Software Development Kit (SSE SDK) direkt im GIS über einen Host Adaptor zur Verfügung, und zwar in der gewohnt performanten Art und Weise, wie man dies von einer ImageStation gewohnt ist - natürlich auch mit einer Anbindung an TerraShare. Die photogrammetrische Fortführung von topologisch aufbereiteten Datensätzen wird somit direkt ermöglicht, da man direkt im Original-GIS-Datensatz arbeiten kann. Der Forderung nach objektorientiertem Arbeiten wird somit Rechnung getragen, marktübliche GIS-Datenstrukturen werden problemlos unterstützt. Die folgenden Module werden Ihnen als Anwender hierfür zur Verfügung stehen:

Der Z/I-„Host Adaptor“, das Stereodisplay direkt im GIS:

- Er ist die programmierbare Schnittstelle (SSE SDK) zwischen Ihrer GIS/CAD-Anwendung und unseren gewohnt performanten Stereowerkzeugen.
- Mit ihm wählen Sie die GIS- oder CAD-Plattform, die für Ihre Anwendungen am besten geeignet ist.
- Dadurch bestimmen Sie, wie objektorientiert und topologisch strukturiert gearbeitet werden kann.

Die neue GeoMedia-basierende ImageStation Feature Collection ISFC-G:

- Um unseren Kunden, die keine eigene Schnittstelle programmieren wollen, eine GIS-basierende Produktionsumgebung anbieten zu können, portieren wir ISFC schrittweise auf GeoMedia.
- Mit GeoMedia haben Sie somit eine Oberfläche, die alle gängigen GIS-Formate weiterer Anbieter lesen und wichtige Formate schreiben kann.
- Vielfache optionale Fachschalen (zum Beispiel ALK-Fachschale) bieten die Möglichkeit, Ihren Stereoplotter mit den speziell für Ihre Anwendungen erforderlichen Erweiterungen anzupassen.
- Z/I bietet Ihnen damit die direkte photogrammetrische Erfassung und Fortführung von topologisch aufbereiteten Datensätzen im Original-GIS-Datensatz.

Unser neuer GeoMedia-basierender ImageStation Stereo-Viewer ISSV-G:

- ISSV erlaubt die Visualisierung, Qualitätskontrolle und einfache Messung GIS-basierender 3-D-Datensätze.

Beurteilung der Optischen Messkette durch Simulation der Aufnahmekonfiguration

KARSTEN RAGUSE, MANFRED WIGGENHAGEN¹

Zusammenfassung: Im Rahmen eines Gemeinschaftsprojektes wird die bestehende ISO-Norm für die Durchführung von Fahrzeugsicherheitsversuchen erweitert. Dabei wird die sogenannte Optische Messkette in ihre Teilprozesse untergliedert. Einer dieser Teilprozesse, die Planung der Aufnahmekonfiguration, wird im vorliegenden Artikel näher untersucht. Dabei wird die Netzgeometrie direkt für die entsprechende geplante Konfiguration berechnet, sodass aus den vorhandenen Ressourcen die beste gewählt werden kann. Die simulierten Aufnahmekonfigurationen werden in die Realität übertragen und miteinander verglichen. Somit können simulierte Erwartungswerte für die Objektgenauigkeit mit realen Ergebnissen der entsprechenden simulierten Konfiguration überprüft werden. Dabei wird kontrolliert, ob die Simulation im Rahmen der benötigten Genauigkeiten die Realität widerspiegelt und so in dieser einfachen Form zur Abschätzung genutzt werden kann.

1 Einführung

Die in diesem Artikel vorliegenden Untersuchungen und Ergebnisse sind Teil eines Gemeinschaftsprojektes zwischen der deutschen Automobilindustrie und dem Institut für Photogrammetrie und GeoInformation der Universität Hannover. Die Projektpartner aus der Automobilindustrie sind die Volkswagen AG, die Dr.-Ing. h.c. F. Porsche AG, die Audi AG, die BMW AG und die DaimlerChrysler AG. In diesem Gemeinschaftsprojekt wird eine bestehende ISO-Norm (ISO, 1986) für die Durchführung von Fahrzeugsicherheitsversuchen erweitert. Die Durchführung und Auswertung der Sicherheitsversuche wird als Optische Messkette bezeichnet. In der Erweiterung der ISO-Norm (ISO, 2002) wird eben diese Optische Messkette in ihre Teilprozesse unterteilt und jeder Bestandteil wird getrennt für sich untersucht und bewertet. Für jeden dieser Teilprozesse werden Kenngrößen zur qualitativen Beurteilung aufgestellt (WIGGENHAGEN & RAGUSE, 2003). Durch die Aufteilung und die unabhängige Bewertung wird die Rückverfolgung von Ungenauigkeiten in den Auswertungsergebnissen deutlich vereinfacht (RAGUSE & WIGGENHAGEN, 2003). Im vorliegenden Artikel wird einer dieser Teilprozesse, die Planung der Aufnahmekonfiguration, näher untersucht. Es werden reale Aufnahmekonfigurationen simuliert und die Ergebnisse der simulierten mit den realen Ergebnissen verglichen. Das Ziel ist es dabei, über die Simulation die optimale Aufnahmekonfiguration zu finden. Bei dieser Untersuchung werden nur die rein geometrischen Aspekte einer Aufnahmekonfiguration simuliert. Parameter aus den Bereichen Sensortechnik, Optik oder Beleuchtungstechnik werden bei dieser Untersuchung nicht berücksichtigt. Durch den Vergleich zwischen den simulierten und den realen Versuchen soll weiterhin überprüft werden, ob eine solche einfache, rein geometrische, Simulation für die in diesem Anwendungsgebiet geforderte Genauigkeit ausreichend ist, oder ob noch weitere Faktoren berücksichtigt werden müssen.

¹Institut für Photogrammetrie und GeoInformation, Universität Hannover, Nienburger Straße 1, 30167 Hannover,
Dipl.-Ing. Karsten Raguse
e-mail: raguse@ipi.uni-hannover.de
Dr.- Ing. Manfred Wiggenhagen
e-mail: wiggenhagen@ipi.uni-hannover.de

2 Aufnahmekonfiguration

Die dieser Untersuchung zugrunde liegende Anwendung ist die Beurteilung der Optischen Messkette von Fahrzeugsicherheitsversuchen. Deshalb sollen Kamerakonfigurationen überprüft bzw. simuliert werden, welche annähernd denen des realen Versuchsbetriebes entsprechen. Die Anzahl der Kameras sowie auch die räumliche Verteilung bei diesen Versuchen ist nur beschränkt frei wählbar. Da in diesem Anwendungsgebiet alle Kameras synchron die gleiche Szene aufnehmen müssen, ist eine beliebige Erhöhung der Anzahl der Standpunkte nicht möglich bzw. nicht wirtschaftlich. Die Variation der Kamerastandpunkte ist ebenfalls nur bedingt möglich, da der Bereich in dem die Kameras sowohl aus Sicht- wie auch aus Sicherheitsgründen aufgebaut werden können, beschränkt ist. In Abbildung 1 ist eine Konfiguration dargestellt, welche eine typische Kamerakonfiguration im Bereich von Fahrzeugsicherheitsversuchen widerspiegelt. In diese Konfiguration ist die Überlegung eingebracht, zusätzlich zu den bestehenden Kameras L1, L2, O1, O2, R1 und R2 zwei weitere Kameras L3 und R3 zu verwenden. Anhand von simulierten Daten soll im weiteren überprüft werden, welchen Vorteil die Erhöhung der Anzahl der Kameras hat.

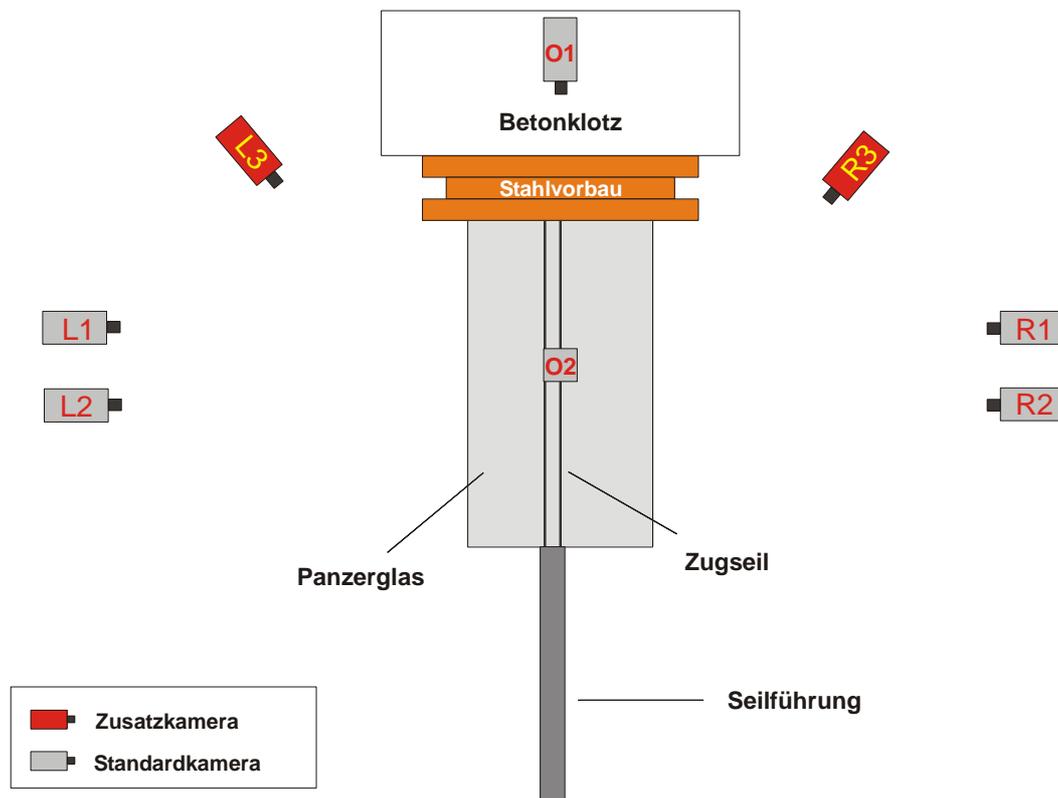


Abb. 1: Aufnahmekonfiguration bei Sicherheitsversuchen (ALEXANDER, 2003)

In der vorliegenden Untersuchung konnten keine realen Versuchsdaten genutzt werden. Es wurde vielmehr eine abstrahierte Konfiguration, ähnlich der Konfiguration in Abbildung 1, nachgestellt. Um die Simulationsergebnisse bewerten zu können, wurde die geplante Konfiguration in einem Modellversuch nachgestellt. Diese Versuchskonfiguration stellt die für die Simulationen benötigten Werte zur Verfügung.

3 Reale Versuchskonfiguration

3.1 Aufnahmekonfiguration des Testkörpers

Zur Überprüfung der Simulation der verschiedenen Aufnahmekonfigurationen wurde der in Abbildung 2 dargestellte Testkörper genutzt. Dieses 3D-Testfeld ist zur automatischen Zielmarkenidentifizierung mit codierten Zielmarken versehen worden. Des Weiteren sind im Messvolumen zwei kalibrierte Maßstäbe vorhanden. Der eine Maßstab dient als Systemmaßstab und der andere wird zur Kontrolle der Ergebnisse der Auswertung herangezogen.

Da bei den Aufnahmen im realen Versuchsbetrieb bei der Neupunktbestimmung von einer stabilen äußeren Orientierung ausgegangen wird, muss dies auch bei der Simulation und der Überprüfung der simulierten Werte erfolgen. Zu diesem Zweck wurde zunächst das Testobjekt in einem optimalen Rundumverband aufgenommen (RAUTENBERG & WIGGENHAGEN, 2002). Dazu wurden vom Testobjekt 20 Aufnahmen in drei verschiedenen Höhenstufen erstellt (vgl. Abb.3).

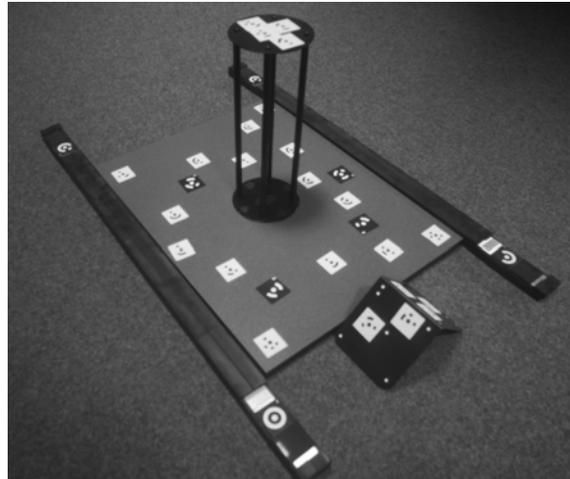


Abb. 2: Testobjekt mit codierten Marken und kalibrierten Maßstäben

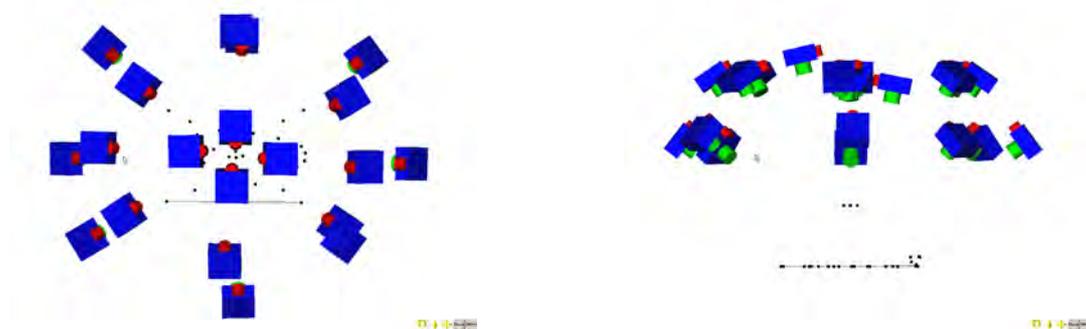


Abb. 3: Aufnahmekonfiguration (links Aufsicht; rechts Seitensicht)

Zur Auswertung des Rundumverbandes wurden von der 30 codierten Zielmarken auf dem Testobjekt nur die 24 Zielmarken genutzt, welche schwarz auf weißen Grund (Typ 1) sind. Die übrigen Zielmarken (weiße Marke auf schwarzen Grund; Typ 2) werden in der weiteren Untersuchung als Neupunkte betrachtet und zur Bewertung der jeweiligen Konfiguration und ihrer Simulation benötigt.

In den weiteren Untersuchungen werden die äußeren Orientierungen dieser 20 Aufnahmen als fest angesehen. Die 24 codierten Zielmarken vom Typ 1 werden als Passpunkte genutzt. Die Variationen in den Standardabweichungen der ausgeglichenen Objektkoordinaten beziehen sich allein auf die Strahlenschnittgeometrie der jeweiligen Aufnahmekonfiguration.

Die für diesen Versuch eingesetzte Kamera ist die Kodak DSC 460. Sie hat eine Sensorgröße von 3060 x 2036 Pixel bei einer Pixelgröße von 9 µm.

3.2 Auswertung der Versuchskonfiguration

Die 20 Aufnahmen des Testobjektes wurden mit den beiden Softwareprogrammen PhotoModeler Pro 5.0 der Firma EOS Systems Inc. und CAP der Firma K² Photogrammetry ausgewertet. Die automatische Bildkoordinatenmessung der codierten Zielmarken sowie auch die gesamte Näherungswertbeschaffung wurden mit dem Softwarepaket PhotoModeler Pro 5.0 durchgeführt. Zur statistischen Analyse wurden diese Ergebnisse mit der Software CAP weiterverarbeitet. Die Kalibrierung der eingesetzten Kamera wurde mit dem System CAP in einer Simultankalibrierung gerechnet.

3.3 Aufnahmekonfigurationen zur Beurteilung der Simulation

In Abbildung 1 ist eine Kamerakonfiguration dargestellt wie sie im Versuchsbetrieb im Automobilbereich eingesetzt wird. In dieser Untersuchung soll überprüft werden, welche Auswirkungen andere Aufnahmekonfigurationen, wie beispielsweise eine zusätzliche Kamera L3, auf die Konfiguration der beiden bestehenden Kameras O1 und L1 hat. Aus der Aufnahmekonfiguration des Testkörpers wurde dazu eine Teilkonfiguration entnommen. Die beiden Kameras 1 und 3 sind in etwa der Position wie die beiden Kameras O1 und L1. Aus der Versuchskonfiguration wurde die in Abbildung 4 dargestellte Teilkonfiguration mit acht Kameras entnommen. Um nur die Auswirkungen der Strahlenschnittgeometrie der jeweiligen Konfiguration zu bewerten, wurde die äußeren Orientierungen der Aufnahme Standpunkte als konstant angenommen und aus der vorherigen Berechnung der gesamten Aufnahmekonfiguration entnommen. Im Testfeld befinden sich fünf weitere noch nicht koordinatenmäßig bestimmte Punkte (codierte Zielmarken vom Typ2). Diese Punkte werden im weiteren über verschiedene Kombinationen der Kameras aus der Teilkonfiguration bestimmt. Als Bewertungskriterium für die jeweilige Konfiguration wird die Standardabweichung der Koordinaten dieser Punkte genutzt.

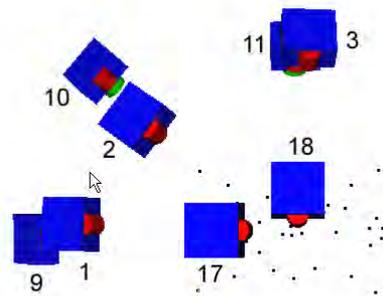


Abb. 4: Ausschnitt der Testkonfiguration mit Standpunktnummern (Aufsicht)

4 Simulation der Aufnahmekonfiguration

Die Simulation der Aufnahmekonfiguration erfolgt nicht wie bereits erwähnt auf der Basis von Parametern aus den Bereichen Sensortechnik, Optik oder Beleuchtungstechnik, sondern nur auf Basis der Netzgeometrie. Die Skalierung der Netzgeometrie wird in dieser Simulation durch die Messgenauigkeit der Bildkoordinaten festgelegt. Über diesen individuell festzulegenden Wert werden im weiteren auch die simulierten Standardabweichungen der Objektkoordinaten und die entsprechenden Fehlerellipsoide bestimmt.

4.1 Simulationswerkzeug zur Aufnahmekonfiguration

Das hier eingesetzte Simulationswerkzeug ist das Programm CoPlaTo, eine Entwicklung des Institutes für Photogrammetrie und GeoInformation der Universität Hannover. Dieses Pro-

gramm ist ein Simulationsprogramm auf der Basis einer Bündelblockausgleichung. Es wird damit nur die Aufnahmegeometrie simuliert und über eine Bündelausgleichung ausgewertet. Als Eingangswerte werden die äußeren Orientierungen der Kamerastandpunkte, die Kamerakonstante, die Koordinaten der Objektpunkte sowie die anzusetzende Bildkoordinatenmessgenauigkeit benötigt.

Das Ziel der Simulation ist es, statistische Aussagen über die jeweilige Netzgeometrie zu erhalten. Das Problem bei einer Simulation ist jedoch die Tatsache, dass nur die reine Netzgeometrie abgeschätzt werden kann, also die Form der Fehlerellipse der Objektkoordinaten. Die Größen der Ellipse bzw. die Standardabweichungen der Objektkoordinaten können nicht direkt bestimmt werden, da die Standardabweichung der Gewichtseinheit σ_0 a posteriori aufgrund der fehlenden realen Messwerte nicht berechnet werden kann. Um aber Aussagen über die erreichbare Standardabweichung der Koordinaten zu bekommen, wird stattdessen die Standardabweichung der Gewichtseinheit a priori zur statischen Analyse herangezogen. Diese ist bei gleichgewichteten Beobachtungen mit der anzusetzenden Messgenauigkeit der Beobachtungen gleichzusetzen.

Dieser Wert setzt somit die Skalierung der Netzgeometrie fest und wirkt sich direkt auf die Standardabweichungen der Objektkoordinaten aus. Um aussagekräftige Werte über die Simulation berechnen zu können, müssten in diesem Wert alle auftretenden Fehler, wie beispielsweise Unsicherheiten in der Kamerakalibrierung o.ä., zusammengefasst werden. In dieser Simulation wird zur Vereinfachung an dieser Stelle nur die Bildkoordinatenmessgenauigkeit angesetzt. Je nach Mess- und Auswertesystem werden verschiedenste Werte für diese Genauigkeit angegeben. Beim Programm PhotoModeler Pro 5.0 wird die Genauigkeit der automatischen Zielmarkenmessung mit 0.05 - 1 Pixel angegeben (EOS SYSTEMS INC., 2003, S. 210-213). Dieser Wert variiert je nach Größe der Zielmarken und dem Signal-Rausch-Verhältnis der Bilder. Für die Simulation wurde an dieser Stelle mit einer Messgenauigkeit von 0.1 Pixel gerechnet und somit die Standardabweichung der Gewichtseinheit σ_0 a posteriori mit 0.1 Pixel angenommen. Im Vergleich der realen Konfigurationen mit den simulierten wird diese Annahme im weiteren überprüft und entsprechend angepasst.

4.2 Vereinfachungen bei der Simulation

Bei dem Simulationsprogramm CoPlaTo werden drei wesentliche Vereinfachungen im Gegensatz zur realen Auswertung vorgenommen.

- die äußeren Orientierungen der Kamerastandpunkte werden für die Simulation als konstant angenommen; Standardabweichungen werden nicht berücksichtigt,
- die inneren Orientierungen der Kameras werden nur im Form der Kamerakonstante berücksichtigt; Standardabweichungen werden nicht berücksichtigt,
- die Messgenauigkeit der Beobachtungen wird als Standardabweichung der Gewichtseinheit σ_0 a posteriori angesetzt und auf 1/10 Pixel des jeweiligen Sensors festgelegt, wenn kein anderer Wert für σ_0 a posteriori zur Verfügung steht.

Die ersten beiden Vereinfachungen kommen durch die Anforderungen an das Laufzeitverhalten zustande. Diese Simulation soll in Echtzeit ablaufen, d.h. der Benutzer sieht die Auswirkungen der Änderungen der Aufnahmeconfiguration in Echtzeit. Die Annahme der Messgenauigkeit auf 1/10 Pixel ist ein grober Schätzwert. Dieser Wert wird genutzt, wenn keine anderen besseren Werte vorliegen. Bessere Werte sind beispielsweise Erfahrungswerte aus vorigen Versuchen bei gleicher oder ähnlicher Konfiguration.

4.3 Beurteilung der Simulation

Wie bereits erwähnt ist die Beurteilung der Simulation anhand der ermittelten Standardabweichungen der Objektkoordinaten nicht ohne weiteres möglich. Dieser Wert ist nur aussagekräftig, wenn das zugrundeliegende σ_0 a posteriori den wahren Gegebenheiten entspricht und dies kann in den meisten Fällen nicht ohne weiteres angenommen werden. Die Kernaussage der Simulation ist allerdings die Netzgeometrie, d.h. die Fehlerellipse der ausgeglichenen Objektkoordinaten. Die Skalierung dieser Ellipse ist aus den eben genannten Gründen ebenfalls nicht aussagekräftig. Allerdings ist die Relation zwischen den Achsen der Fehlerellipse und die Lage der Ellipse im Netz sowie auch die relativen Größenunterschiede zwischen verschiedenen Fehlerellipsoiden als Ergebnis dieser Simulation zu sehen.

5 Vergleich der Ergebnisse der Simulation mit den Ergebnissen der realen Aufnahmen

Die Auswertung verschiedener realer Teilkonfigurationen aus der Gesamtkonfiguration des Testkörpers ergibt ein σ_0 a posteriori von $0.36 \mu\text{m}$. In den weiteren Simulation für diese Aufnahmeconfiguration wird mit diesem Wert gerechnet. In Tabelle 1 sind die Ergebnisse der realen Aufnahmeconfiguration denen der simulierten Konfigurationen gegenübergestellt. Als Ergebnisse bzw. Bewertungsmaßstab der Konfiguration werden jeweils die mittleren Standardabweichungen der fünf Objektpunkte auf dem Testkörper genutzt. Die Simulation mit einem σ_0 a posteriori von $0.36 \mu\text{m}$ (Simulation 1) führt zu Ergebnissen, welche im Rahmen der Abschätzung identisch mit denen der realen Aufnahmeconfiguration sind.

Konf		Real	Simulation 1	Simulation 2
1-3	sx [mm]	0.0239	0.0231	0.0577
	sy [mm]	0.0219	0.0215	0.0537
	sz [mm]	0.0441	0.0433	0.1083
	σ_0 [μm]	0.3633	0.3600	0.9000
1-2-3	sx [mm]	0.0228	0.0215	0.0538
	sy [mm]	0.0186	0.0179	0.0448
	sz [mm]	0.0415	0.0404	0.1010
	σ_0 [μm]	0.3661	0.3600	0.9000
1-10-3	sx [mm]	0.0226	0.0212	0.0530
	sy [mm]	0.0189	0.0180	0.0451
	sz [mm]	0.0315	0.0302	0.0755
	σ_0 [μm]	0.3709	0.3600	0.9000

Tab. 1: Vergleich simulierter mit den entsprechenden realen Aufnahmeconfigurationen

Die Annahme für die Simulation lag im Vorfeld allerdings bei 0.1 Pixel. Das entspricht bei einer Pixelgröße von $9\ \mu\text{m}$ einem σ_0 a posteriori von $0.9\ \mu\text{m}$. Die Simulation würde dementsprechend mit einem Faktor von 2.5 schlechter abgeschätzt als sie in der Realität wäre. Die bei den jeweiligen Konfigurationen resultierenden größeren Fehlerellipsoide sind ebenfalls in Tabelle 1 dargestellt.

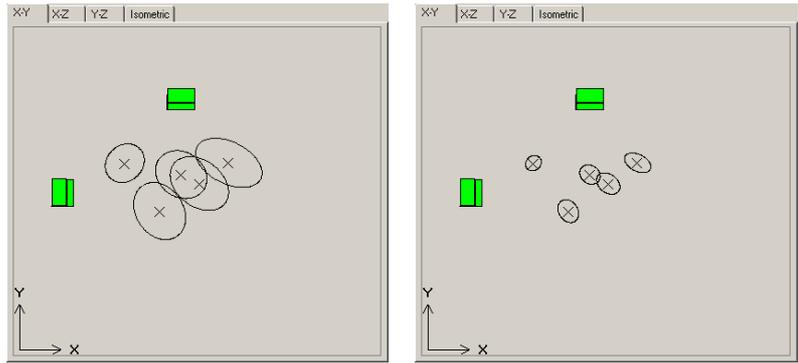


Abb. 5: Fehlerellipsoide der Konfiguration 1-3 in XY Ebene (links: $\sigma_0 = 0.9\ \text{mm}$; rechts: $\sigma_0 = 0.36\ \text{mm}$)

Die Lage und die Relation der einzelnen Fehlerellipsoide ist in beiden Abbildungen gleich. Einzig die Größe der Achsen hat sich um den Faktor 2.5 geändert.

In der Untersuchung wurden zwei Aufnahmekonfiguration 1–2–3 und 1–10–3 als mögliche Erweiterungen getestet. Die Verbesserung durch die Erweiterung der Konfiguration 1–3 ist zahlenmäßig ebenfalls in Tabelle 1 dargestellt. Die Kamera 2 befindet sich auf dem gleichen Höhengniveau, die Kamera 10 auf einem tieferen Höhengniveau wie die beiden anderen Kameras. Die Positionen der beiden Kameras 2 und 10 in X- und Y sind nahezu identisch. Die prozentualen Verbesserungen der erweiterten Konfiguration in bezug zur Ausgangskonfiguration sind in Tabelle 2 dargestellt. Die Variation im Höhengniveau der Konfiguration 1-10-3 bringt wie erwartet eine höhere Genauigkeit im Z-Wert.

Erweiterung der Konfiguration	Verbesserung in		
	X	Y	Z
1-3 \Rightarrow 1-2-3	7 %	17 %	7 %
1-3 \Rightarrow 1-10-3	8 %	16 %	30 %

Tab. 2: Vergleich der Verbesserungen durch die Erweiterung der Konfiguration

Diese Verbesserungen im Z-Wert der Konfiguration 1-10-3 werden ebenfalls über die Fehlerellipsoiden bei den jeweiligen Konfigurationen in Abbildung 6 bestätigt. In der Konfiguration 1-2-3 (vgl. Abb. 6 Mitte) ist erkennbar, dass in der Ausdehnung der Ellipsoide in Z-Richtung kaum Veränderungen aufgetreten sind. Die Ausdehnung in Y-Richtung ist geringfügig verringert worden, was auch aus der Zahlenwerten hervorgeht.

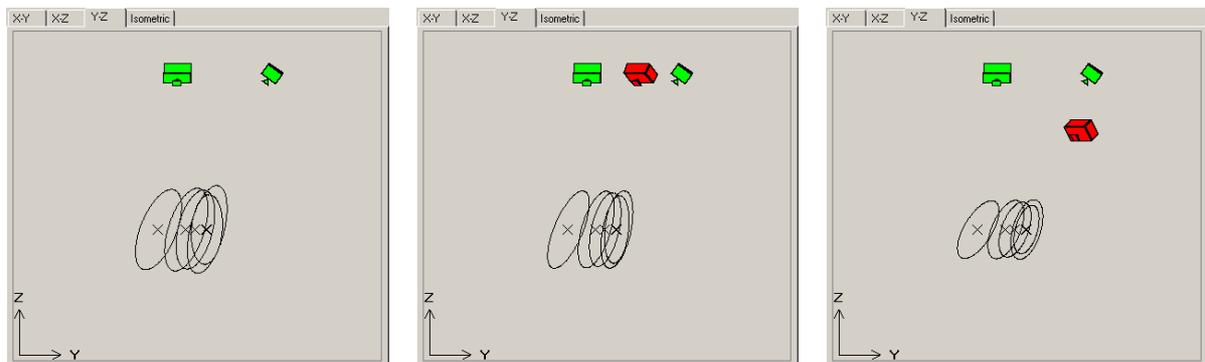


Abb. 6: Fehlerellipse der verschiedenen Konfiguration 1-3, 1-2-3 und 1-10-3 (YZ-Ebene)

Die Vereinfachungen, dass in der Simulation nicht alle Parameter der inneren Orientierung der eingesetzten Kamera berücksichtigt werden, wirkt sich in diesen Beispielen nicht negativ aus, da die untersuchten Punkte zum Großteil im zentralen Bereich des Bildes lagen und dort der Einfluss der radial-symmetrischen Verzeichnung gering ist. Die resultierenden Fehler sind in diesen Beispielen nicht signifikant.

Die Bewertung der jeweiligen Konfiguration über die Standardabweichungen in den Koordinatenrichtungen führt in manchen Fällen zu Problemen. In einigen Konfiguration ist die größte Ausdehnung der Fehlerellipse nicht in Achsrichtung und somit wird dieser Fehler nicht durch die Bewertung über die Standardabweichungen berücksichtigt.

6 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Artikel wurde eine Möglichkeit dargestellt, wie Aufnahmekonfigurationen über eine Simulation verbessert werden können. Die Auswirkungen von abweichenden Konfigurationen durch die Verschiebung der Aufnahmestandpunkte oder die Erweiterung um eine zusätzliche Kamera werden durch die Simulation schnell und wirtschaftlich verdeutlicht. Allerdings kann eine Simulation in dieser Form nur die reine Netzgeometrie bewerten. Die Skalierung des Netzes, also die absoluten Werte für die Standardabweichungen lassen sich nicht direkt bestimmen. Sie sind von dem angenommenen Wert für die Standardabweichung der Gewichtseinheit σ_0 a posteriori abhängig. An der Berechnung und der Darstellung der zugehörigen Fehlerellipse lässt sich diese Problematik am besten verdeutlichen. Die Relationen der Achsen zueinander und die Richtungen der Achsen des Ellipsoides lassen sich aus der Netzgeometrie bestimmen. D.h. diese Werte können direkt und zuverlässig aus der Simulation abgeleitet werden. Die wahren Größen der Achsen beziehen sich dagegen immer auf das gewählte σ_0 a posteriori und sind somit von den jeweiligen Annahmen für diesen Wert abhängig. Wenn bei der Simulation ein Wert für σ_0 a posteriori zur Verfügung steht und dieser Wert auch unter ähnlichen Versuchsbedingungen bestimmt wurde, können auch die Ergebnisse der Simulation als Erwartungswerte für dieses Aufnahmekonfiguration angenommen werden.

In dieser Untersuchung wurde zunächst für σ_0 a posteriori ein Schätzwert von 0.1 Pixel (0.9 μm) angenommen. Die Umsetzung dieser Aufnahmekonfigurationen in die Realität zeigt jedoch, dass dieser Wert in dieser Untersuchung viel zu pessimistisch angenommen wurde. Aus den Auswertungen der realen Aufnahmekonfigurationen ergab sich für das σ_0 a posteriori ein Wert von 0.04 Pixel (0.36 μm). Die Simulation würde somit Werte liefern, welche um den Faktor 2.5 schlechter wären, als sie in Wirklichkeit sind.

Generell sollten einer Simulation reale Versuchsergebnisse einer ähnlichen Konfiguration zugrunde liegen. Es müsste also ein σ_0 a posteriori einer aktuellen Aufnahmekonfiguration zur Verfügung stehen. Mit diesen kann im folgenden die Optimierung oder Erweiterung der Konfiguration simuliert werden. Wenn dieser Wert nicht vorliegt, können keine absoluten Aussagen in Form von Standardabweichungen der Objektkoordinaten gegeben werden. Es können dann nur verschiedene Konfigurationen miteinander verglichen und eine Genauigkeitsrelation zwischen der Konfigurationen ermittelt werden.

Die Nutzung der Simulation für Versuchskonfigurationen in Fahrzeugsicherheitsversuchen ist in dieser Form ein gutes Hilfsmittel zur Abschätzung. Allerdings ist die Bewertung der Aufnahmekonfiguration über die Standardabweichungen der Objektkoordinaten nicht optimal. In

weiteren Untersuchungen wird die Eignung von anderen Bewertungskriterien für die jeweilige Aufnahmekonfiguration analysiert. Des Weiteren wird der Einsatz von verschiedenen Strategien zur Optimierung der jeweiligen Konfiguration untersucht.

7 Danksagung

Die Autoren möchten sich an dieser Stelle bei den Projektpartnern für die stets gute und kooperative Zusammenarbeit bedanken. Die Projektpartner aus der deutschen Automobilindustrie sind die Volkswagen AG, die Dr.-Ing. h.c. F. Porsche AG, die Audi AG, die BMW AG und die Daimler Chrysler AG.

8 Literaturverzeichnis

- ALEXANDER, T., 2003: Anwendung photogrammetrischer Methoden zur 3D-Filmauswertung in Sicherheitsversuchen. – Diplomarbeit. Institut für Photogrammetrie und GeoInformation, Universität Hannover.
- EOS SYSTEMS INC., 2003: PhotoModeler Pro 5 - User Manual. – EOS Systems Inc.
- FRASER, C.S., 2001: Network Design. – In Atkinson, K.B.: Close Range Photogrammetry and Machine Vision. – Whittles Publishing, Scotland, S. 256-281
- ISO, 1986: Road Vehicles - Measurement Techniques in impact tests - Optical Instrumentation. – ISO/DIS 8721. International Organization of Standardization.
- ISO, 2002: Road Vehicles - Measurement Techniques in impact tests - Optical Instrumentation. – ISO/DIS 8721. Erweiterte Version. Stand November 2002. International Organization of Standardization.
- LUHMANN, T., 2000: Nahbereichsphotogrammetrie: Grundlagen, Methoden und Anwendungen. – Wichmann Verlag, Heidelberg.
- RAGUSE, K., WIGGENHAGEN, M., 2003: Qualitative Beurteilung photogrammetrischer Aufnahmekonstellationen im Nahbereich. – In Luhmann, T.: Photogrammetrie - Laserscanning – Optische 3D-Messtechnik. – Wichmann Verlag, Heidelberg.
- RAUTENBERG, U., WIGGENHAGEN M., 2002: Abnahme und Überwachung photogrammetrischer Messsysteme nach VDI 2634, Blatt1. – PFG - Photogrammetrie Fernerkundung Geoinformation, Nr. 2/2002, S. 117-124.
- WIGGENHAGEN, M., RAGUSE, K., 2003: Entwicklung von Kenngrößen zur Qualitätsbeurteilung optischer Messketten. – PFG - Photogrammetrie Fernerkundung Geoinformation, Nr. 2/2003, S. 125-134.

Einsatz des Open Source CAD Paketes „Open CASCADE“ für die stereoskopische Objekterfassung aus digitalen Messbildern

Frank Boochs, Stephan Eckhardt, Ben Fischer¹

Zusammenfassung: Der Beitrag stellt ein Konzept zur Integration eines Open Source CAD-Paketes in eine PC-gestützte Stereomessstation vor. Ziel dieser Kombination ist die weitestgehende Nutzung von vorhandenen CAD-Werkzeugen und deren Nutzbarmachung für photogrammetrische Messzwecke. Dabei sollen die Vorteile der objektorientierten Beschreibung und Verwaltung von Geometrien erhalten bleiben. Für die Integration sind Schnittstellen zwischen der punktbezogenen photogrammetrischen Messung und der objektbezogenen Datenstruktur der CAD-Welt zu schaffen und es muss ein Weg für die Überlagerung der Stereobilder mit den CAD-Objekten gefunden werden. Der eingeschlagene Weg wird vorgestellt und die unter Nutzung von Open Source Komponenten notwendigen Entwicklungen werden aufgezeigt.

1. Einleitung

Der Einsatz digitaler Messbilder ist heute aus dem photogrammetrischen Alltag nicht mehr wegzudenken. Neben den vielschichtigen Algorithmen, die zur automatisierten Extraktion von Inhalten eingesetzt werden können, bedarf es aber nach wie vor auch geeigneter Werkzeuge für die interaktive Messung. Im Segment der anspruchsvollen Spezialausrüstungen stehen hierzu leistungsfähige Stereoarbeitsstationen zur Verfügung, die mindestens den Funktionsumfang analytischer Plotter bereitstellen und professionelles Arbeiten in bezug auf die objektorientierte Erfassung von Geometrie- und Sachinformationen erlauben. Einer weiten Verbreitung dieser Systeme stehen allerdings die hohen Investitionskosten entgegen.

Als Alternative stehen einfachere Lösungen zur Verfügung, die einen geringeren Leistungsumfang aufweisen, aber auch zu deutlich günstigeren Konditionen angeboten werden. Vielfach bestehen diese Systeme aus einer Kombination eines photogrammetrischen Messviewers mit einem gängigen CAD-Paket, wie z.B. Microstation oder AutoCAD (BENNING, 1997, HILGERS, 1998, STREILEIN, 1996). Damit ist seitens der Modellierung und Weiterverarbeitung der Objekte der Funktionsumfang des CAD-Paketes gegeben, womit sich aufwändige Entwicklungen in diesem Bereich ersparen lassen.

Nachteil dieser Konzepte ergeben sich neben der Notwendigkeit, die jeweilige CAD Software erwerben zu müssen vor allem durch Beschränkungen für den photogrammetrischen Messprozess. Es stehen im allgemeinen lediglich 2D-Messviewer zur Verfügung, in denen die Messbilder dargestellt und ausgewertet werden. Echte stereophotogrammetrische Messungen sind nicht ohne weiteres möglich, da dies die von den CAD-Paketen bereitgestellten Schnittstellen nicht erlauben. Außerdem geht die Integration oft nicht so weit, dass im Zuge der Datenerfassung das Objekt in seiner kompletten Struktur beschrieben werden kann bzw. wird und z.B. die Topologie in einem weiteren Schritte erzeugt werden muss.

¹ Prof. Dr. Frank Boochs, Dipl.-Ing. (FH) Stephan Eckhardt, Dipl.-Ing. (FH) Ben Fischer, Institut für Raumbezogene Informations- und Messtechnik, FH Mainz, Holzstr. 36, 55116 Mainz, email: i3mainz@geoinform.fh-mainz.de

Abhilfe lässt sich schaffen, sofern man als Entwickler auch Einfluss auf die Einbindung des Messprozesses in die CAD Umgebung nehmen kann und damit eine weitergehende Integration von Photogrammetrie und CAD-Welt möglich wird. Dies ist beispielsweise für das hier verwendete Open Source Paket der Fall. Das Toolkit stellt von der Modellierung geometrischer Objekte über deren Verknüpfung und Manipulation bis zur Darstellung alle wichtigen CAD Funktionalitäten zur Verfügung und liegt im Sourcecode vor.

An diese Software ist ein photogrammetrischer Stereoviewer angebunden worden, wodurch die Vorteile einer räumlichen Bildmessung mit dem CAD-Umfeld verknüpft werden.

2. Aspekte einer photogrammetrischen 3D CAD-Lösung

CAD-Softwarepakete haben sich mittlerweile zu sehr leistungsfähigen Werkzeugen entwickelt. Sie stellen alle wichtigen Funktionalitäten bereit, die auf dem Weg von der Datenerfassung hin zu komplexen Simulationen oder anderen, auf den erfassten Daten beruhenden Manipulationen anfallen. Eine wichtige Grundlage für dieses Leistungsvermögen ist die Beschreibung der realen oder konstruktiven Welt durch geeignete Datenstrukturen. Hier haben sich objektorientierte Techniken durchgesetzt. Sie erlauben es, die Objekte in ihre elementaren Bestandteile zu zerlegen und diese in geeigneter Weise zum Gesamtobjekt zu vereinigen. Damit ist es auf einfache und effiziente Weise möglich, auch komplizierte Geometrien zu erzeugen und zu verwalten (vgl. Abb.1).

Photogrammetrische Maßnahmen stehen am Beginn denkbarer CAD-Prozessketten. Auch hier spielt die Komplexität des Objektes eine Rolle, weil schon in der Erfassung die nötigen Strukturen geschaffen werden müssen. Es ist daher nicht nur im Sinne der durchgängigen Verwendung einheitlicher Datenstrukturen, sondern auch im Hinblick auf die Flexibilität und Leistungsfähigkeit objektorientierter Beschreibungsformen sinnvoll, schon im photogrammetrischen Erfassungsprozess objektorientierte Konzepte einzusetzen. Diese sind im Bereich der CAD-Software weit entwickelt und bieten sich für eine Verknüpfung mit der bildgestützten Messung an, weil sie eine Vielzahl wichtiger Grundfunktionen bereitstellen, wie z.B.:

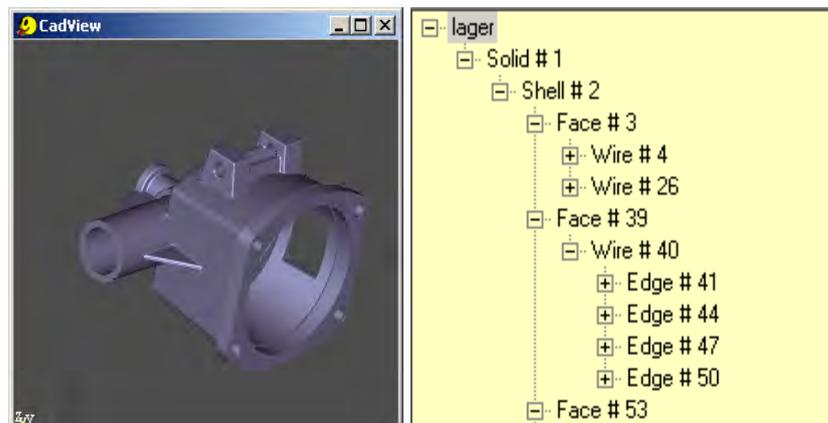


Abb. 1: CAD-Objekt mit seiner B-Rep Beschreibung

- Konstruktion elementarer Geometrien
- Aufbau der Topologie
- Verknüpfungsoperationen
- Editierfunktionen

Der photogrammetrische Teil im Lösungskonzept kann sich damit auf die Bereitstellung der Objektpunkte beschränken, die zum Aufbau der Geometrien benötigt werden. Die Objekt-

punkte erhält man durch Messung in geeignet aufbereitetem Bildmaterial, das in entsprechenden Fenstern dargestellt wird. Die meisten CAD-Pakete bieten passende Schnittstellen an, solange sich die Messung auf Einzelbilder beschränkt. Ein 2D-Messbild unterscheidet sich eben nicht grundlegend von anderen 2D-Fenstern, die üblicherweise für die konstruktive Erzeugung von Objekten verwendet werden.

Die Verwendung von Einzelbildern schränkt das photogrammetrische Potenzial jedoch unnötig ein. Gerade für geometrisch komplexe Objekte kann nicht grundsätzlich davon ausgegangen werden, ausreichend viele gut identifizierbare Punkte zu finden, die eine Punktbestimmung aus zwei und mehr Einzelansichten erlaubt. In manchen Konzepten wird daher auch durch simultane Verwertung aller, aus unterschiedlichen Ansichten stammenden Messungen versucht, die Qualität zu steigern und Einschränkungen durch Einzelperspektiven auszugleichen. Die besten Voraussetzungen für eine interaktive, von Einschränkungen freie 3D-Datenerfassung bietet aber immer noch eine stereoskopische Betrachtung.

Insofern bietet die Kombination von objektorientierten Techniken zur Beschreibung und Verwaltung von Objekten zusammen mit einer stereoskopischen Punkterfassung sehr gute Voraussetzungen für eine effiziente 3D-Datenerfassung.

3. OpenCASCADE

Die Anbindung eines Stereoviewers an bestehende CAD-Pakete ist konzeptionell nicht vorgesehen. Marktführende System (z.B. AutoCAD) bieten zwar Anwendungsschnittstellen (API), mit denen Benutzer die Programmoberfläche leicht anpassen, Operationen zusammenfassen und zusätzliche kleinere Funktionen hinzufügen kann, bauen aber immer auf 2D-Fenstern auf. Stereoskopie verlangt aber die unabhängige Kontrolle zweier verschiedener Bilder in einem Viewer und dies ist über die Programmierschnittstellen der CAD-Pakete nicht direkt gegeben.

Eine Integration von Stereoskopie lässt sich im Prinzip nur über die direkte Einbindung eines Stereofensters in die Visualisierungskomponenten eines CAD-Paketes erreichen. Das setzt allerdings den direkten Zugriff auf die CAD-Software voraus und lässt sich mit kommerzieller Software nicht realisieren.

Als Alternative kommt Open Source Software in Frage. Ein bekanntes und weit verbreitetes CAD-Paket ist OpenCASCADE (OPENCASCADE, 2003), das auf Entwicklungen von Matra zurückgeht. Diese Software bietet ein umfangreiches Rahmenwerk, um CAD-Anwendungen in objektorientierter Sicht auf einer hohen Abstraktionsebene zu implementieren. Der Programmierer findet ein fertiges Klassenumfeld für den Umgang mit komplizierten geometrischen Daten vor, mit dem er viele Anforderungen abdecken kann.

OpenCASCADE stellt dabei alle wichtigen Bestandteile für

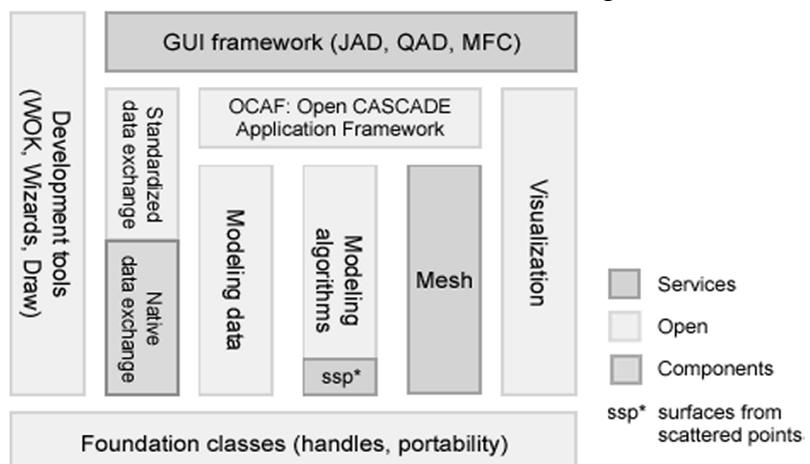


Abb. 2: Modulstruktur von OpenCASCADE

die Erzeugung, Verwaltung, Modellierung und Darstellung von 3D-Objekten zur Verfügung, wie der Modulstruktur (vgl. Abb.2) zu entnehmen ist. Nur einige wenige Pakete sind dabei nicht offen gelegt, könnten aber dennoch durch Erwerb entsprechender Lizenzen eingebunden werden.

Angesichts der vielen, die meisten Aufgaben im Umgang mit CAD-Daten anfallenden Arbeitsschritte abdeckenden Softwarekomponenten ist OpenCASCADE gut für die Entwicklung spezieller Anwendungen geeignet und bietet damit auch gute Voraussetzungen für die Integration in eine stereophotogrammetrische Umgebung an.

4. Stereoskopie am PC

4.1. 3D-Betrachtung

Für die räumliche Betrachtung von Stereobildpaaren bedarf es eines geeigneten Bildtrennungsverfahrens und einer darauf abgestimmten Bildsteuerung. In Frage kommen primär zeitliche Trennung oder Polarisation. Aus der Analogphotogrammetrie bekannt ist auch noch die Anaglyphentechnik, die aber Einschränkungen in der visuellen Qualität besitzt.

Angesichts der weiten Verbreitung von 3D-Spielen existiert mittlerweile ein breites Angebot an entsprechender Hardware. Dies gilt für 3D-fähige Brillen wie auch für die zur Bildsteuerung notwendige Graphikhardware. Das breite Angebot an Lösungen macht Stereoskopie an PCs erschwinglich und erlaubt im Prinzip, jeden PC für stereophotogrammetrische Zwecke zu nutzen. Setzt man das Farbtrennungsverfahren ein, dann ist sogar jeder PC ohne jegliche Änderungen für die räumliche Bildbetrachtung nutzbar.

4.2. DISTA

Neben der Hardware bedarf es darauf abgestimmter Software, die eine unabhängige Darstellung und Steuerung der Bilder erlaubt. Hier gibt es verschiedene Alternativen. Im Bereich der kommerziellen und systemabhängigen Software existieren Lösungen, die dem Benutzer unterschiedliche Funktionen zur Verwaltung stereoskopischer Bildfenster bereitstellen (z.B. Open Inventor 4.0 (TGS VISUAL CONCEPTS, 2003), Microsoft Foundation Classes). Die mit den genannten Lösungen verbundenen Einschränkungen ergeben sich aus den anfallenden Kosten bzw. der Bindung an ein bestimmtes Betriebssystem.

Als Alternative kommt die Nutzung des eigentlichen, den meisten Graphikpaketen zugrunde liegenden Standards OpenGL in Frage. OpenGL ist in den meisten Entwicklungsumgebungen enthalten und wird von den Anbietern der Graphikkarten durch Integration Hardware-naher Lösungen für die wichtigsten Funktionen unterstützt. OpenGL ist plattformunabhängig und kostenfrei.

Auf Basis von OpenGL und wxWindows, einem weiteren plattformunabhängigen Werkzeug, das für die Erstellung grafischer Benutzerschnittstellen eingesetzt wird, ist eine stereophotogrammetrische Messumgebung entwickelt worden (DISTA, 2003), die als Grundlage für die Integration der CAD-Software dient (BOOCHS, 2000). Die Entwicklung ist für die stereoskopische Auswertung von photogrammetrischem Bildmaterial gedacht und stellt die notwendigen Werkzeuge für die 3D-Betrachtung, Bewegung und Messung bereit. Die Software arbeitet nach Fixed-Cursor-Technik, erlaubt unterbrechungsfreie Messung im gesamten Modell und besitzt keine Beschränkungen in der Größe des Bildmaterials.

5. Integration und Nutzung von OpenCASCADE Komponenten

Einen Überblick zum gewählten Integrationskonzept gibt Abbildung 3. Hierbei ist die DV-technische Integration relativ einfach, da OpenCASCADE in C++ implementiert ist und damit direkt in die eigene Software, die ebenfalls in C++ vorliegt, einbezogen werden kann. Im Hinblick auf die funktionelle Integration sind allerdings einige Anpassungen notwendig. Dies gilt für die Erzeugung und die Darstellung der Objekte.

5.1. Konstruktion

Für die Erzeugung der Objekte sind Schnittstellen erforderlich, weil entgegen der Vorgehensweise im konstruktiven Bereich, in dem Objekte über die direkte Festlegung von geometrischen Basiselementen (Durchmesser, Länge, Krümmung,...) erzeugt werden, dies in Bildern durch die gerade sichtbaren Punkte am Objekt geschehen muss (vgl. Abb. 4.). Damit können die Objekte nicht über die in OpenCASCADE vorhandenen Bibliotheksroutinen generiert werden, sondern müssen erst durch Schnittstellenroutinen, die die Punktmessungen nach einer festzulegenden Konstruktionsvorschrift in die Datenstruktur von OpenCASCADE transformieren, erzeugt werden (vgl. Abb.5). Sobald die Objekte in der CAD-Datenstruktur abgebildet sind, können allerdings alle sonstigen Operationen, wie Verschneidungen, Vereinigungen etc. unter Verwendung der Bibliotheksroutinen von OpenCASCADE direkt angewandt werden. Dies erspart die Schaffung von unzähligen Schnittstellenroutinen, da man sich auf elementare Objekte beschränken kann.

Im übrigen hat die Verwendung von eigenen Konstruktionsschnittstellen auch den Vorteil, in gewünschter Weise vorhandene Einschränkungen in der Sichtbarkeit kompensieren zu können. Hier wirkt sich auch der Vorteil einer stereoskopischen Datenerfassung aus. Stereoskopie benötigt für die Punktmessung keine besonders hohen

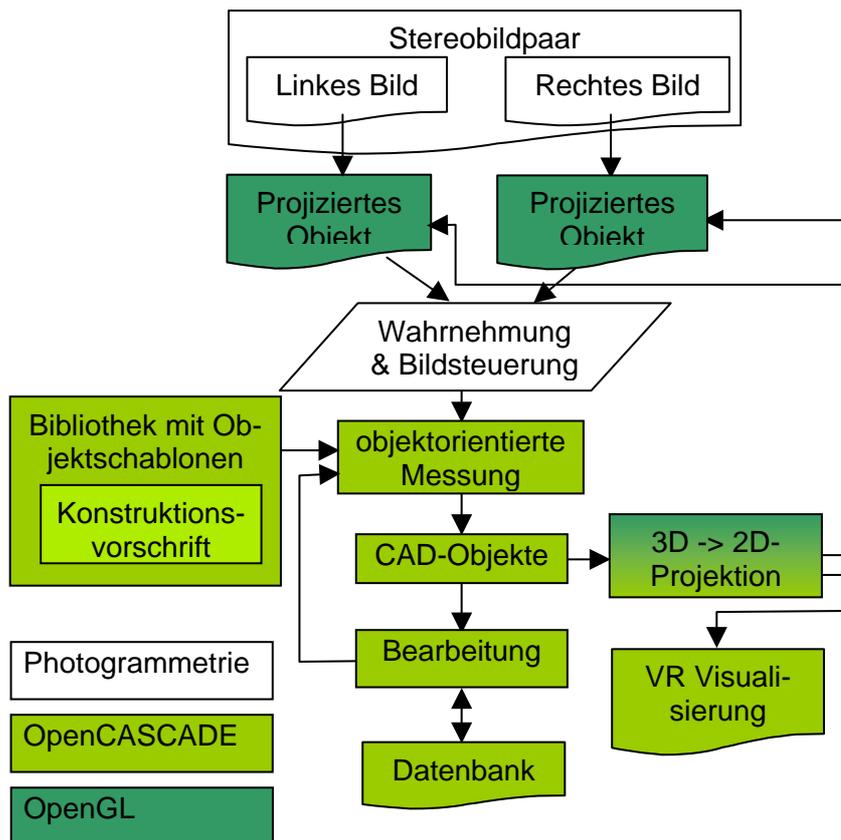


Abb. 3: Integration von OpenCASCADE und DISTA

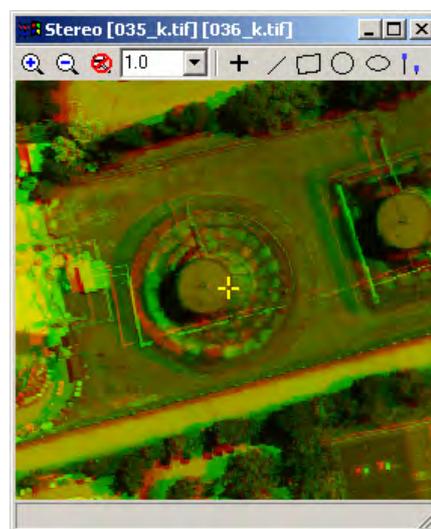


Abb. 4: Objekt in einem Luftbild

Kontraste, wodurch auch 3D Punkte an beliebigen Stellen auf Objektkonturen bestimmt werden können. Dies kann man für die überbestimmte Ermittlung der Geometrieparameter verwenden oder aber für die Überwindung von Schwierigkeiten, die auf die Wirkung der Zentralprojektion zurückgehen, nutzen (vgl. Abb.6).

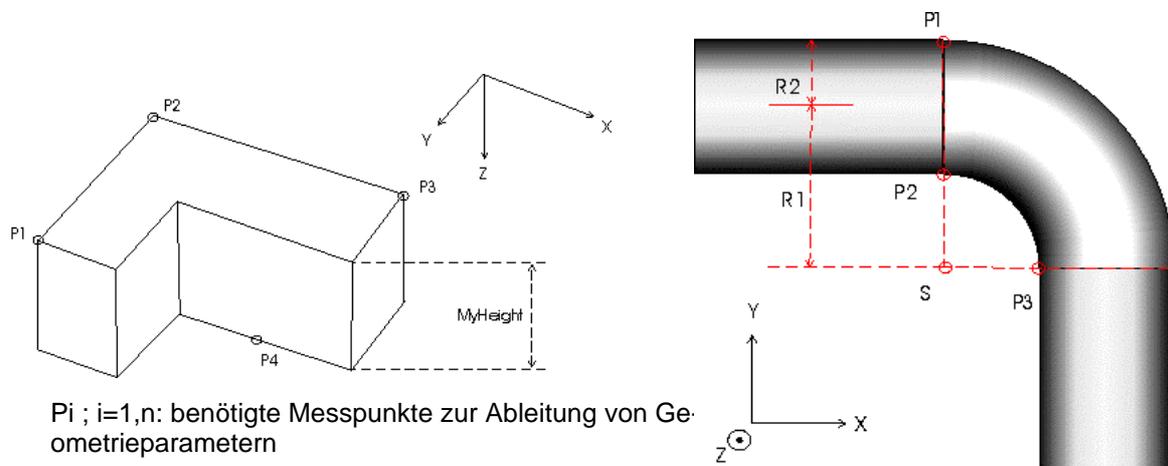


Abb. 5: Konstruktionsvorschriften zur Erzeugung von CAD-Objekten

Letztere kann zur Folge haben, dass nicht alle geometrischen Bestandteile (in Abb. 6: d) direkt erfasst werden können.

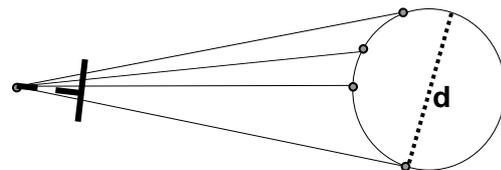


Abb. 6: Nutzung von Überbestimmungen

5.2. Projektion

Der Projektion der erfassten Objekte kommt insofern eine hohe Bedeutung zu, weil der interaktive Messprozess durch die Überlagerung der Bildinformation mit den Konstruktionsergebnissen gesteuert wird und damit für die Vollständigkeit und die Genauigkeit verantwortlich ist. Entsprechend ist die Superimposition der Geometrie Bestandteil aller operationellen Erfassungssysteme. Allerdings liegt hierin auch der Grund für die Einschränkung auf Einzelbildviewer, da Stereoskopie von Standard CAD-Programmen nicht angeboten wird.

Aber auch der Unterstützung des Beobachters mit weitergehenden Hilfen sind schnell Grenzen gesetzt. Sinnvolle Hilfe kann über die modellgestützte Datenerfassung erreicht werden, in der nicht einzelne Punkte die Geometrie bestimmen, sondern vorgewählte Geometrietypen auf das Objekt eingepasst werden (ERMES ET.AL., 2000). Daneben sind Vereinfachungen denkbar, indem Methoden der Bildanalyse für die Detektion von Konturen eingesetzt werden und diese als Beitrag für die Definition der Objekte zur Verfügung stehen (V.D. HEUVEL F., 2000). Beides setzt eine enge Verzahnung von CAD-Welt und Photogrammetrie im Bereich der gemeinsamen Darstellung von Bild- und Objektdaten voraus.

Dem muss auch hier Rechnung getragen werden, indem für die Projektion der in OpenCASCADE verwalteten Objekte in das Stereobildpaar entsprechende Komponenten zu schaffen sind. Allerdings ist dies nicht durch direkte Nutzung der in OpenCASCADE enthaltenen Visualisierungsroutinen möglich, da auch hier nur 2D-Viewer unterstützt werden. Lediglich in Bezug auf die Darstellung der gemessenen Objekte in einem separaten, von den Messbildern

unabhängigen VR-Kontext können direkt die Methoden aus dem OpenCASCADE Umfeld genutzt werden (vgl. Abb. 3). Der Beobachter erhält damit allerdings ein weiteres Werkzeug zur visuellen Kontrolle des Datenbestandes.

Die geschickteste Lösung für die Superimposition der Stereobilder mit den CAD-Daten ergibt sich durch die Entwicklung eigener OpenGL-Routinen. In diesem Graphikstandard existieren alle notwendigen Methoden zur projektiven Darstellung von Objekten, die für eine Nachbildung der Kameraperspektive benötigt werden. Von Vorteil ist hierbei natürlich der Umstand, dass auch die Darstellung der Messbilder und die gesamte Bildsteuerung in den photogrammetrischen Komponenten über OpenGL geregelt werden und sich so ein einheitliches Verarbeitungskonzept ergibt. Seitens OpenCASCADE werden in diesem Zusammenhang die erforderlichen Methoden für den Zugriff auf die in der Datenbank enthaltenen Objekte bereitgestellt, auf die dann die eigenen Visualisierungsroutinen angewandt werden.

Auf diesem Weg lässt sich auch eine direkte Integration der projektiven Darstellung der CAD-Objekte in die Mechanismen zur Steuerung der Bildbetrachtung erreichen, die im Zuge der hier gewählten Fixed-Cursor Bewegungstechnik auch etwas höheren Kontrollaufwand verlangen und entsprechend auf die CAD-Projektion anzuwenden sind.

6. Fazit

Mit dem vorgestellten Konzept wird ein Ansatz zur Integration frei verfügbarer CAD-Software in eine stereophotogrammetrische Messumgebung aufgezeigt. Die Vorteile liegen einerseits in der Nutzung des Stereoeindrucks für den Prozess der Punktmessung und andererseits in der objektorientierten Datenerfassung. Letztere erlaubt, die Objekte direkt mitsamt ihrer Topologie zu erzeugen und sie mit den leistungsfähigen CAD-Werkzeugen weiterverarbeiten zu können.

Die hauptsächlich notwendigen Entwicklungen liegen in der Anpassung des photogrammetrischen Messvorgangs durch Schaffung entsprechender Konstruktionsmethoden und in der Bereitstellung der Werkzeuge zur Überlagerung des Stereobildpaares mit den projizierten CAD-Objekten.

Von erheblichem Vorteil ist auch die Nutzung von Standards im Bereich der Computergraphik, wodurch auf umfangreiche Quellen aus dem Open Source Bereich zurückgegriffen werden kann.

7. Literaturverzeichnis

- BENNING, W., 1997: PHIDIAS-MS - Eine digitale Photogrammetrieapplikation unter Microstation für Nahbereichsanwendungen. AVN, Nr.1, S. 16-25.
- BOOCHS, F., GEHRHOFF, A., NEIFER, M., 2000 : An object oriented stereo system for 3D-measurements. IAPRS, Vol. XXXIII, Part 5
- DAVIS T., NEIDER J., WOO M., 1993. OpenGL Programming Guide, Addison-Wesley, New York
- DISTA, 2003: <http://www.dista.fh-mainz.de>
- ERMES P., V.D. HEUVEL F., VOSELMAN G., 2000: A Photogrammetric Measurement Method Using CSG-Models. IAPRS, XXXIII, Part 5
- G. HILGERS, H.-J. PRZYBILLA, D. WOYTOWICZ, 1998. The digital photogrammetric evaluation system PHAUST for as-built documentation. IAPRS, Vol. 32, Part 5, pp. 226-229.

KILGARD M. J., 2000. Avoiding 16 Common OpenGL Pitfalls, <http://www.opengl.org>.
OPENCASCADE, 2003: <http://www.opencascade.org>
OPENGL, 2003: <http://www.opengl.org>
OPEN INVENTOR, 2003: <http://www.tgs.com>
SMART J., 1999. wxWindows Documentation
A. STREILEIN, 1996. Utilization of CAD models for the object oriented measurement of industrial and architectural objects. IAPRS, Vol. 31, Part B5, pp. 548-553.
V.D. HEUVEL F., 2000: Trends in CAD-Based Photogrammetric Measurement. IAPRS, Vol. XXXIII, Part 5
WXWINDOWS, 2003: <http://www.wxWindows.org>

Untersuchungen des Laserscanners IMAGER 5003 von Zoller & Fröhlich

RUDOLF STAIGER¹, MICHAEL ETTTEL²

Zusammenfassung: Der 3D-Laserscanner IMAGER 5003, ein sog. Panorama-Scanner, ermöglicht innerhalb weniger Minuten die vollständige Erfassung komplexer räumlicher Strukturen, durch eine vollautomatische, kombinierte Winkel- und Streckenmessung mit hoher Punktdichte. Das seit 2002 erhältliche System zeichnet sich vor allem durch die sehr hohe Messrate von bis zu 500 000 Punkte /s aus.

Im Rahmen dieser Veröffentlichung werden zunächst die Hard- und Softwarekomponenten des IMAGER 5003 vorgestellt. 3D-Laserscanner sind prinzipiell tachymetrisch messende Systeme, deren Rohdaten aus einer Strecke und zwei zugeordneten Winkeln bestehen. Die Funktionsweise der Winkel- und Streckenmessung werden beschrieben. Neben der Basismesstechnik ist die Verknüpfung einzelner Szenen bzw. die Transformation in geodätische Koordinatensysteme für die geometrische Qualität der Punktwolken von entscheidender Bedeutung.

Auf der Basis umfangreicher Untersuchungen am Fachbereich Vermessungswesen der Universität Duisburg-Essen wird die Genauigkeit einzelner Messkomponenten bzw. des gesamten Messsystems beurteilt.

1 Einleitung

Seit wenigen Jahren bieten terrestrische Laserscanner die Möglichkeit, im Entfernungsbereich von 0,1 bis 100 m, künstliche und natürliche Objekte durch Punktwolken schnell und detailreich zu approximieren. Die 4D-Punktinformation setzt sich dabei aus den 3D-Koordinaten (x, y, z) und der zugehörigen Reflektivität i jedes einzelnen Objektpunktes zusammen (LUHMANN, 2000).

1.1 Typisierung der terrestrischen Laserscanner

Terrestrische Laserscanner sind ortsgebundene Messsysteme, die nach dem Triangulations- oder Polarmessprinzip ihre Umgebung erfassen (Abb. 1). Triangulationsscanner eignen sich besonders für kleine Objekte, wie archäologische Fundstücke, Statuen, Modelle oder Skulpturen. Für ausgedehnte Objekte sind dagegen lange Basen erforderlich, um ungünstige Schnittwinkel zu vermeiden.

Scanner, die polare Messelemente nutzen, können grob in Panorama- und Kamera-Scanner unterschieden werden. Panorama-Scanner sind für eine Erfassung „aus dem Inneren“ des Objektes konzipiert (z.B. Innenräume), während sich Kamera-Scanner, bedingt durch den begrenzten Erfassungsbereich, für die Objekterfassung „von außen“ anbieten.

¹ Prof. Dr.-Ing. Rudolf STAIGER, Universität Duisburg-Essen, FB 11- Vermessungswesen; Labor für geodätische Messtechnik; Henri-Dunant-Strasse 65; D-45 131 Essen
e-mail: rudolf.staiger@uni-essen.de

² Dipl.-Ing. Michael ETTTEL, Hochstraße 24; 40 764 Langenfeld
293

2 Der Laserscanner IMAGER 5003 von Z & F

Das Lasermesssystem IMAGER 5003 der Fa. Zöllner & Fröhlich ist ein Panorama-Scanner, dessen beide Modellvarianten sich hauptsächlich im Eindeutigkeitsbereich der Streckenmessung (siehe 2.4) und dem vertikalen Auflösungsvermögen unterscheiden.

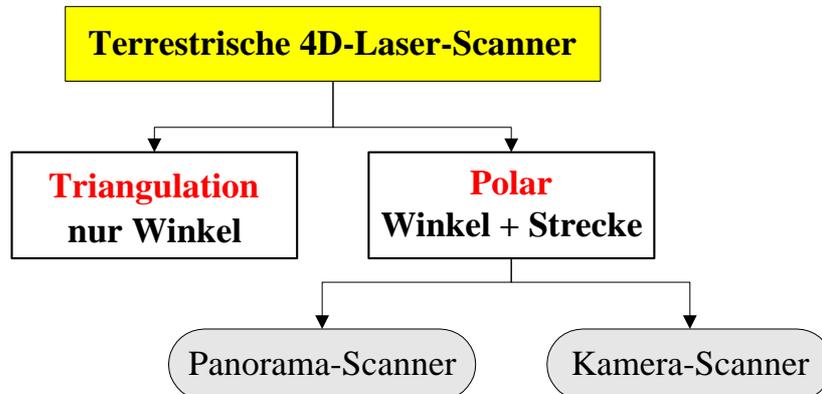


Abb. 1: Typisierung der Laser Scanner

2.1 Hardware

Das Lasermesssystem IMAGER 5003 ist transportabel und besteht aus den Komponenten Messkopf, Stativ, Notebook und Akku zur Stromversorgung, unabhängig von einem Stromnetz (Abb. 2). Die Lasereinheit des Messkopfes hat eine Wellenlänge von 780 nm; die Leistung wird mit 22/32 mW (Laserschutzklasse 3R) angegeben. Aus Sicherheitsgründen wird der Laser bei Stillstand des Messkopfes ausgeschaltet. Das Notebook dient der Steuerung und Kontrolle des Messablaufs.



Abb. 2: Messkopf des IMAGER 5003

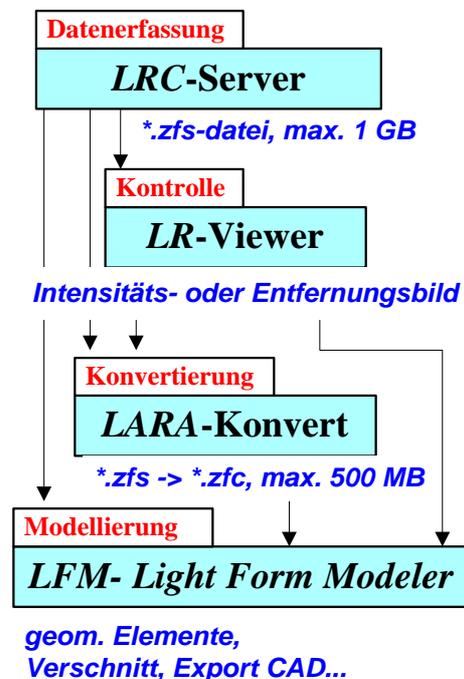


Abb. 3: Ablauf einer Messung

2.2 Software

Der Hersteller bietet verschiedene Windows-basierte Programme zur Messung mit dem Scan-System an. Unverzichtbarer Bestandteil ist das Programm LRC-Server, zur Steuerung und Kontrolle der Datenerfassung (Abb. 3). Mit dem LR-Viewer werden die gewonnenen Daten (*.zfs-Format) in ein Grauwert- oder abstandcodiertes Bild umgesetzt. Damit kann vor Ort die Datenerfassung visuell kontrolliert werden. Vor der Modellierung im Light Form Modeler (LFM) bietet sich eine Konvertierung der Rohdaten in eine komprimierte Form (*.zfc-Format) mit dem Programm LARA-Konvert an.

2.3 Technische Daten

Die Vertikalauflösung der Ablenkeinheit beträgt für der Variante LARA 25200 (für Eindeutigkeitsbereich 25,2 m) $0,01^\circ$ bzw. für der Variante LARA 53500 (für Eindeutigkeitsbereich 53,5 m) $0,018^\circ$. Die Horizontalauflösung wird jeweils mit $0,01^\circ$ angegeben.

Je nach Auflösungsstufe lässt sich eine 4D-Punktwolke mit einer Datenerfassungsrate von max. 625 000 Bildpunkten pro Sekunde (Messdauer ca. 13,5 Minuten, Dateigröße unkomprimiert 1GB) oder mit der typischen Datenerfassungsrate von 125 000 Punkten pro Sekunde (Messdauer ca. 7 Minuten, Dateigröße unkomprimiert 253 MB) erfassen. Die Datenerfassungssoftware sieht 5 unterschiedliche Auflösungsstufen vor, die ein quadratisches Punktraster generieren. Ein zuschaltbares elektronisches Filter reduziert die Messgeschwindigkeit und das Messrauschen. Zusätzlich können beliebige Punktabstände und Scan-Ausschnitte definiert werden. Die Erfassung wird durch eine langsame Horizontaldrehung, kombiniert mit einer schnellen Drehung (max. 2000 rpm) der vertikalen Ablenkeinheit um die Kippachse, realisiert.

Der Hersteller gibt die Streckenmessgenauigkeit mit 3 mm (26,2 m) bzw. 5 mm (53,5 m) und die horizontale und vertikale Winkelgenauigkeit mit jeweils $0,01^\circ$ an. Der Scanner ist weder mit einem Horizontiersystem, noch mit einem Neigungskompensator ausgestattet. Deshalb werden die Koordinaten zunächst in einem örtlichen, nicht-horizontierten Koordinatensystem beschrieben.

2.4 Mess- und Auswerteprinzipien



Abb. 4: Zielmarken

Zur Winkelmessung werden handelsübliche, codierte Teilkreise verwendet, an welche – aufgrund der kurzen Reichweite - keine besonderen Genauigkeitsforderungen gestellt werden müssen.

Der Streckenmessteil basiert – wie die meisten geodätischen Streckenmessinstrumente – auf dem Phasenvergleichsverfahren eines amplitudenmodulierten Signals.

Das ausgesandte Laserlicht P_E wird mit 2 Sinussignalen unterschiedlicher Frequenz gleichzeitig intensitätsmoduliert. Das detektierte Laserlicht P_R beinhaltet die Phasenverschiebungen beider Modulationsfrequenzen. Die Grobkomponente φ_I dient zur Bestimmung einer eindeutigen Grobentfernung. Je nach Ausführung ist $\omega_I = 5,5$ MHz (bis 26,8 m) bzw. 2,8 MHz (bis 53,5 m).

Die Feinkomponente $\omega_2 = 44,8$ MHz dient der präzisen , aber nur innerhalb von 3 m eindeutigen Streckenmessung. Durch frequenzselektive Verrechnung der Phasendifferenzen φ_1 und φ_2 ergibt sich eine absolute (ω_1) und präzise (ω_2) Streckenmessung (FRÖHLICH 1996). Die Amplitude $|P_R|$ des detektierten Streulichts entspricht in Folge konstanter Sendesignalampplitude dem Reflektivitätswert i . Strecken- und Reflektivitätswert werden mit demselben Empfänger, zur gleichen Zeit gemessen, so dass sie einem einzigen Messpunkt im Raum zugeordnet werden können.

Die Modelliersoftware (LFM) bietet u.a. die Möglichkeit mit Methoden der digitalen Bildverarbeitung, spez. Zielmarken (Abb.4) automatisiert zu erkennen. Dadurch lassen sich mehrere Szenen rechnerisch zusammenfügen. Werden die Zielmarken zusätzlich tachymetrisch koordiniert, sind zur Fusion mehrerer Einzelscans keine Überlappungen bzw. identische Passpunkte mehr erforderlich. Zusätzlich kann das Koordinatensystem horizontiert werden. Das Zusammenfügen der Scans erfolgt über eine 6-Parameter-Transformation (Maßstab wird auf 1 gesetzt).

Die wichtigsten geometrischen Flächen und Körper sind über eine kleinste-Quadrate-Lösung approximierbar. Die Besonderheit der implementierten Lösung besteht in der Elimination von Punkten, deren Verbesserung (räumlicher Abstand) eine vom Benutzer definierbare Grenze überschreitet. Eine Berechnung wird nur zu Ende geführt, wenn mehr als 30% der ausgewählten Punkte innerhalb der Fehlergrenzen liegen.

Der Elimination von Ausreißern kommt im Zusammenhang mit der verwendeten Streckenmesstechnik eine große Bedeutung zu. Dies gilt insbesondere für geometrische Körper mit starker Krümmung bzw. allgemein bei diskontinuierlichen Strukturen. Am Beispiel einer Kugel sei dies verdeutlicht (Abb. 5):

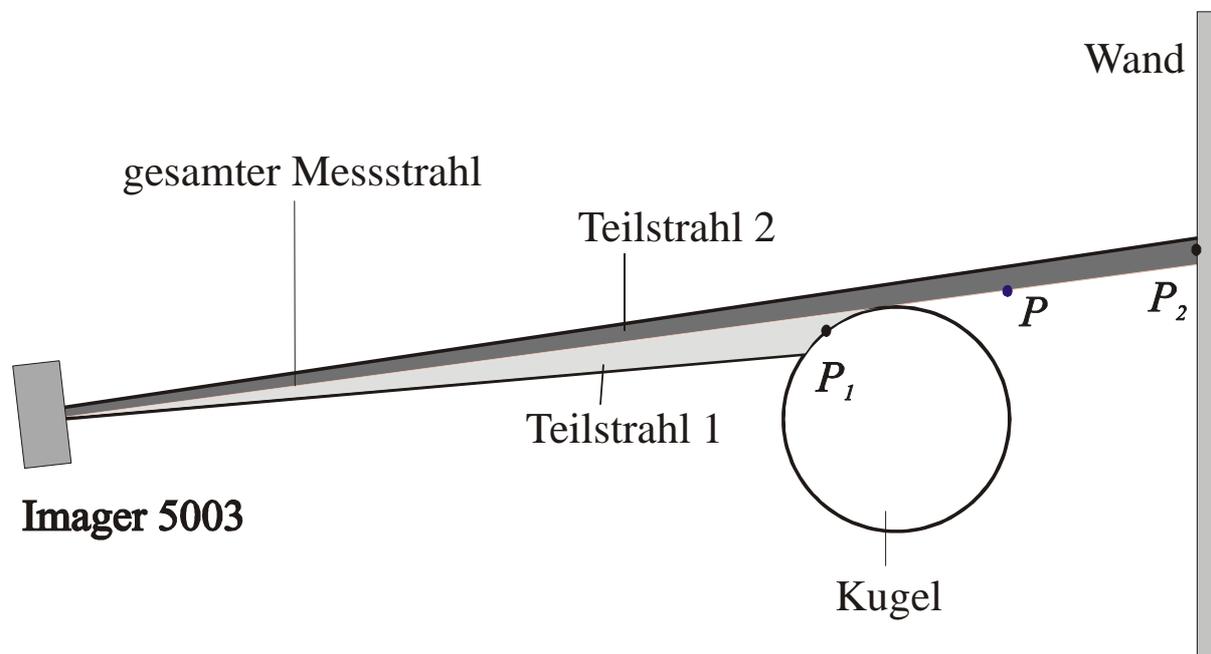


Abb. 5: Messung einer Kugel vor einer Wand (vereinfacht dargestellt)

Der Durchmesser des Messstrahls des Imager 5003 variiert - je nach Entfernung - zwischen 3 und 10 mm. Trifft ein Teil des Messstrahls das Objekt (Teilstrahl 1) und der andere Teil

z.B. die dahinterliegende Wand (Teilstrahl 2) kommt es zu einer Überlagerung beider Signale. P_1 repräsentiert Teilstrahl 1 und P_2 repräsentiert Teilstrahl 2. Durch die Überlagerung wird eine „falsche“ Strecke zu P ermittelt, wobei P meist zwischen P_1 und P_2 liegt. Dieser Effekt liegt dann vor, wenn das Objekt von einer Punktwolke –vergleichbar mit einem Kometenschweif– umgeben ist. In Abbildung 6a und b ist die Punktwolke und der „Kometenschweif“ einer Kugel dargestellt.

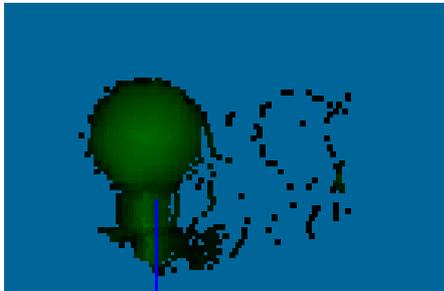


Abb. 6a: Frontansicht einer Kugel

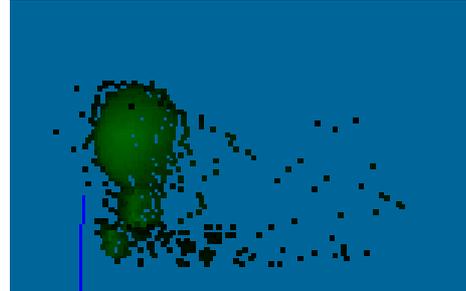


Abb. 6b: Seitenansicht derselben Kugel
($r = 50 \text{ mm}$)

3 Quantitative Untersuchungen

Im Rahmen dieser Untersuchungen wird versucht, die geometrischen Genauigkeiten der Messkomponenten zu bestimmen. Dies erfolgte am Fachbereich Vermessungswesen der Universität Duisburg-Essen vorwiegend unter Zuhilfenahme von Holzkugeln mit bekannten Radien.

3.1 Beurteilung der Streckenmessgenauigkeit

Zur Bestimmung der Genauigkeit der Streckenmesskomponente wurden die Holzkugeln (Radien zwischen 20 und 70 mm) in einer horizontalen Linie zwangszentriert aufgebaut. Die Sollabstände zwischen den Kugeln resultieren aus Messungen mit einem kalibrierten Tachymeter (Messunsicherheit $< 0,5 \text{ mm}$). Die 7 Kugeln wurden mit dem Scanner von einem Standpunkt aus, praktisch in Verlängerung der Kugelachse, in verschiedenen Auflösungsstufen erfasst. Im Modul LFM wurden dann die Kugeln modelliert. Die Abweichung der mod. Kugelradien von den tatsächlichen Radien sind in Tabelle 1 für verschiedene Auflösungsstufen zusammengestellt.

Kugeln	Auflösung		
	superhigh	High	Middle
K1	0,3	0,4	-0,5
K2	0,8	2,0	3,8
K3	0,7	1,5	-0,5
K4	0,9	-0,6	0,3
K5	1,1	1,4	1,6
K6	0,5	-0,8	-0,4
K7	0,9	0,3	0,8

Tab. 1: Abweichungen der Kugelradien [mm] in verschiedenen Auflösungsstufen

Aus den Mittelpunkten der modellierten Kugeln können dann Streckendifferenzen abgeleitet werden (Abb. 7). Die Genauigkeit der abgeleiteten Strecken wird in dieser Aufstellung hauptsächlich vom Streckenmessteil des Scanners beeinflusst. Der Winkelmessteil des Scanners hat nur einen vernachlässigbaren Einfluss. Die abgeleiteten Strecken in den Auflösungsstufen *high* und *superhigh* sind deutlich

genauer als die Strecken der Auflösung *middle*. Der Hauptgrund ist in der werksseitigen Kalibrierung des Scanners zu sehen, die für alle Auflösungsstufen gleich ist und offensichtlich auf den Auflösungsstufen *high* und *superhigh* basiert. Aus diesem Grund werden im folgenden nur noch diese beiden Auflösungsstufen betrachtet.

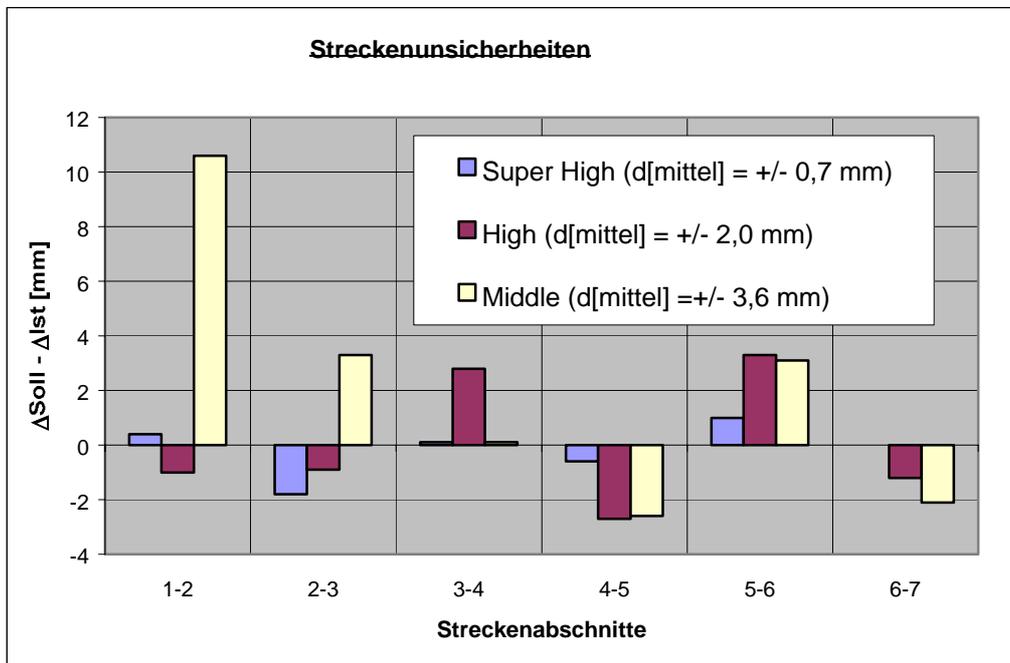


Abb. 7: Genauigkeit abgeleiteter Streckendifferenzen in verschiedenen Auflösungsstufen

Bei der Modellierung können auch bekannte geometrische Größen – hier die Radien der Kugeln – als fest vorgegeben werden. In Abbildung 8 sind die Streckendifferenzen aus mitgeschätzten Radien und vorgegebenen Kugelradien in der Auflösungsstufe *high* gegenübergestellt. Die Abweichungen mit festen Radien sind alle kleiner als 1 mm und deutlich kleiner als mit variablen Radien.

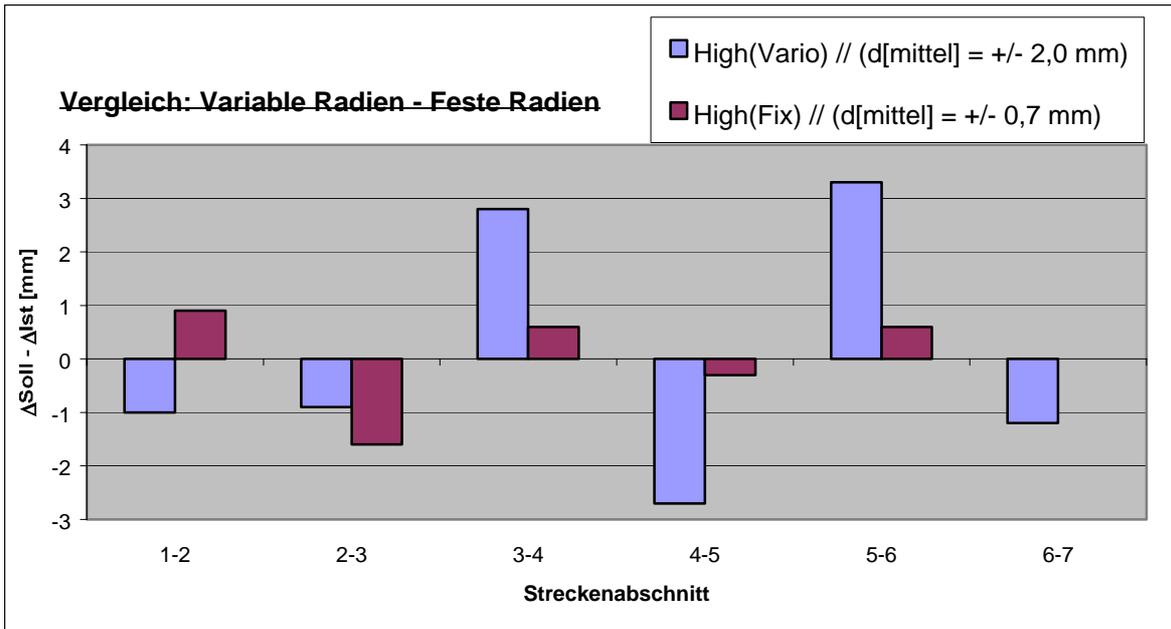


Abb. 8: Abweichung der Streckendifferenzen mit variablen und festen Kugelradien (Auflösung: *high*)

3.2 Beurteilung der Winkelmessgenauigkeit

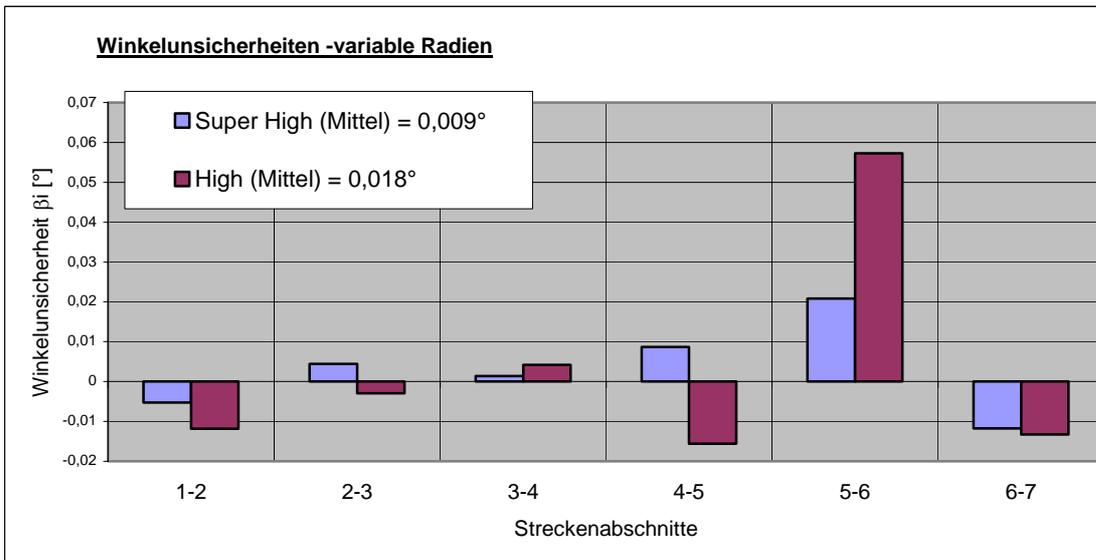


Abb. 9: Winkelunsicherheiten, abgeleitet aus Differenzen zu bekannten Strecken

Die Winkelunsicherheit wird beurteilt, indem die Kugeln von einem Standpunkt aus gescannt werden, der in größerer Entfernung und im rechten Winkel zu der Kugelgeraden liegt. Dann bestimmt der Winkelmessteil im wesentlichen die Abweichungen von den Sollwinkeln. Die Einflüsse des Streckenmessteils bleiben vernachlässigbar (Abb. 9).

3.3 Verknüpfung von Scans

Die verschiedenen Scans wurden mit und ohne zusätzliche tachymetrische Messungen zu einem Modell zusammengeführt. Die dort abgeleiteten Abweichungen der Streckendifferenzen unterscheiden sich nur unwesentlich von den Ergebnissen der Einzelscans.

4 Literaturverzeichnis

- DEUMLICH, F; STAIGER, R., 2001: Instrumentenkunde der Vermessungstechnik. 9. Aufl., 426 S., WICHMANN-Verlag, Heidelberg.
- LUHMANN, T., 2000: Nahbereichsphotogrammetrie. 1. Aufl., 328 S., WICHMANN-Verlag, Heidelberg.
- ETTEL, M., 2003: Instrumentelle Untersuchungen des Laserscanners IMAGER 5003 von Zoller & Fröhlich. Diplomarbeit, FB 11- Vermessungswesen, Universität Duisburg-Essen (unveröffentlicht)
- FRÖHLICH, CH. , 1996: Aktive Erzeugung korrespondierender Tiefen- und Reflektivitätsbilder und ihre Nutzung zur Umgebungserfassung. Wissenschaftliche Schriften Robotik. 1. Auflage. Pro Universitate Verlag, Sinzheim.
- PRZYBILLA, H.-J.; HORSTMANN. T., 2003: Photogrammetrie und Laserscanning. Ein Systemvergleich im Bereich der dreidimensionalen Verformungsanalyse. VDI-Berichte Nr. 1557.
- STAIGER, R; MÜHL, A., 2002: Der Einsatz des Laserscanners im Stahlwerk. S. 118-127. Photogrammetrie und Laserscanning, T. Luhmann (Hrsg), WICHMANN-Verlag, Heidelberg.

Augmented Reality Techniken für den Einsatz in der Leberchirurgie

TIM SUTHAU

Zusammenfassung: Die vorliegende Arbeit beschreibt verschiedene Augmented Reality Techniken zur Anwendung bei onkologischen Leberresektionen und der Leberlebendspende. Bei einem Augmented Reality System werden reale Bilder durch zusätzliche, auf natürlichem Wege visuell unzugängliche Informationen ergänzt. Augmented Reality stellt somit die Verbindung zwischen realer und virtueller bzw. unsichtbarer Welt dar. Hierfür ist die Kalibrierung der technischen Geräte (wie Kamera, Head Mounted Display) und die Überführung aller beteiligten Koordinatensysteme notwendig. Das mathematische Modell, die verwendete Software ARToolKit und die benutzte Hardware inklusive Head Mounted Display werden vorgestellt. Erste Testergebnisse werden präsentiert und hinsichtlich Ihrer Genauigkeit bewertet.

1. Einleitung

Die vorliegende Arbeit beschreibt verschiedene Augmented Reality Techniken zur Anwendung bei der onkologischen Leberresektionen und der Leberlebendspende. Bei einem Augmented Reality System werden reale Bilder durch zusätzliche Informationen ergänzt. Augmented Reality stellt somit die Verbindung zwischen realer und virtueller Welt dar. Das Ziel eines Forschungsvorhabens mit dem Deutschen Krebsforschungszentrum Heidelberg ist die Unterstützung des Operateurs in der Leberchirurgie durch ein geeignetes Augmented Reality System. Dem Operateur soll ein Hilfsmittel zur Seite gestellt werden, welches zweckmäßige zusätzliche Informationen darstellt und eine komfortable Navigation ermöglicht. Um den intraoperativen Einsatz zu ermöglichen, wird besonderer Wert auf eine hohe Gesamtgenauigkeit und ein gutes Design (im Sinne der Nutzerakzeptanz) des Gesamtsystems gelegt. (SUTHAU, 2002)

2. Systemaufbau und Voraussetzungen

Das verwendete Augmented Reality System setzt sich aus 3 zentralen Komponenten zusammen. Hardwaretechnisch wurde als Head-Mounted Display das Virtual Retinal Display „Nomad“ der Firma Microvision benutzt. Zur Markererkennung bzw. zum Tracking fand ein handelsüblicher Camcorder (Sony TRV30) Anwendung. Dieser wurde über eine Firewire Schnittstelle mit einem Notebook verbunden. Für die Realisierung des Augmented Reality Systems wurde die frei verfügbare (s. Lizenzbedingungen) Software ARToolKit eingesetzt und modifiziert.

2.1. Head-Mounted Display

Zur Realisierung von Augmented Reality werden u.A. so genannte See-Through-Systeme verwendet.

¹⁾ Technische Universität Berlin, Photogrammetrie und Kartographie, EB 9, Straße des 17. Juni 135, 10623 Berlin

Bei den tragbaren Displaysystemen kommen meist die Head-Mounted Displays (HMD) zum Einsatz. Das sind Displays, die, ähnlich wie Brillen, vor den Augen getragen werden. Head-

Mounted Displays werden häufig im Bereich der virtuellen Realität eingesetzt. Sie wurden dafür entwickelt, den Benutzer in eine virtuelle Welt eintauchen zu lassen. Für Augmented Reality sind dabei allerdings nur die Systeme von Interesse, die zusätzlich einen Blick auf die „Außenwelt“, die Realität, ermöglichen. Dazu gibt es zwei Verfahrenswege: die Optical-See-Through- (OST-HMDs) und die Video-See-Through-Systeme (VST-HMDs). Bei den Video-See-Through-Systemen geschieht dieses mit Hilfe von Videokameras, die in Augenhöhe montiert sind und den Bereich aufnehmen, den die Augen normalerweise sehen könnten, befände sich nicht die undurchsichtige „Brille“ vor ihnen. Diese Bilder werden nun im Rechner mit den zusätzlichen Bildern, die die Realität „erweitern“ sollen, verschmolzen und den Augen des Betrachters zugeführt. Im Gegensatz dazu gewähren die Optical-See-Through-Systeme direkte Sicht auf die „Außenwelt“. Dieses geschieht z.B. mit Hilfe halbdurchlässiger Spiegel, die sich vor den Augen befinden. In diesen spiegeln sich, im HMD montierte, Displays, die die zusätzlichen Bilder anzeigen.(AZUMA, 2001).

Zur Realisierung eines Nahbereichs-See-Through-Systems für die Viszeralchirurgie wird ein Virtual Retinal Display „Nomad“ der Firma Microvision eingesetzt. Erste Untersuchungen des Gerätes bestätigen eine gute Tauglichkeit für das Vorhaben. In dieser Arbeit wird die Kalibrierung eines Gesamtsystems vorgestellt und getestet. Dazu gehören das verwendete HMD und die für die Positionsbestimmung eingesetzte Kamera, welche für den Test fest miteinander und mit dem Auge verbunden sein sollen. Bei einem Augmented Reality Gesamtsystem sind auch darüber hinausgehende Komponenten und eventuelle Bewegungen zueinander zu berücksichtigen (Abb. 1).



Abb. 1: Koordinatensysteme bei einem Augmented Reality System

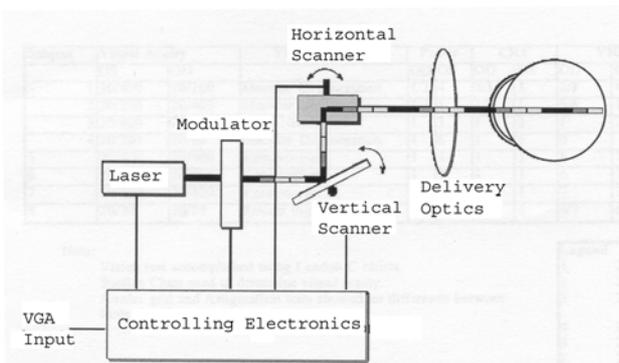


Abb. 2: Aufbauschema eines VRD



Abb. 3: VRD: Nomad Personal Display (MICROVISION)

Eine Sonderstellung nimmt das Retinal-Display (Virtual Retinal Display, VRD) ein, das von der Firma Microvision hergestellt wird (VIIRRE, 1998). Bei diesem wird mit Hilfe von schwachen Laserstrahlen das entsprechende Bild direkt auf die Netzhaut des Benutzers gezeichnet. Auch hierbei kann zusätzlich die „reale“ Welt gesehen werden (Abbildung 2 und 3).

Zur Realisierung eines Nahbereichs-See-Through-Systems für die Viszeralchirurgie wird ein Virtual Retinal Display „Nomad“ der Firma Microvision eingesetzt und bei den folgenden Untersuchungen behandelt. Diese Systeme sind geometrisch den Optical-See-Through-Systemen gleichzusetzen. Gegenüber diesen zeichnen sie sich jedoch durch einen höheren Kontrast aus, d.h. die Umgebung muss nicht abgedunkelt werden. Die technischen Details des „Nomad“ können der Tabelle 1 entnommen werden.

<i>PARAMETER</i>	<i>SPECIFICATION</i>	<i>DEFINITION / COMMENTS</i>
Video Input	Analog, SVGA	VESA, D-sub 15pin
Luminance	1 to 900fL	Measure of brightness perceived by human eye in foot-Lamberts
Outside World Transmisssion	45%	Amount of ambient light visible through the view port
Field of view	23 x 17 degrees	Equivalent to 17-inch monitor at arm´s length
Dynamic Range	50:1	Luminance difference between full-on and full-off screen
Display Color	Monochrome Red	

Tab. 1: Technische Details des "Nomad" Personal Display (MICROVISION)

2.2. Kamera und weitere Hardware

Zur Markererkennung bzw. zum Tracking kam ein handelsüblicher Camcorder (Sony TRV 30) zum Einsatz. Dieser liefert sein Videosignal über einen CardBus Adapter an ein Notebook (Compaq Presario 1800, Intel Pentium III-Prozessor, 700 MHz, 256 MB RAM). Somit wurde die Kamera via FireWire mit dem Notebook verbunden.

Für die folgenden Untersuchungen musste angenommen werden, dass das Head-Mounted Display (HMD), die Kamera und der Kopf bzw. das Auge fest miteinander verbunden sind. Hierfür wurden sowohl das HMD als auch die Kamera fest installiert. Als „Auge“ wurde ein weiterer Camcorder benutzt, welcher so hinter der Lasereinheit platziert wurde, dass sowohl Bild als auch Filmaufnahmen vom HMD gemacht werden konnten. Dieser zweite Camcorder ersetzt somit das menschliche Auge und erlaubt eine exakte Bildkoordinatenmessung zur Feststellung der Genauigkeit des Gesamtsystems. (Abb. 4)



Abb. 4: HMD, Trackingkamera und „Kamera-auge“ wurden fest installiert

2.3. Software – Das ARToolKit

Das ARToolKit entwickelt von HIROKAZU KATO, MARK BILLINGHURST, ROB BLANDING und RICHARD MAY ist ein Werkzeug, welches eine nahezu vollständige Arbeitsumgebung für Augmented Reality beinhaltet. Es basiert einerseits auf der Programmiersprache C andererseits

wird es durch OpenGL ergänzt um Grafiken zu erstellen. Das gesamte Programm ist inklusive Quelltext frei für den nicht kommerziellen Gebrauch zugänglich.

Mit Hilfe dieses Tools ist es dem Nutzer auf relativ einfache Weise möglich, erste Augmented Reality Applikationen zu entwickeln. Dies bedeutet, dass Grafiken z.B. mittels OpenGL erstellt, künstlich in die reale Umgebung eingebettet werden können. Hierbei besteht die Möglichkeit dies über einen Monitor darzustellen, auf dem sowohl reale als auch virtuelle Umgebung zu sehen sind, oder es kann hierzu ein HMD genutzt werden, auf dessen Display nur die virtuellen Objekte eingespielt werden. Diese werden dann dem Bild der realen Umgebung überlagert.

Mit ARToolKit gelingt es, die Applikationen fast in Real Time durchzuführen. Mit anderen Worten heißt das, dass sämtliche Berechnungen so durchgeführt werden, dass eine Zeitverzögerung von nur wenigen zehntel Sekunden entsteht. Die Schwierigkeit hierbei ist es, möglichst schnell sowohl den Standpunkt bzw. das Sehzentrum des Betrachters also auch Markierungen im Raum so genau zu berechnen, dass die virtuellen Objekte ausreichend präzise auf die reale Umgebung abgebildet werden können. Dazu bedient sich das ARToolKit unter anderem Bildverarbeitungsalgorithmen und photogrammetrischen Berechnungen. Die gesamte Prozedur umfasst also die komplette Kalibrierung der Kamera und des HMDs, das Tracking von Markierungen und die Darstellung der virtuellen Objekte. ARToolKit bietet neben den Kalibrierungsprogrammen auch weitere Unterprogramme, die einfache Anwendungen darbieten oder den Umgang erklären und das Verständnis für den Ablauf des gesamten ARToolKits verbessern sollen. Das ARToolKit wird in verschiedenen Versionen angeboten. Je nach Betriebssystem kann eine passende Variante ausgewählt werden. Zur Verfügung stehen Ausführungen für Windows, Linux und SGI. Zusätzlich ist eine spezielle MatLab-Version erhältlich. Da auch an der Weiterentwicklung des Programms gearbeitet wurde, sind zu den einzelnen Ausführungen auch mehrere Entwicklungsstufen bereitgestellt. Alle Versionen können im Internet auf der ARToolKit – Seite: http://www.hitl.washington.edu/research/shared_space/download/ herunter geladen werden. (SCHAEFER, 2003).

Das ARToolKit wurde so durch uns modifiziert, dass auch PAL-Camcorder via FireWire Schnittstelle genutzt werden können. Die Tests fanden unter LINUX statt.

3. Kalibrierung von Augmented Reality Systemen

Bei Video-See-Through Systemen wird nur eine Kalibrierung der Kameras benötigt. Im Gegensatz dazu ist es bei Optical-See-Trough Systemen notwendig, sämtliche am AR-System beteiligte Komponenten zu kalibrieren und die jeweiligen Koordinatensysteme in Bezug zueinander zu setzen (Abb.1). In der Literatur werden dabei unterschiedliche Verfahren behandelt, welche sich in der Methodik und in der Verwendung unterschiedlicher Komponenten unterscheiden. So wird bei MCGARRITY (1999), JANIN (1993) und TUCERYAN (2000) eine Kalibrierung mit magnetischen Trackern und die Verwendung von Passpunktmarkern zur HMD Kalibrierung beschrieben. TUCERYAN (2000) entwickelte die SPAAM-Methode (Single Point Active Alignment Method), welche nur einen einzigen Punkt im übergeordneten Koordinatensystem benötigt, jedoch die Kalibrierung des Trackers voraussetzt. Existierende Kalibrierungen werden wieder verwendet und nur benutzerabhängige Parameter werden neu kalibriert. GENC (2002a) und KATO beschreiben videobasierte Kalibrierungen, also ohne magnetischen Tracker. Bei GENC (2002a) handelt es sich dabei um eine Erweiterung der SPAAM-Methode. Ansätze zum markerlosen Tracking bei Augmented Reality System werden beispielsweise bei SIMON (2002), GENC (2002b) und CHIA (2002) vorgestellt. Dabei werden optische Gegebenheiten genutzt, um Videodaten nichtkalibrierter Kameras mit der realen Szene zu überlagern.

Im Folgenden soll das grundlegende mathematische Modell, welches bei ARToolKit Verwendung findet, erläutert werden. Dabei wird sich an der Notation, sowie Beschreibung von KATO orientiert.

Hauptaugenmerk soll auf die Kalibrierung von Kamera und HMD gelegt werden. Die Positionsbestimmung der Passpunktmarker sei nur kurz angerissen.

3.1. Positionsbestimmung der Passpunktmarker

Das ARToolKit verwendet zur Positionsbestimmung Passpunktmarker, kurz Marker genannt. Dies sind quadratische Marker bekannter Größe. Zur Identifizierung dienen beliebige Namen oder Bilder (Abb. 5)



Abb. 5: Beispiel eines Passpunktmarkers

Prinzipiell erfolgt eine Transformation T_{CM} vom Markersystem X_M, Y_M, Z_M in das aktuelle Kamerakoordinatensystem X_C, Y_C, Z_C (Abb. 7):

$$\text{Gl.1: } \begin{bmatrix} X_C \\ Y_C \\ Z_C \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{11} & V_{12} & V_{13} & W_X \\ V_{21} & V_{22} & V_{23} & W_Y \\ V_{31} & V_{32} & V_{33} & W_Z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_M \\ Y_M \\ Z_M \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{3 \times 3} & W_{3 \times 1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_M \\ Y_M \\ Z_M \\ 1 \end{bmatrix} = T_{CM} \begin{bmatrix} X_M \\ Y_M \\ Z_M \\ 1 \end{bmatrix}$$

Über ein Schwellwertverfahren werden die Regionen mit Markerinformationen detektiert und die Bildkoordinaten der 4 Markereckpunkte abgespeichert. Die Projektion der Verbindungslinien zwischen den Eckpunkten und die 4 Eckpunktkoordinaten der Marker mit ihren Bildkoordinaten stellen die Beziehung zum Kamerakoordinatensystem her. Zur Berechnung ist die Matrix der projektiven Projektion P aus der Kamerakalibrierung gegeben.

3.2. HMD und Kamerakalibrierung

Bei optischen HMDs erreicht der Strahl eines physikalischen Objektes das Auge mit dem Durchgang durch das HMD. Die 3D Position eines virtuellen Objektes im Auge muss durch Abbildung des Strahls durch das HMD realisiert werden. Bei normalen HMDs ist dabei die z-Achse der virtuellen Koordinaten senkrecht zur xy-Ebene, welche parallel zur xy-Ebene der Bildkoordinaten des HMD ist (Abb. 6).

Die Position der Marker kann vorausgesetzt (Abschnitt 3.1.) werden. Hierfür wurde die Projektionsmatrix P benötigt. Die Bestimmung der Projektionsmatrix P erfolgt durch die Kamerakalibrierung. Dabei wird die Beziehung zwischen den Kamerabildkoordinaten und der Kamera selbst (innere und äußere Orientierung) hergestellt. Zur Visualisierung der virtuellen Objekte auf dem HMD Bildschirm wird die Beziehung zwischen Markerkoordinaten und HMD

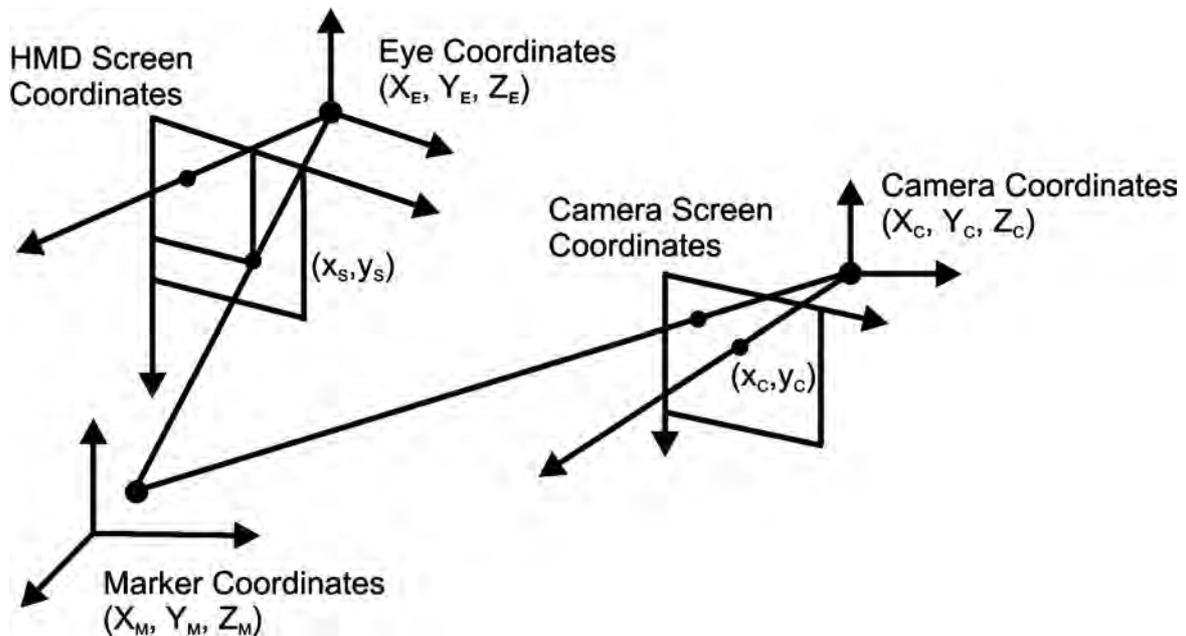


Abb. 6: Koordinatensystem der HMD und Kamerakalibrierung nach KATO (1999)

Bildkoordinaten benötigt. Durch die Kamerakalibrierung sind dabei die Markerkoordinaten im Kamerakoordinatensystem bekannt. Die Beziehung zwischen HMD-Bildkoordinaten und Augenkoordinaten wird durch die Perspektive Projektion gegeben. Die Beziehung zwischen Kamerakoordinaten und Augenkoordinaten ist durch Rotation und Translation in Gleichung 2 gegeben:

$$\text{Gl.2: } \begin{bmatrix} ix_s \\ iy_s \\ i \\ 1 \end{bmatrix} = Q_{SE} \begin{bmatrix} X_E \\ Y_E \\ Z_E \\ 1 \end{bmatrix} = Q_{SE} T_{EC} \begin{bmatrix} X_C \\ Y_C \\ Z_C \\ 1 \end{bmatrix} = Q_{SE} T_{EC} T_{CM} \begin{bmatrix} X_M \\ Y_M \\ Z_M \\ 1 \end{bmatrix}$$

Q_{SE} : Matrix der perspektiven Transformation
 T_{EC} : Rotations- und Translationsmatrix

3.2.1 Kamerakalibrierung

Zur Kamerakalibrierung wird ein regelmäßiges Gitter (Abb. 7) in definierten Abständen zur Kamera angemessen. Die Koordinaten der angemessenen Kreuze sind somit im lokalen 3D Koordinatensystem bekannt. Mehrere Paare von Kamerabildkoordinaten x_c, y_c und den dazugehörigen lokalen 3D Koordinaten der Gitterkoordinaten können zur Bestimmung der Projektionsmatrix P genutzt werden. Die Beziehungen zwischen dem

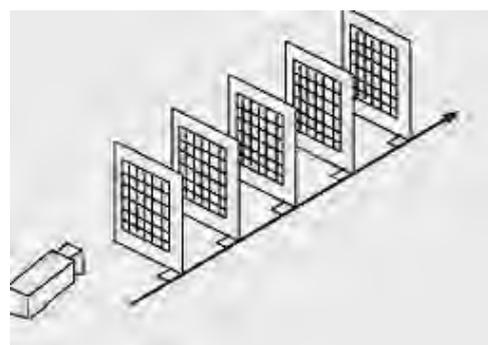


Abbildung 7: Gitter zur Kamerakalibrierung

Kamerabildkoordinatensystem x_c, y_c , dem Kamerakoordinatensystem X_C, Y_C, Z_C und dem Gitterkoordinatensystem X_T, Y_T, Z_T wird in Gl.3 gezeigt:

$$\text{Gl.3: } \begin{bmatrix} hx_c \\ hy_c \\ h \\ 1 \end{bmatrix} = P \begin{bmatrix} X_C \\ Y_C \\ Z_C \\ 1 \end{bmatrix} = P \cdot T_{CT} \begin{bmatrix} X_T \\ Y_T \\ Z_T \\ 1 \end{bmatrix} = C \begin{bmatrix} X_T \\ Y_T \\ Z_T \\ 1 \end{bmatrix} = C \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_T \\ Y_T \\ Z_T \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$P = \begin{bmatrix} s_x f & 0 & x_0 & 0 \\ 0 & s_y f & y_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, T_{CT} = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} & T_x \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} & T_y \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} & T_z \\ R_{41} & R_{42} & R_{43} & 1 \end{bmatrix}$$

P : gesuchte Matrix der perspektiven Projektion
 f : Brennweite
 $s_x(s_y)$: Massstabsfaktor in x(y-Richtung)
 x_0, y_0 : Bildhauptpunkt
 T_{CT} : Translation u. Rotation vom Gitter-
ins Kamerakoordinatensystem
 C : Matrix aus P und T_{CT}

Die Matrix C wird dabei durch mehrere Paare von Kamerabildkoordinaten x_c, y_c und lokalen 3D Koordinaten X_T, Y_T, Z_T der Gitterkreuze bestimmt. Die Bestimmung der 11 Parameter von C erfolgt durch die Lösung einer überbestimmten Direkten Linearen Transformation. Nach deren Bestimmung kann C durch RQ-Zerlegung in P und T_{CT} zerlegt werden.

3.2.2 HMD Kalibrierung

Für die HMD Kalibrierung kann das gleiche mathematische Modell wie bei der Kamerakalibrierung genutzt werden. Als bekannt genutzt werden viele Paare der HMD-Bildkoordinaten x_s, y_s und deren zugehörige Kameraposition X_C, Y_C, Z_C aus der Kamerakalibrierung.

Der Kalibrierungsprozess kann wie folgt zusammengefasst werden:

- Einblenden eines Kreuzes ins HMD.
- Marker und Kreuz werden in Übereinstimmung gebracht.
- Im gleichen Moment wird der Marker von der Kamera bestimmt.
- Wiederholung der Markermessung nah und fern (Hand ausgestreckt) mehrmals
- → viele Paare HMD-Bildkoordinaten x_s, y_s und deren zugehörige Kameraposition X_C, Y_C, Z_C
- Bestimmung von Q_{SE} und T_{EC} in Gl.2.

Durch die Markermessung mit dem HMD sind somit die Bildkoordinaten x_s, y_s im HMD System bekannt. Gleichzeitig wird der Marker von der Kamera aufgenommen. Aufgrund der erfolgten Kamerakalibrierung ist der Marker im Kamerakoordinatensystem X_C, Y_C, Z_C bekannt. Im praktischen Ablauf werden 10 Paare $(x_s, y_s; X_C, Y_C, Z_C)$ (5 x nah, 5 x fern) zur Bestimmung der Gleichung 2 genutzt. (Abb. 6)

4. Praktische Anwendung und Test des Systems

4.1. Kalibrierung mit ARToolKit

Unter ARToolKit stehen prinzipiell 3 Programme zur Verfügung:

- 1) calibdist - Bestimmung der Verzeichnung der Kamera
- 2) calibcparam - Bestimmung der Orientierung der Kamera unter Berücksichtigung der Verzeichnung aus calibdist
- 3) optical - Bestimmung der Orientierung des HMD ohne Verzeichnung

Das mathematische Modell für die Kalibrierung der Kamera und des HMD wurde in Abschnitt 3 beschrieben. Der Versuchsaufbau wurde in Abschnitt 2.2 erläutert. Zur praktischen Vorgehensweise sei auf die Dokumentation von ARToolKit verwiesen.

4.2. Genauigkeitsuntersuchung des Versuchsaufbaus

Nach der erfolgreichen Kalibrierung von Kamera und HMD kann man verschiedene Programmkomponenten von ARToolKit zur Visualisierung virtueller Objekte verwenden.

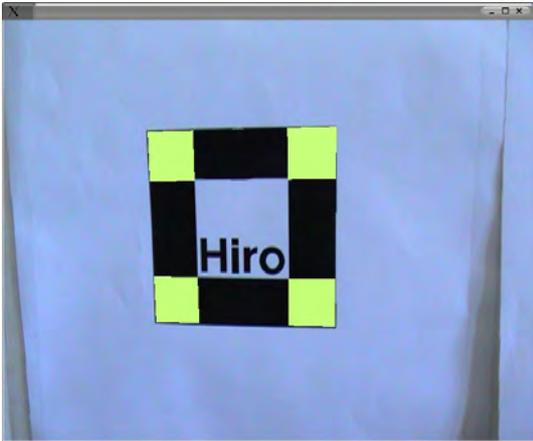


Abb. 8: Simplestest im Kameramodus



Abb. 9: Simplestest unter Nutzung des HMD

Zur Genauigkeitsuntersuchung unseres Systems haben wir die Komponente „simplestest“ verwendet. Simplestest wurde so modifiziert, dass in Abhängigkeit von der Position eines Markers, 4 Quadrate auf dem Marker visualisiert werden. Die Abweichungen der visualisierten Quadrate von der Markerecke gibt im Kameramodus die Qualität des Markertracking (Abb. 8) wieder. Bei der Nutzung des HMD ergibt sich die Gesamtgenauigkeit des Systems (Abb. 9). Es wurden dabei mehrere Konstellationen aufgenommen und ausgewertet. So wurden Aufnahmen in verschiedenen Entfernungen (Abstand 30 cm bis 4 m) ausgewertet. Dabei wurden die Differenzen der Eckpunkte der Quadrate zu Ihren Sollkoordinaten auf dem Marker gemessen. Die besten Ergebnisse, Mittelwert der Abweichungen liegt bei 2-3 mm (Abb. 10 in Pixel), konnten im Abstandsbereich zwischen 40 und 80 cm erreicht werden. Dies liegt im interessierenden Bereich, da unser System langfristig für die Chirurgie, also im Abstand der operierenden Hand eingesetzt werden soll.

Diese Resultate gelten jedoch nur im erweiterten Zentrum der Visualisierung mit dem HMD, da das HMD am Rand sehr starke Verzeichnungen aufweist.

Die Abweichungen, welche durch die Verzeichnung hervorgerufen werden, haben einen Betrag von bis zu 8 mm. (SCHAEFER 2003, PIETSCHER 2003)

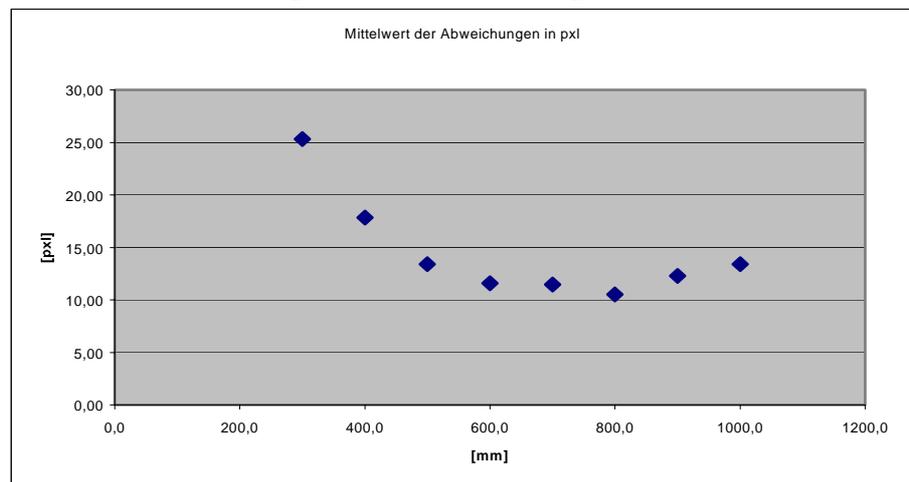


Abb. 10: Mittelwert der Abweichungen der Eckpunkte von ihren Sollkoordinaten in Pixel

5. Ausblick

Zur Realisierung eines Nahbereichs-See-Through-Systems für die Viszeralchirurgie wird ein

Virtual Retinal Display „Nomad“ der Firma Microvision eingesetzt. Erste Untersuchungen des Gerätes in Verbindung eines Camcorder und der Nutzung von ARToolKit bestätigen eine gute Tauglichkeit für das Vorhaben. Ausgehend von den Ergebnissen sollte ARToolKit so erweitert werden, dass eine Verzeichnung des HMD berücksichtigt wird. Des Weiteren ist zu berücksichtigen, dass das HMD eine gewisse Ungenauigkeit bei der Visualisierung aufweist. So werden besonders vertikale Linien mit einer Ungenauigkeit von ca. 2 Pixeln dargestellt (Abb. 11).

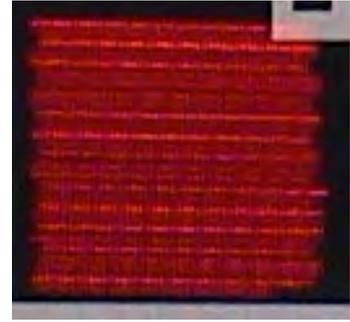


Abb. 11: Ungenauigkeiten der Visualisierung des HMD „Nomad“

In dieser Arbeit wurde eine Konstellation vorgestellt, welche einen festen Bezug zwischen Kamera, HMD und Auge voraussetzt. Im operationellen Einsatz kann diese Voraussetzung nicht mit einem handelsüblichen Camcorder erfüllt werden. Hier ist die Implementation von Miniaturkameras ähnlicher Auflösung erforderlich. Des Weiteren geht der feste Bezug des HMD zum Auge (Verrutschen der Brille) bei einem operationellen Einsatz verloren. Somit spielt für den Einsatz von See-Through Technologie das Kopf- und Pupillentracking im Bezug zum verwendeten Display eine wesentliche Rolle. Aus diesen Informationen wird die korrigierte Lage der Projektion der virtuellen Daten auf dem Display errechnet. Das zu verwendende Display befindet sich zur Projektion der virtuellen Daten direkt vor dem Auge. Dabei stellt dessen exakte Positionierung ein wichtiges Genauigkeitskriterium zur Projektion der virtuellen Daten dar.

4. Referenzen

- AZUMA, 2001: Azuma, R.T.; “Augmented Reality: Approaches and Technical Challenges”, Fundamentals of Wearable Computers and Augmented Reality, W. Barfield, Th. Caudell (eds.), Mahwah, New Jersey, 2001, pp 27-63.
- CHIA 2002: Chia, K.W.; Cheok, A.D.; Prince, S.J.D.; Augmented Reality, 2002 “Online 6 DOF Augmented Reality Registration from Natural Features” (ISMAR 2002) Proceedings. IEEE and ACM International Workshop on Augmented Reality, Oct. 2002, Page(s): 305 -316
- GENC 2002a: Yakup Genc, M Tuceryan, N. Navab „Practical Solutions for Calibration of optical see through Devices“ Tagungsband: IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR), Darmstadt, IEEE CS Press (2002), Seiten: 169-175
- GENC 2002b: Genc, Y.; Riedel, F.; Souvannavong, F.; Akinlar, C.; Navab, N.; Augmented Reality, 2002 “Marker-less Tracking for AR: A Learning –Based Approach” (ISMAR 2002) Proceedings. IEEE and ACM International Workshop on Augmented Reality, Oct. 2002, Page(s): 295 -304
- JANIN1993: Janin, A.L.; Mizell, D.W.; Caudell, T.P.; “Calibration of head-mounted displays for augmented reality applications” Virtual Reality Annual International Symposium, 1993., 1993 IEEE , 18-22 Sept. 1993, Page(s): 246 -255
- KATO 1999: Kato, H.; Billinghurst, M.; Augmented Reality, 1999. “Marker tracking and HMD calibration for a video-based augmented reality conferencing system” (IWAR '99) Proceedings. 2nd IEEE and ACM International Workshop on , 1999, Page(s): 85 -94
- MCGARRITY 1999: McGarrity, E.; Tuceryan, M.; Augmented Reality, 1999. “A method for calibrating see-through head-mounted displays for AR” (IWAR '99) Proceedings. 2nd IEEE and ACM International Workshop on , 20-21 Oct. 1999, Page(s): 75 -84
- PIETSCHER 2003: PIETSCHER, S.; “Tracking für Augmented Reality“, Technische Universität Berlin, Fachgebiet Photogrammetrie und Kartographie, Diplomarbeit, unveröffentlicht
- SCHAEFER, 2003: Schaefer, H.; “Kalibrierung für Augmented Reality“, Technische Universität Berlin, Fachgebiet Photogrammetrie und Kartographie, Diplomarbeit, unveröffentlicht

- SIMON 2002: Simon, G.; Berger, M.-O.; Augmented Reality, 2002 “Reconstructing While Registering: A Novel Approach for Markerless Augmented Reality” (ISMAR 2002) Proceedings. IEEE and ACM International Workshop on Augmented Reality , Oct. 2002, Page(s): 285 -294
- SUTHAU 2002: Suthau, T.; Vetter, M.; Hassenpflug, P.; Meinzer, H.-P.; Hellwich, O.; “A concept work for Augmented Reality visualisation based on a medical application in liver surgery” ISPRS, the International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences; Volume XXXIV, Part5, Commission V, Proceedings of the ISPRS Commission V Symposium, close-range imaging, long-range vision, Corfu 2002, Greece, pp. 274-280
- Tuceryan 2000: Tuceryan, M.; Navab, N. „Single point alignment method for optical see-through HMD calibration for AR(SPAAM) foroptical see-through HMD calibration for AR “Proceedings of IEEE International Symosium on Augmented Reality (ISAR), 149-158, München, IEEE CS Press (2000)
- VIIRRE, 1998: E. Viirre, H. Pryor, S. Nagata, T.A. Furness, “The Virtual Retinal Displa: A New Technology for Virtual Reality and Augmented Vision in Medicine”, Proceedings of Medicine Meets Virtual Reality, San Diego, California, USA, 1998, pp252-257, Amsterdam: IOS Press and Ohmsha

Erstellung und Analyse von 3D-Oberflächenmodellen zur Beobachtung der Beständigkeit von Fugenmörtel

CHRISTINA MÜLLER, HEIDI HASTEDT, WERNER TECKLENBURG & THOMAS LUHMANN¹

Zusammenfassung: Bei der Fugenmörtelinstandsetzung an historischen Bauwerken sind an den „neuen“ Mörteln häufig schon nach kurzer Zeit Abwitterungen zu erkennen. Der verwendete Mörtel weist nicht die erforderliche Dauerhaftigkeit, insbesondere gegenüber Frost-Tau-Wechselbeanspruchung, auf. Der Materialabtrag und somit die Oberflächenänderung kann bisher aus dem Bereich der Baustoffuntersuchungen nicht am Bauwerk bestimmt werden. In einer Langzeitstudie soll in 2-Jahres-Abständen u.a. eventuell auftretender Mörtelabtrag durch Witterungseinflüsse photogrammetrisch erfasst, ausgewertet und in 3D-Oberflächenmodellen visualisiert werden. Im Vorfeld werden an einem Objekt auf dem Gelände der Fachhochschule Oldenburg/Ostfr./Whv. Aufnahmen verschiedener Epochen durchgeführt, in denen am Mauerwerk Erosion simuliert wurde. Dieser Beitrag erläutert die Vorgehensweise bei der Aufnahme und zeigt Ergebnisse aus den Testmessungen.

1 Einleitung

Bei der Mauerwerkssanierung von Baudenkmalen ist es häufig erforderlich weiche Mörtel für die Fugeninstandsetzung einzusetzen. Die Mörtel weisen vielfach eine geringe Frost-Tau-Wechselbeständigkeit auf. An unterschiedlichen Mörteln, die zur Instandsetzung von Baudenkmalen verwendet werden, sollen über einen Zeitraum von 10 Jahren, in 2-Jahres-Abständen, umfassende Untersuchungen an einem geeigneten Baudenkmal erfolgen, die erste voraussichtlich im Juli 2003. Unter Hinzuziehung zahlreicher Untersuchungsergebnisse (u.a. der Oberflächenanalyse) soll eine Entscheidung getroffen werden, welche Mauermörtel für Fugensanierung im Hinblick der Dauerhaftigkeit Verwendung finden können.

Das Institut für Angewandte Photogrammetrie und Geoinformatik (IAPG) der Fachhochschule Oldenburg/Ostfriesland/Wilhelmshaven führt in diesem Rahmen die Erstellung und Analyse von 3D-Oberflächenmodellen durch, um den Abtrag des Mörtels durch Witterungseinflüsse zu dokumentieren.

Im Vorfeld der ersten photogrammetrischen Aufnahmen vor Ort wurden an einem Probeobjekt auf dem Fachhochschulgelände Testmessungen durchgeführt, um das Mess- und Auswerteverfahren im Hinblick auf die Rahmenbedingungen und die erreichbare Genauigkeit zu erproben. Übliche optische Oberflächenmesssysteme auf der Basis aktiver Streifen- oder Laserprojektion kommen für den geplanten Einsatz nicht in Frage, da keine ausreichenden statischen Bedingungen vor Ort herrschen werden.

Das Verfahren und erste Ergebnisse aus diesen Testmessungen werden im Folgenden dargestellt.

¹ Fachhochschule Oldenburg/Ostfr./Whv., Institut für Photogrammetrie und Geoinformatik, Ofener Str. 16, 26121 Oldenburg, Tel. 0441-7708-3243, email: iapg@fh-oldenburg.de

Dipl.-Ing. (FH) Christina Müller, email: christina.mueller@fh-oldenburg.de
Dipl.-Ing. (FH) Heidi Hastedt, email: h.hastedt@vermes.fh-oldenburg.de
Dipl.-Ing. (FH) Werner Tecklenburg, email: tecklenburg@fh-oldenburg.de

2 Photogrammetrische Aufnahme des Probeobjektes

Für die Testmessungen an der Fachhochschule konnte ein baufälliger, gemauerter Schuppen genutzt werden. An dem Mauerwerk wurde durch Fremdeinwirkung Mörtelabtrag durch Witterung simuliert und verschiedene Epochen photogrammetrisch aufgenommen und ausgewertet. Die Aufnahmen erfolgten mit einer Kodak DCS 460 (Farbkamera mit 3060 x 2036 Pixel) mit 20mm-Objektiv. Um einen Mauerstein mit seinen ihn umgebenden Fugen komplett zu erfassen, sollte eine Fläche von 30cm x 20cm aufgenommen werden. Hinzu kommt noch der für die Orientierung der Bilder notwendige Verknüpfungsrahmen (Abb. 3), so dass die aufzunehmende Fläche 44cm x 30cm beträgt. Dadurch ergibt sich eine Auflösung im Objektraum von 0.15mm pro Pixel. Während der Aufnahmen wurde teilweise jedoch ein größerer Aufnahmeabstand eingenommen, so dass die tatsächlich erreichte Auflösung im Schnitt nur bei ca. 0.2mm pro Pixel liegt. Die angestrebte Höhengengenauigkeit liegt bei 0.1mm entsprechend 0.5 Pixel im Bildraum.

2.1 Kamerakalibrierung

Zur Kalibrierung der Kamera wurde eine Kalibrierplatte in Größe des Messobjektes angefertigt (40cm x 30cm). Die Platte besteht aus Edelstahl, auf ihr sind insgesamt 55 Messmarken, davon 7 Hochpunkte (30mm) aufgebracht. Die Punkte sind auf einer wetterfesten, selbstklebenden Kunststoffolie gedruckt. Der Punktdurchmesser beträgt 2mm, so dass sich bei einem Aufnahmeabstand von ca. 40cm eine Abbildungsgröße von ca. 10 Pixel ergibt. Die Auswertung erfolgt mit der Software DPA-win (AICON 3D Systems GmbH).

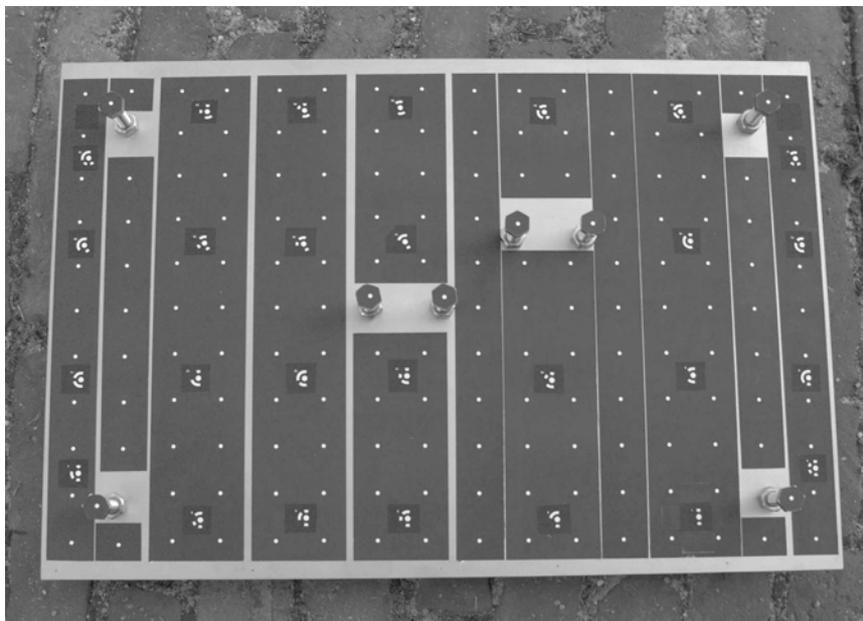


Abb. 1: Kalibrierplatte

Im Rundumverband wurden für die Kalibrierung 17 Aufnahmen gemacht, davon 10 um 90° gekantete Aufnahmen und 2 um 180° gekantete Aufnahmen.

Auf die Instabilität der Kodak DCS 460 ist bereits in KRAUS (1996) hingewiesen worden, die auf die Art der Befestigung der Sensoreinheit mit nur einer Befestigungsschraube an das Ka-

meragehäuse zurück zu führen ist. Da eine Simultankalibrierung auf Grund der ungünstigen Punktverteilung am Objekt nicht sinnvoll ist (vgl. Abb. 3), ist eine möglichst zeitnahe Vorabkalibrierung notwendig. Die Stabilität der Ergebnisse aus der ersten Kalibrierung wurde einige Zeit nach den erfolgten Aufnahmen des Mauerwerkes durch weitere Kalibrierungen überprüft. In der Zwischenzeit war das Objektiv mehrfach gewechselt und die Kamera für andere Projekte eingesetzt worden. Die Ergebnisse der verschiedenen Kalibrierungen bestätigten, dass die Parameter der inneren Orientierung Änderungen unterworfen sind. Die Kamera wird deshalb vor Ort unmittelbar vor den Aufnahmen der einzelnen Epochen mittels der mobilen Kalibrierplatte erneut kalibriert werden.

2.2 Aufnahme des Mauerwerkes

Wichtig für die Vergleichbarkeit der 3D-Modelle aus den einzelnen Epochen ist die Herstellung reproduzierbarer Passpunkte. Diese werden zum Einen durch Passbohrungen am Mauerwerk, zum Anderen durch einen spannungsfrei aufgehängten Passpunkt- bzw. Verknüpfungsrahmen realisiert (Abb. 2 und 3). So können sich die im Mauerwerk befindlichen Punkte und die Punkte auf dem Rahmen gegenseitig kontrollieren.



Abb. 2: Ausbuchtungen im Rahmen für die spannungsfreie Aufhängung

Dieser Rahmen, der wie die Kalibrierplatte aus Edelstahl besteht, hat eine Gesamtgröße von 44cm x 30cm, der freie Innenbereich beträgt 36cm x 22cm. Die Befestigung des Verknüpfungsrahmens am Mauerwerk erfolgt über drei Rändelschrauben, die Einschlaganker verbleiben dauerhaft im Mauerwerk.

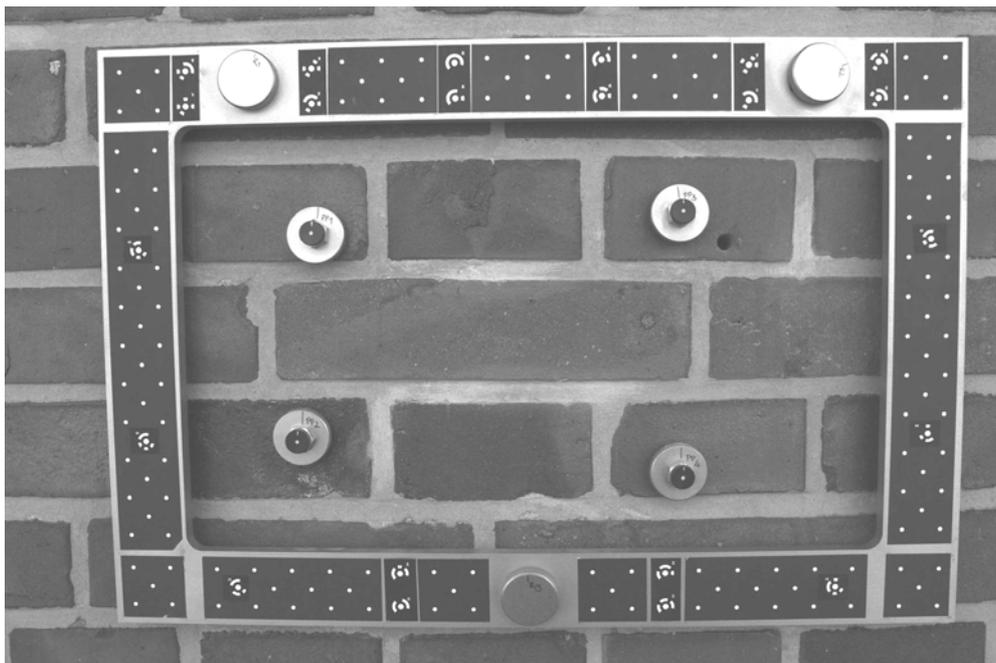


Abb. 3: Am Mauerwerk angebrachter Verknüpfungsrahmen und vier Passpunkte

Die vier Passpunkte im Mauerwerk (im Folgenden auch als Kontrollpunkte bezeichnet) bestehen aus Edelstahlschrauben mit montierten Zielmarkierungen aus Kunststoff. Auch hier verbleiben die Einschlaganker dauerhaft im Mauerwerk.

Um ein Verbiegen des Systems auszuschließen, wird die Bündelausgleichung als freies Netz gerechnet, jedoch mit Einführung von 8 Datumspunkten, die sich oben und unten in der Nähe der Aufhängung des Rahmens befinden. Die Koordinaten dieser Punkte wurden vorab in einer Referenzmessung bestimmt. Durch die unmittelbare Nähe zu den fixierenden Schrauben wird an diesen Stellen von einer einheitlichen Höhe $z = 0$ ausgegangen. Die vier Passpunkte im Mauerwerk wurden als Neupunkte mitbestimmt. Die Punktmessung erfolgte mit der Software DPA-win, die Ausgleichung mit AxOri (AXIOS 3D Services).

2.3 Reproduzierbarkeit des Koordinatensystems in verschiedenen Epochen

Die *innere* Genauigkeit der Objektpunkte war nach der Ausgleichung mit RMS-Werten von durchschnittlich $4\mu\text{m}$ in x - und y -Richtung und $10\mu\text{m}$ in z -Richtung (Aufnahmerichtung) erwartungsgemäß gut (berechnet aus den Standardabweichungen der ausgeglichenen Objektkoordinaten).

Zur Beurteilung der Reproduzierbarkeit des Koordinatensystems wurden zunächst verschiedene Aufnahmeepochen ohne Veränderung des Rahmens und der weiteren Passpunkte erfasst und die ausgeglichenen Objektkoordinaten miteinander verglichen.

Aus den *Koordinatendifferenzen* sämtlicher Punkte des Verknüpfungsrahmens wurde für jede Koordinatenrichtungen ein RMS-Wert ΔP_R ermittelt mit

$$\text{RMS}_{\Delta P_R} = \sqrt{\frac{\sum \Delta P_R^2}{n}} \quad (1)$$

Aus den Koordinatendifferenzen zwischen den ersten drei Aufnahmeepochen (Epoche 0 bis 2) wurden folgende RMS ΔP_R - Werte bestimmt:

	Epoche 1 – Epoche 0	Epoche 2 – Epoche 0
RMS $\Delta P_R(x)$	0.0220mm	0.0325mm
RMS $\Delta P_R(y)$	0.0190mm	0.0212mm
RMS $\Delta P_R(z)$	0.0280mm	0.0259mm

Tab 1 : RMS ΔP_R - Werte aus den Koordinatendifferenzen aller Verknüpfungspunkte über 3 Epochen

Für die vier Kontrollpunkte im Mauerwerk sind die reinen Koordinatendifferenzen aus den ersten drei Aufnahmeepochen in Tabelle 2 dargestellt.

Kontrollpunkt	Differenz Epoche 1 – Epoche 0			Differenz Epoche 2 – Epoche 0		
	Δx [mm]	Δy [mm]	Δz [mm]	Δx [mm]	Δy [mm]	Δz [mm]
1	-0.0043	-0.0060	-0.0151	-0.0112	-0.0066	0.0006
2	0.0108	-0.0111	0.0089	0.0031	-0.0133	0.0344
3	0.0208	0.0060	-0.0039	0.0178	0.0008	-0.0055

4	0.0094	-0.0006	-0.0233	0.0143	0.0044	-0.0319
---	--------	---------	---------	--------	--------	---------

Tab. 2 : Koordinatendifferenzen in den Kontrollpunkten aus Epochen Null bis Zwei ohne Veränderung des Verknüpfungsrahmens und der Kontrollpunkte

Die Epoche 3 wurde einige Tage später aufgenommen, der Rahmen und die Kontrollpunkte im Mauerwerk neu angebracht. Die ausgeglichenen Objektkoordinaten wurden mit denen aus Epoche 2, der zeitnahesten Messung, verglichen. Für die Punkte des Verknüpfungsrahmens ergaben sich aus den Koordinatendifferenzen RMS-Werte von

	Epoche 3 – Epoche 2
RMS $\Delta P_R(x)$	0.0483mm
RMS $\Delta P_R(y)$	0.0299mm
RMS $\Delta P_R(z)$	0.0225mm

Tab. 3 : RMS ΔP_R - Werte aus den Koordinatendifferenzen der Verknüpfungspunkte

Die Koordinatendifferenzen in den vier Kontrollpunkten können Tabelle 4 entnommen werden.

Kontrollpunkt	Differenz Epoche 3 – Epoche 2		
	Δx [mm]	Δy [mm]	Δz [mm]
1	0.1434	0.0918	-0.0166
2	0.2102	0.0642	0.0136
3	0.0965	0.3098	-0.0895
4	0.3308	0.3771	-0.0282

Tab 4 : Koordinatendifferenzen in den Kontrollpunkten nach Wiederanbringen des Verknüpfungsrahmens und der Kontrollpunkte

Die Ergebnisse aus den Koordinatenvergleichen lassen folgende Aussagen zu:

Mit vorliegendem Ausgleichungsansatz ist die Reproduzierbarkeit des Koordinatensystems in ausreichender Genauigkeit gegeben (vgl. Tab. 1 und 2). Zwar ergeben sich nach Entfernen und Wiederanbringen des Passpunktrahmens durch das Spiel der verwendeten Einschlaganker und Schrauben erwartungsgemäß größere Differenzen in x und y, wie der Koordinatenvergleich der Kontrollpunkte in Tabelle 4 zeigt. In der entscheidenden z-Richtung liegen die Differenzen jedoch bei max. 0.1mm und somit im Rahmen der gewünschten Genauigkeit für die Oberflächenvermessung.

3 Generierung und Analyse von 3D-Oberflächenmodellen

Die Generierung der 3D-Oberflächenmodelle erfolgte an einer 3D-Workstation von LH Systems (Software Socet Set). Die für die Stereoauswertung vorgesehenen Aufnahmen werden zunächst mit dem Programm AxIma (AXIOS 3D Services GmbH) zeichnungsfrei gerechnet.

3.1 Auswertung und Vergleich verschiedener Epochen

Für die Berechnung der Oberflächenmodelle wurde eine Rasterweite von 0.5mm gewählt, diese ist damit gröber als die Auflösung der Kamera im Objektraum. Mit den Orientierungsdaten der Bündelausgleichung werden zunächst Normalbilder gerechnet.

Die Korrelation erfolgte mit einem 11 x 11-Pixel großen Bildfenster, wobei die Korrelation nur pixelgenau erfolgt. Über ein festes Raster in XY-Richtung werden Höhenwerte durch Ermittlung von x-Parallaxen berechnet. Das implementierte Verfahren arbeitet mit Bildpyramiden, aber ohne eine endgültige Kleinste-Quadrate-Anpassung. Steile Objektflanken können daher nicht ausreichend modelliert werden und führen zu Fehlkorrelationen.

Aus den generierten 3D-Oberflächenmodellen der verschiedenen Epochen wurden Differenzmodelle gebildet. Zwischen den Epochen wurde der Fugenmörtel flächig mit einer Drahtbürste abgetragen bzw. mit künstlichen Riefen versehen.

Die Visualisierung der berechneten 3D-Oberflächenmodelle erfolgte mit der Software Surfer (Golden Software, Inc.).

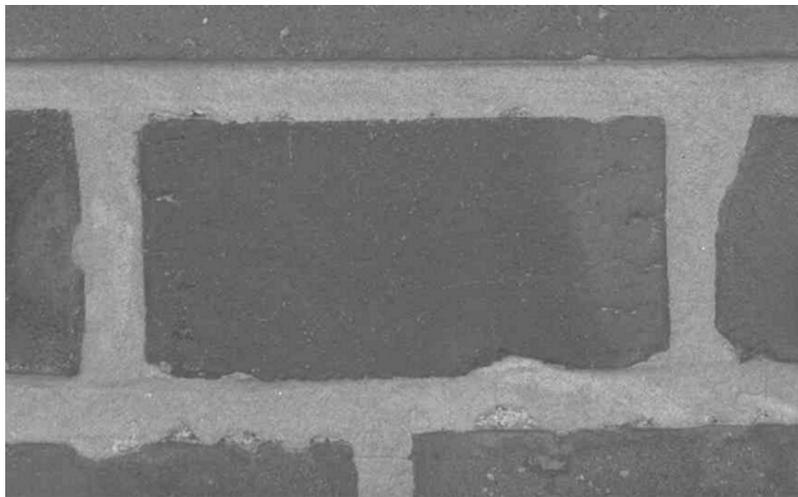


Abb. 4: Untersucher Fugenbereich (im Zustand der Nullmessung)

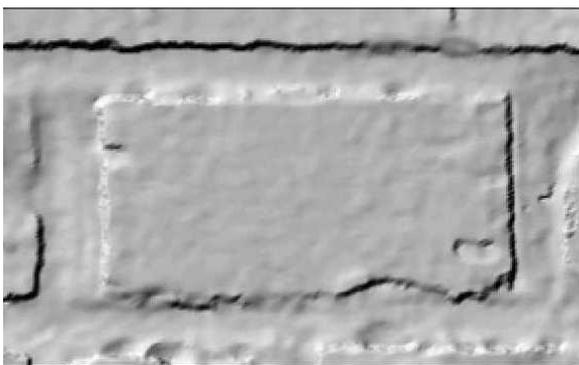


Abb. 5: Shaded relief-Modell der Nullmessung

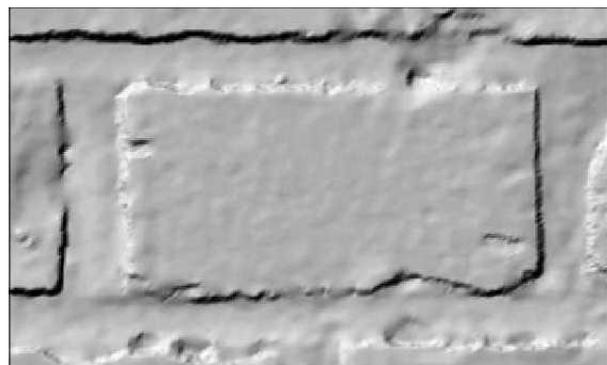


Abb. 6: Shaded relief-Modell der dritten Epoche

Zwischen den einzelnen Epochen wurde der Fugenmörtel mittels Drahtbürste links und oberhalb des Mauersteines gleichmäßig abgetragen. Das Differenzmodell (Abb. 7) gibt den tieferen Mörtelabtrag rechts oberhalb des Mauersteines gut wieder, der durch Einsatz eines Schraubendrehers entstand. Die Differenzen in diesem Bereich betragen bis zu -2.5mm, was nach Augenschein ein realistischer Wert ist. Nicht gut zu erkennen ist der Abtrag durch die

Drahtbürste links des Mauersteines. Hier treten nur stellenweise Differenzen bis zu -0.25mm auf, der Abtrag durch die Drahtbürste erfolgte jedoch gleichmäßig entlang der Fuge, eine Größenordnung lässt sich aber nur schwer schätzen.

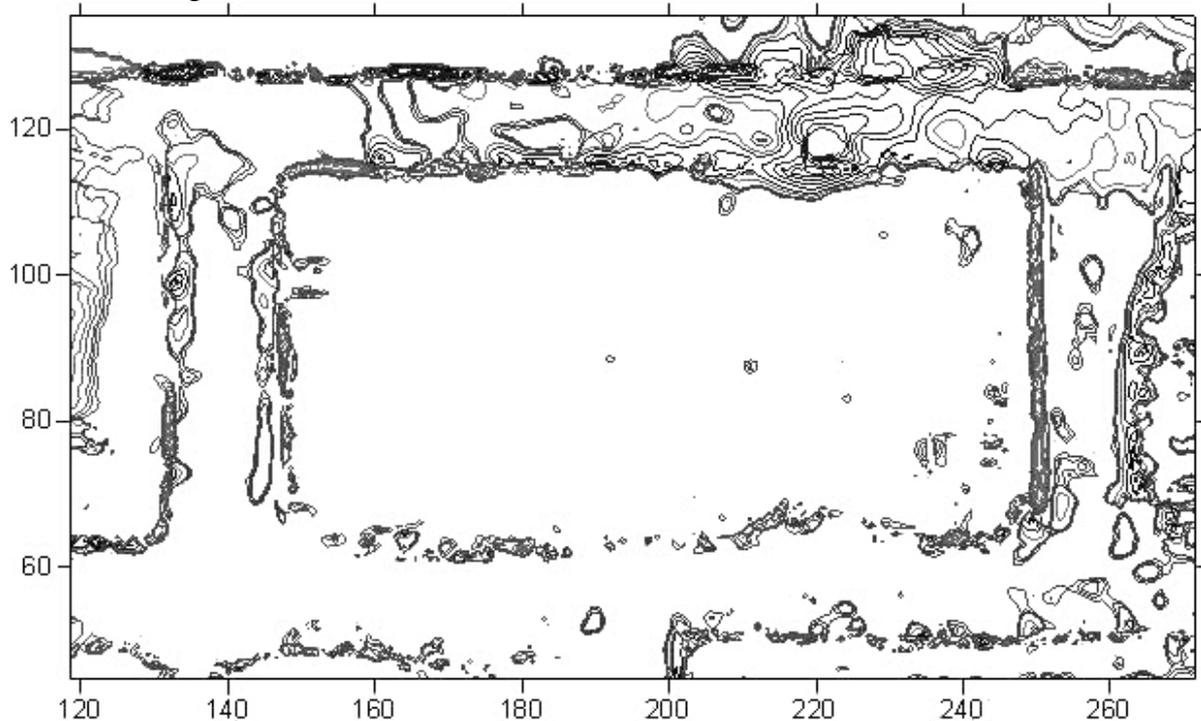


Abb. 7: Differenzmodell der Nullmessung und dritten Epoche
Die Darstellung zeigt die Höhenlinien von -2.0 bis $+2.0$ in 0.25mm -Schritten (ohne Nulllinie)

Die positiven Höhenlinien im Differenzmodell (also ein Auftrag!) treten nur an den Steinkanten auf und zeigen die Schwierigkeit, die Kante des Mauersteines genau zu bestimmen. Da jedoch bei der Untersuchung der Probeflächen eine Gesamtaussage über den vorliegenden Mörtelabtrag getroffen werden soll, ist es unerheblich, ob einzelne Stellen dicht an der Mauerkante durch Ausreißer nicht genau bestimmbar sind.

Ausreißer bleiben jedoch problematisch. In den hier simulierten Aufnahmeepochen ist bekannt, wo durch den eigenhändig verursachten Mörtelabtrag mit Veränderungen zu rechnen ist. Bei der Auswertung der Messkampagnen des Baudenkmals wird deshalb verstärkt auch das Bildmaterial zur Beurteilung von Ausreißern und tatsächlich auftretendem Mörtelabtrag herangezogen werden müssen.

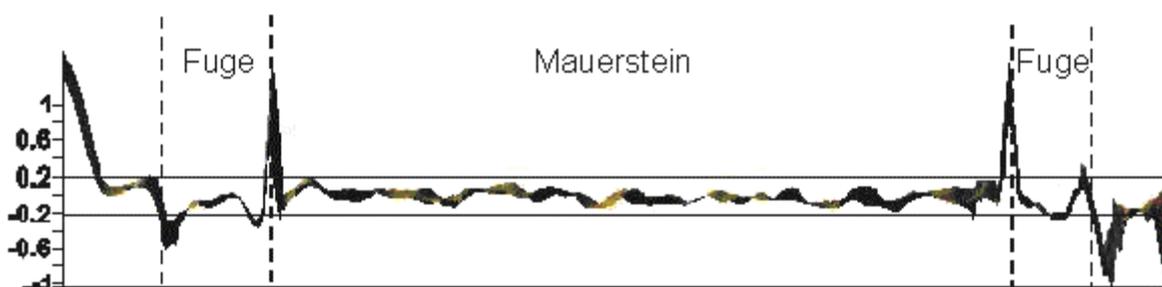


Abb. 8: Querschnitt durch das Differenzmodell

Es stellt sich die Frage, ab welcher Größe ein Fugenabtrag bei vorliegender Aufnahmekonstellation und Auswertestrategie erfasst werden kann. Eine genauere Betrachtung der Höhenli-

nien des Differenzmodells zeigt, dass es auf dem Mauerstein, an dem keine Höhenveränderungen stattgefunden haben, zu einem Grundrauschen von -0.18m bis $+0.18\text{m}$ kommt (Abb. 8). Dieses Grundrauschen steht im Zusammenhang mit der Auflösung der Kamera im Objekt-raum von ca. 0.2mm und der nur pixelgenauen Korrelation bei der DGM-Generierung, sowie dem Verhältnis Aufnahmeentfernung zur Basis von ca. $2:1$. Um dieses Grundrauschen zu reduzieren, wird bei den nächsten Aufnahmen die Auflösung durch einen geringeren Abstand zum Objekt erhöht werden.

3 Ausblick

Ein weiterer Ansatz, der zur Verbesserung der Genauigkeit der 3D-Oberflächenmodelle führen soll, wird in den nächsten Wochen getestet werden. Es handelt sich um den Software-Prototypen FASTVision, eine Entwicklung des IAPG in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer-Institut für Graphische Datenverarbeitung Darmstadt. In dieser Software ist anstatt einer Stereoauswertung der Ansatz des Facetten-Stereosehens umgesetzt (WROBEL 1987, WEISENSEE 1992, WENDT 2002). Das Facetten-Stereosehen entspricht einem allgemeinen objekt-raumorientierten Bildzuordnungsverfahren und beruht auf dem Prinzip der Bildinversion. Anstatt wie in der Stereoauswertung Bildpunkte bzw. Bildbereiche durch Matching zuzuordnen, steht jedes Bild in direktem Bezug zu dem zu rekonstruierenden Objekt.

Weiterhin ist vorgesehen, zu Vergleichszwecken das Untersuchungsobjekt mit einem Streifenprojektionssystem aufzunehmen und die Ergebnisse der photogrammetrischen Aufnahme gegenüber zu stellen.

4 Literaturverzeichnis

- KRAUS, K. (1996): Photogrammetrie. Band 2, Verfeinerte Methoden und Anwendungen. 3. Auflage, Dümmler Verlag, Bonn.
- WEISENSEE, M. (1992): Modelle und Algorithmen für das Facetten-Stereosehen. Dissertation, DGK, Reihe C, Heft Nr. 374, München.
- WENDT, A. (2002): 3D-Matching von ähnlichen Punktwolken in der Hüftendoprothetik. In: Publikationen der DGPF, Band 11, S. 207-216, Potsdam.
- WROBEL (1987): Digitale Bildzuordnung durch Facetten mit Hilfe von Objektraummodellen. In: BuL 55, S.93-101.

Digitale Nahbereichsphotogrammetrie zur Verformungsmessung an bewehrten mineralischen Oberflächenabdichtungen

HARTWIG THOMAS¹ & GÖRRES GRENZDÖRFFER²

Zusammenfassung: Mineralische Oberflächenabdichtungen von Deponien werden durch Setzungen des Abfallkörpers unregelmäßigen Verformungen ausgesetzt. Sie reagieren bei Überschreitung einer zulässigen Verformung mit der Bildung von Rissen. Dadurch wird die Durchlässigkeit der Dichtung erhöht, ihre Funktion geht verloren. Der Einbau einer Geokunststoff-Bewehrung in die Dichtung bewirkt eine Versagensbeschränkung. Zur Untersuchung des Einflusses der Bewehrung auf das Verformungs-Versagens-Verhalten von Dichtungserdstoffen wurde am Institut für Landschaftsbau und Abfallwirtschaft der Universität Rostock eine automatische Versuchseinrichtung entwickelt, die an bewehrten und unbewehrten Proben definierte Verformungszustände erzeugt. Die Verformungsmessung erfolgte photogrammetrisch. Im Beitrag wird die automatische Laborversuchsanordnung vorgestellt und ihre Funktionsweise beschrieben. Das benutzte photogrammetrische Mess- und Auswerteverfahren und seine Genauigkeitsgrenzen werden erläutert sowie Resultate von Versuchsreihen dargestellt und diskutiert.

1 Einleitung

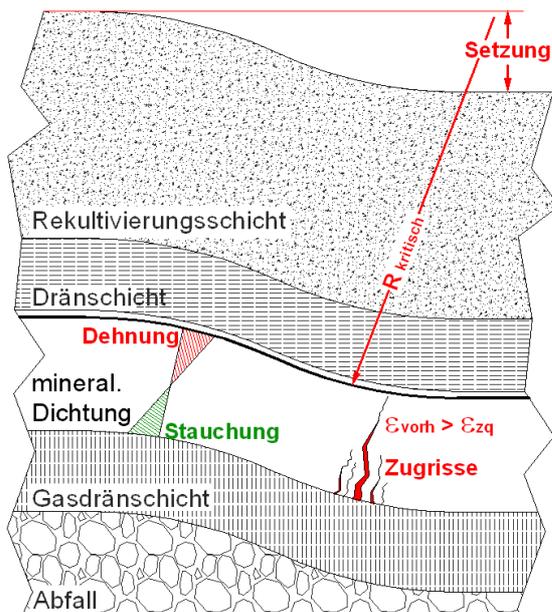


Abb. 1: Rissversagen einer mineral. Oberflächenabdichtung (schematisch)

Den Kern der Kombinationsabdichtung für Deponieoberflächen bildet eine mehrschichtige mineralische Dichtung mit einer Mächtigkeit von 0,5 m (DEPV, 2002). Ihren guten Dichtungs- und Sorptionseigenschaften steht jedoch die hohe Empfindlichkeit gegenüber ungleichmäßigen Verformungen und entgegen.

Mineralische Oberflächenabdichtungen werden durch ungleichmäßige Setzungen des Deponiekörpers unregelmäßigen Verformungen ausgesetzt und reagieren bei Unterschreitung eines kritischen Biegeradius mit der Bildung von Rissen (Abb. 1). Die Flanken dieser Risse sind aufgrund der geringen Auflast durch die überlagernden Schichten standfest, die Risse werden nicht durch Schubversagen des Dichtungserdstoffes geschlossen (SCHERBECK, 1992). Es entstehen Zonen erhöhter Durchlässigkeit.

Die Zugfestigkeit bindiger Erdstoffe resultiert hauptsächlich aus den physikalischen Wechselwirkungen zwischen flüssiger und fester Phase (Wassermenisken in den Poren). Wird die Grenzdehnbarkeit des Materials überschritten (Abb. 1), so versagen die Wassermenisken mit

¹ Dipl.-Ing. Hartwig Thomas, Institut für Landschaftsbau und Abfallwirtschaft, Universität Rostock, Justus-von-Liebig-Weg 6, 18051 Rostock, e-mail: hartwig.thomas@auf.uni-rostock.de

² Dr.- Ing. Görres Grenzdörffer, Institut für Geodäsie und Geoinformatik, Universität Rostock, Justus-von-Liebig-Weg 6, 18051 Rostock, e-mail: goerres.grenzdoerffer@auf.uni-rostock.de

der geringsten Stabilität, z.B. in den einbaubedingten lokalen Grobporen. Es entsteht ein Zugriss. Die Konzentration der Spannungen an der Risspitze bewirkt eine weitere Verlängerung des Risses, was schließlich zur Entstehung eines Trennbruchs führt (QUANDT, 2000). Die elastische Rückdeformation des die Rissufer direkt umgebenden, jetzt geringer belasteten Erdstoffes bewirkt eine Verbreiterung des Risses.

Durch den Einbau einer Geokunststoff-Bewehrungslage in die mineralische Dichtungsschicht soll ein Verbundbauteil entstehen. In diesem werden die bei der Verformung auftretenden, vom Erdstoff nicht mehr aufnehmbaren Zugspannungen auf die Bewehrung übertragen (BHAMIDIPATI, 1996). Die Wirkung der Bewehrung liegt zum einen in der Beschränkung der Rissbreiten und zum anderen verringert die Bewehrung die Konzentration der Spannungen an der Risspitze und damit die Rissverlängerung.

Am Institut für Landschaftsbau und Abfallwirtschaft der Universität Rostock wurde ein Versuchsprogramm initiiert, um die Wirkungsweise von Bewehrungen mit Geogittern in geringverformbaren mineralischen Dichtungsschichten zu ermitteln (THOMAS UND QUANDT, 1999). Zur weitgehend realitätsnahen Simulation wurden großmaßstäbliche Balkenbiegezug-Versuche (Abmessungen der Proben 150 x 150 x 600 mm³) an bewehrten Probekörpern und unbewehrten Referenzproben durchgeführt. Bei den verwandten Dichtungserdstoffen handelt es sich um Materialien, die realen nordostdeutschen Deponiebauvorhaben entstammen. Zur Bewehrung der Proben wurden Geogitter mit unterschiedlicher Zugfestigkeit und Geometrie benutzt. Die Messung der Verformungen und Dehnungen und die Vermessung der Risse erfolgte photogrammetrisch.

2 Versuche und Messungen

2.1 Versuchsgerät

Mit dem an der Universität Rostock entwickelten Biegezug-Versuchsgerät wurden an den bewehrten und unbewehrten Probekörpern unter konstanter Auflast definierte Krümmungszustände erzeugt (vgl. THOMAS, 1997 und THOMAS, 2002).

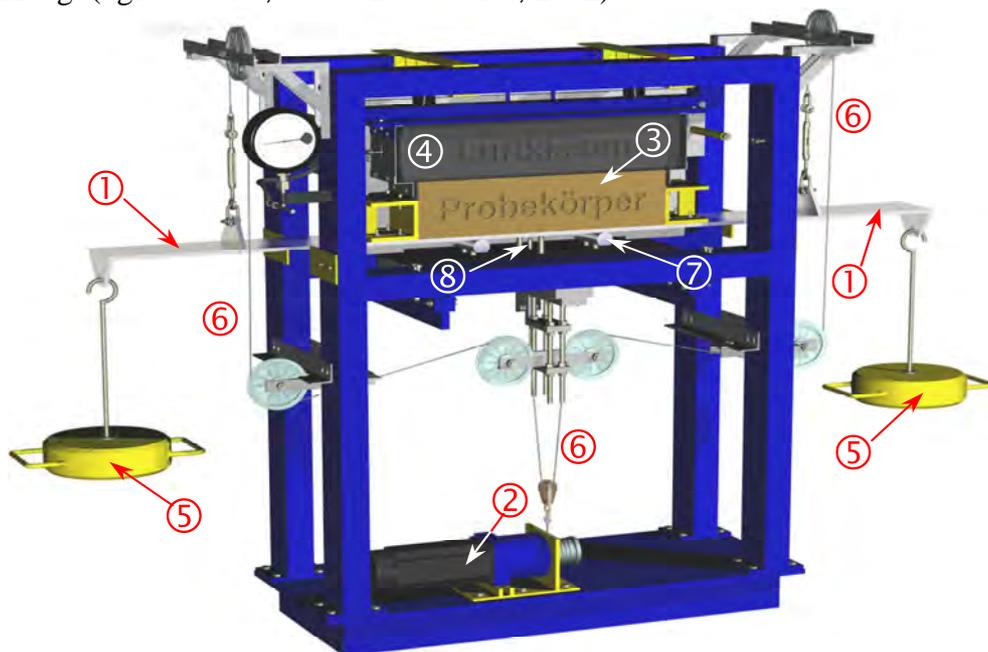


Abb. 2: Automatisches Biegezug-Versuchsgerät

Die Probekörper (3³) werden mit einem Luftkissen (4) auf die durch die Biegeplatte (1) vorgegebene Verformungskontur gepresst. Die Biegeplatte ist dabei auf zwei Zylindern (7) gelagert, so dass sich eine symmetrische Verformung einstellt. Während der Versuche wird von einem numerisch gesteuerten Schrittmotor (2) ein an beiden Seiten der Biegeplatte befestigtes Drahtseil (6) von einer Seiltrommel abgewickelt. Die an den Enden der Biegeplatte eingehängten Gewichte (5) senken sich dabei so ab, dass die Krümmungskontur der Biegeplatte, entsprechend vom unverformten Null- bis zum Endzustand mit maximaler Verformung, verändert wird. Die Seiltrommel kann über den Schrittmotor in Schritten von 0,05 Grad rotiert werden, so dass eine quasikontinuierliche Verformung mit äußerst geringer Vorschubgeschwindigkeit realisierbar ist. Der Krümmungszustand der Biegeplatte wird mit einem Wegaufnehmer (8) gemessen, in einem Display angezeigt und so auf den Messaufnahmen festgehalten. Auf dem Sichtfenster auf der Vorderseite der Proben befinden sich die für die photogrammetrische Messung notwendigen Passpunkte. Die Kamera und die während des Belichtens der Messfotos benötigten Fotolampen werden von der speicherprogrammierten Steuerung des Motors geschaltet, so dass der Versuch nach dem Einrichten des Versuchsgerätes und dem Einbau des Probekörpers vollständig automatisch abläuft.

Zur Ermittlung der Verformungen der Probekörper wird auf deren Sichtseite ein Messfeld etabliert. Dazu wird auf den Proben ein Raster diskreter Messpunkte (113 Punkte) markiert. An der vorderen Kante der Biegeplatte wird eine Punktreihe (19 Punkte) angebracht. Bei den bewehrten Proben werden an den sichtbaren Rippenenden des Geogitters zusätzliche Messmarken befestigt. Alle Punkte des Messfeldes (das Markenraster, die Geogittermarken, die Punkte auf der Biegeplatte und die Passpunkte des lokalen Koordinatensystems) befinden sich mit geringen einbaubedingten Abweichungen in einer Ebene.

2.2 Photogrammetrische Messungen

Da die Proben ein zeitabhängiges Verformungsverhalten zeigen, muss der Verformungszustand des gesamten Messmarkenrasters und das Rissbild zu definierten Zeitpunkten der Versuche festgehalten werden. Somit wurde auf die Nahbereichsphotogrammetrie zurückgegriffen. Bei den Messungen wurden mit einer hochauflösenden CCD-Kamera (Rollei db23 metric, mit bekannter und innerer Orientierung) digitale Einzelbilder mit 3056 x 2032 Pixel bei bestimmten Krümmungsradien der Proben aufgenommen. Die Auswertung beruht auf dem Verfahren der photogrammetrischen Einbildmessung mit Zeitbasis. Dabei muss für jede Serie von Einzelbildern die innere und äußere Orientierung der Kamera bekannt sein und darf während des jeweiligen Versuches nicht verändert werden. Die Kameraposition (KP), d.h. die äußere Orientierung jeder Messbildserie muss vor jedem Versuch ermittelt werden. Dazu wird das Messfeld der unverformten Probe von mehreren unterschiedlichen Kamerastandorten aus fotografiert. Für das letzte Bild dieser Serie wird die Kamera auf der für den Versuch gültigen KP positioniert, ausgerichtet und dann nicht mehr bewegt. Die so gewonnenen Aufnahmen des gleichen, unveränderten Objekts werden mit einem digitalen Mehrbild-Photogrammetriesystem (Australis 5.07) ausgewertet. Dabei werden Parameter der äußeren Orientierung durch eine freie Netzausgleichung ermittelt sowie die innere Orientierung simultan mitbestimmt und schließlich die Koordinaten der Messpunkte hochgenau berechnet. Während der Versuche werden dann von der KP aus die eigentlichen Messbilder (Serie von Einzelbildern) aufgenommen. Nach der Aufnahme des Nullzustandes wird bei einer Versuchsdauer von 20 h für jeden Verformungszustand stündlich je eine Messaufnahme (Abb. 3) belichtet.

³ Die Ziffern beziehen sich auf Abb. 2

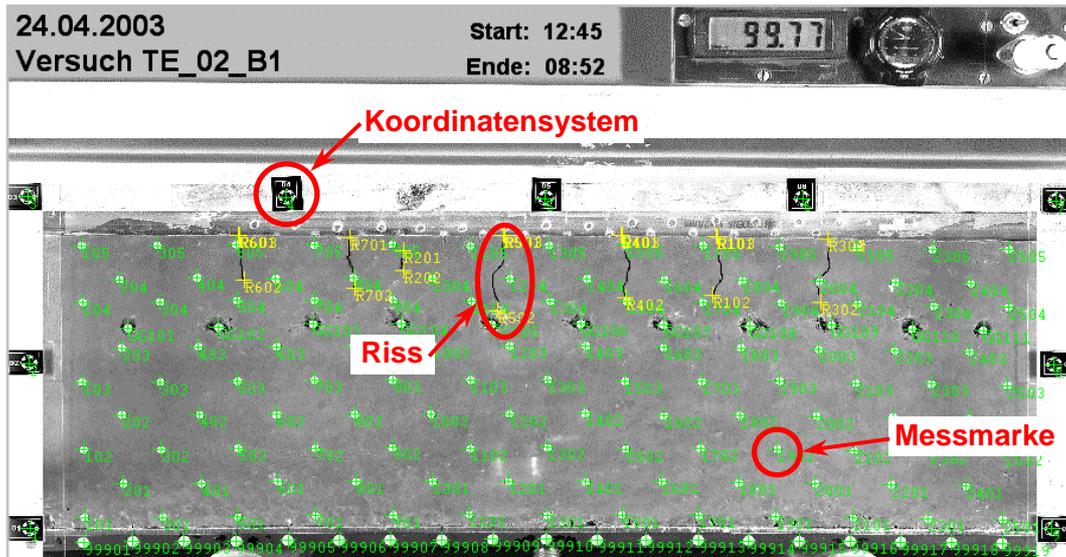


Abb. 3: Messaufnahme (bewehrte Probe)

Die Digitalisierung der Messpunkte und der Rissparameter der in den Versuchen gewonnenen Messaufnahmen erfolgt anschließend in Australis. Dieses liefert für Einzelbilder nur Messwerte in einem kamerafesten Koordinatensystem, d.h. Bildkoordinaten, da die Software für den Mehrbildfall konzipiert ist. Diese Bildkoordinaten müssen deshalb über einen Vorwärtsschnitt in das Zielsystem (Objektkoordinaten) übertragen werden. Für den Vorwärtsschnitt muss eine Umformung der Kollinearitätsgleichungen (Gl. (1) und (2)); siehe z.B. LUHMANN, 2000) erfolgen.

$$x_{roh} = x_{HP} - C \cdot \frac{r_{11} \cdot (X - X_0) + r_{21} \cdot (Y - Y_0) + r_{31} \cdot (Z - Z_0)}{r_{13} \cdot (X - X_0) + r_{23} \cdot (Y - Y_0) + r_{33} \cdot (Z - Z_0)} + \Delta x \quad (1)$$

$$y_{roh} = y_{HP} - C \cdot \frac{r_{12} \cdot (X - X_0) + r_{22} \cdot (Y - Y_0) + r_{32} \cdot (Z - Z_0)}{r_{13} \cdot (X - X_0) + r_{23} \cdot (Y - Y_0) + r_{33} \cdot (Z - Z_0)} + \Delta y \quad (2)$$

- Es sind bekannt:
- x_{roh} und y_{roh} - Bildkoordinaten
 - x_{HP} und y_{HP} - Lage des Bildhauptpunktes (innere Orientierung)
 - Δx und Δy - Verzeichnungsparameter (innere Orientierung)
 - C - Kamerakonstante (innere Orientierung)
 - X_0 ; Y_0 und Z_0 - Koordinaten der KP (äußere Orientierung)
 - r_{11} bis r_{33} - Koeffizienten der Rotationsmatrix (aus ω , φ und κ , äußere O.)
 - Z - Z-Koordinate aus Bündel von der Bestimmung der KP

Es sind gesucht: X und Y - Koordinaten im Objektmaßstab [mm]

Nach diversen Umformungen ergibt sich:
$$X = \frac{u_{x1} + u_{x2} + u_{x3}}{w_{xy}} \quad (3)$$

und:

$$Y = \frac{v_{y1} + v_{y2} + v_{y3}}{w_{xy}} \quad (4)$$

mit:

$$x_{Bild} = x_{roh} - x_{HP} - \Delta x \quad \text{und} \quad y_{Bild} = y_{roh} - y_{HP} - \Delta y$$

$$w_{XY} = x_{Bild} \cdot (r_{13} \cdot r_{22} - r_{12} \cdot r_{23}) + y_{Bild} \cdot (r_{11} \cdot r_{23} - r_{13} \cdot r_{21}) + C \cdot (r_{11} \cdot r_{22} - r_{12} \cdot r_{21})$$

$$u_{X1} = x_{Bild} \cdot [X_0 \cdot (r_{13} \cdot r_{22} - r_{12} \cdot r_{23}) + Z \cdot (r_{23} \cdot r_{32} - r_{22} \cdot r_{33}) + Z_0 \cdot (r_{22} \cdot r_{33} - r_{23} \cdot r_{32})]$$

$$u_{X2} = y_{Bild} \cdot [X_0 \cdot (r_{11} \cdot r_{23} - r_{13} \cdot r_{21}) + Z \cdot (r_{21} \cdot r_{33} - r_{23} \cdot r_{31}) + Z_0 \cdot (r_{23} \cdot r_{31} - r_{21} \cdot r_{33})]$$

$$u_{X3} = C \cdot [X_0 \cdot (r_{11} \cdot r_{22} - r_{12} \cdot r_{21}) + Z \cdot (r_{21} \cdot r_{32} - r_{22} \cdot r_{31}) + Z_0 \cdot (r_{22} \cdot r_{31} - r_{21} \cdot r_{32})]$$

$$v_{Y1} = x_{Bild} \cdot [Y_0 \cdot (r_{13} \cdot r_{22} - r_{12} \cdot r_{23}) + Z \cdot (r_{12} \cdot r_{33} - r_{13} \cdot r_{32}) + Z_0 \cdot (r_{13} \cdot r_{32} - r_{12} \cdot r_{33})]$$

$$v_{Y2} = y_{Bild} \cdot [Y_0 \cdot (r_{11} \cdot r_{23} - r_{13} \cdot r_{21}) + Z \cdot (r_{13} \cdot r_{31} - r_{11} \cdot r_{33}) + Z_0 \cdot (r_{11} \cdot r_{33} - r_{13} \cdot r_{31})]$$

$$v_{Y3} = C \cdot [Y_0 \cdot (r_{11} \cdot r_{22} - r_{12} \cdot r_{21}) + Z \cdot (r_{12} \cdot r_{31} - r_{11} \cdot r_{32}) + Z_0 \cdot (r_{11} \cdot r_{32} - r_{12} \cdot r_{31})]$$

Mit den Gleichungen (3) und (4) lassen sich jetzt die in Australis ermittelten Bildkoordinaten in Objektkoordinaten transformieren.

2.3 Messgenauigkeit

Die mit diesem Messverfahren erreichten Genauigkeiten wurden in Eichversuchen ermittelt. Dazu wurde eine unveränderliche Testprobe unter Versuchsbedingungen fotografiert und vermessen. Die statistische Auswertung der jeweils 4268 Einzelmessungen von Punktkoordinaten ergab einen Fehler für Längenmessungen von $\pm 5 \mu\text{m}$. Die Ermittlung des Fehlers der Dehnung lieferte Messabweichungen von $\pm 0,005 \%$ (Dehnungsprozent). Die ermittelten Messgenauigkeiten werden bei jedem Versuch auf Basis von Referenzpunkten im Messfeld der Proben überprüft.

2.4 Auswertung der Messdaten

Die Parameter, die aus den Koordinaten der Punkte im Messfeld der Proben ermittelt werden sind in Abb. 4 dargestellt.

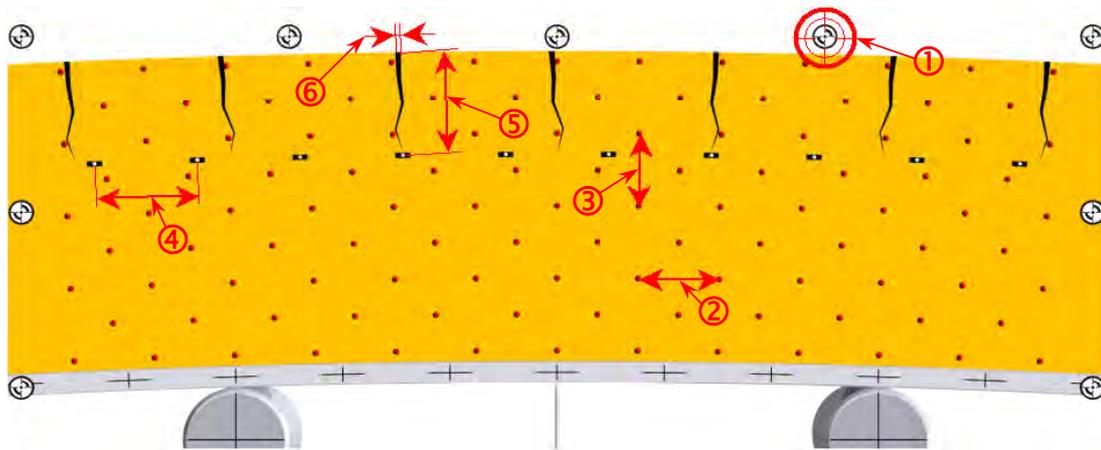


Abb. 4: Messungen an den verformten Proben

- (1) - Messfehler auf Basis des lokalen Koordinatensystems
- (2) - Horizontaldehnungen aus den Koordinaten der Messrasterpunkte (104 Werte je Bild)
- (3) - Vertikaldehnungen aus den Koordinaten der Messrasterpunkte (88 Werte je Bild)
- (4) - Dehnung in der Geogitterbewehrung (Messmarken auf den Geogitterrippen)
- (5) und (6) - Risslängen und Rissbreiten (3 Punkte je Riss)

Des Weiteren wird das Ebenbleiben der Querschnitte der Probe (Bernoulli-Hypothese) überprüft, die in der Probe vorliegenden Biegegraden werden ermittelt und die durch die Biegeplatte vorgegebene Verformungskontur wird bestimmt.

3 Ergebnisse

Die Versuche wurden mit der Zielstellung ausgewertet, den Einfluss der Bewehrung auf die Horizontalspannungsverteilung und die Versagenscharakteristik bezüglich Rissanzahl, Rissbreiten und -tiefen einzuschätzen und mit unbewehrten Prüfkörpern zu vergleichen. Dabei trat die erwartete Tendenz einer Zunahme der Rissanzahl bei bewehrten Versuchen gegenüber unbewehrten Proben nicht immer auf.

Die unbewehrten Proben zeigten ein einheitliches Rissverhalten, was auf die Einhaltung von konstanten Randbedingungen hinweist. In den Prüfkörpern entstanden wenige große Risse bis zum völligen Versagen der meisten Proben im Endzustand der Verformung. Eine Überprüfung der Verschiebungsvektoren der Messmarken ergab keine Hinweise auf systematische Fehlereinflüsse durch die photogrammetrische Messung, wie sie z.B. bei ungewollter Veränderung der KP auftreten würden. Es zeigte sich, dass die in den Eichversuchen ermittelten Messgenauigkeiten auch unter realen Versuchsbedingungen reproduzierbar sind.

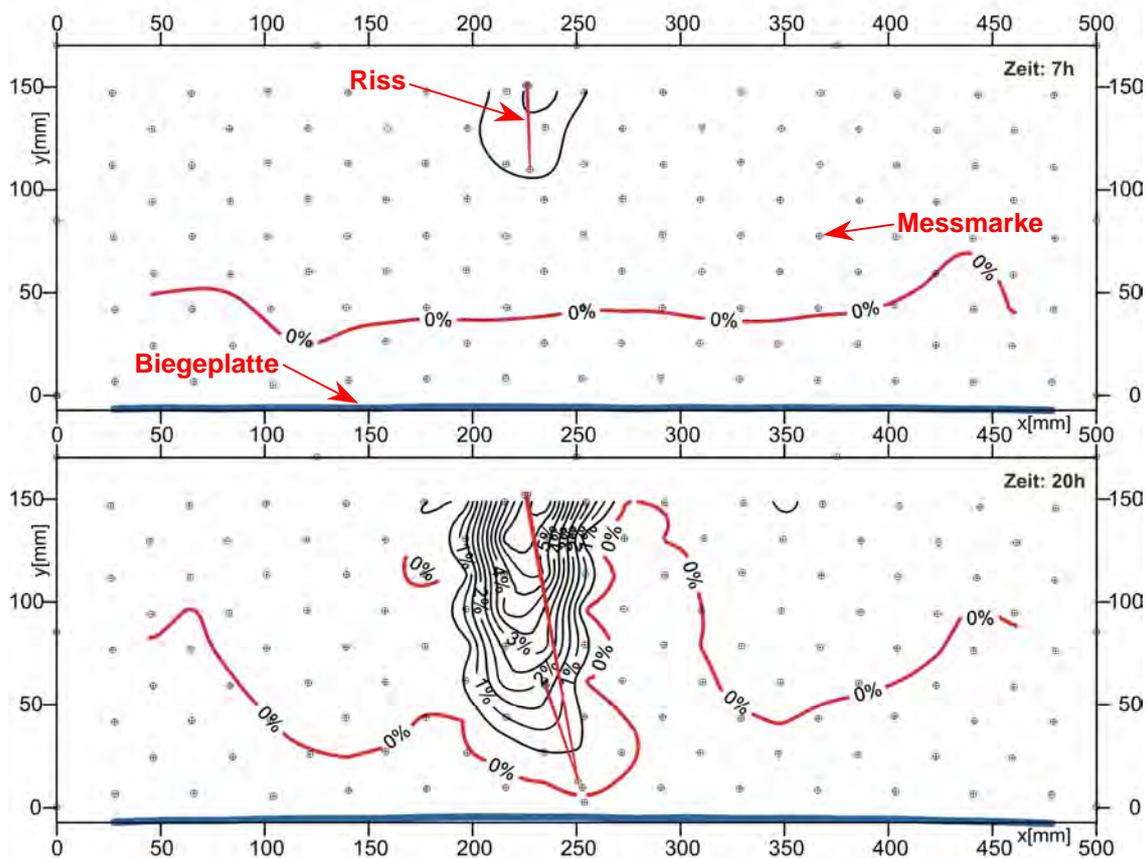


Abb. 5: Horizontaldehnungen in [%] und Rissverlauf Erdstoff IL unbewehrt, Biegestufe 7 und 20

In Abb. 5 sind die Entwicklung der Dehnungen und die Rissentwicklung einer unbewehrten Probe dargestellt. Die Lage der neutralen Faser ($\epsilon = 0\%$) verschob sich während der Verformung aus dem unteren Drittel der Probe an der Risspitze weiter abwärts. An den Rissflanken wurde der Erdstoff nicht mehr auf Zug beansprucht, so dass sich elastische Rückdeformatio-

nen ausbilden konnten. Dieser Prozess führte selbst dann zum Fortschreiten der Risse, wenn keine weitere Verformung der Proben erfolgte. Die dargestellten Isolinienbilder wurden auf Basis von jeweils 104 Einzelwerten pro Versuchsfoto mit linearer Kriging-Interpolation ermittelt und wurden zur Veranschaulichung der Verformungs- und Versagensprozesse mit dem Rissbild überlagert. Die Einzelwerte der Dehnung wurden aus den Verschiebungen der Messmarken im Vergleich zum Nullfoto bestimmt. Dabei wurde in jeder Rasterzeile zwei-

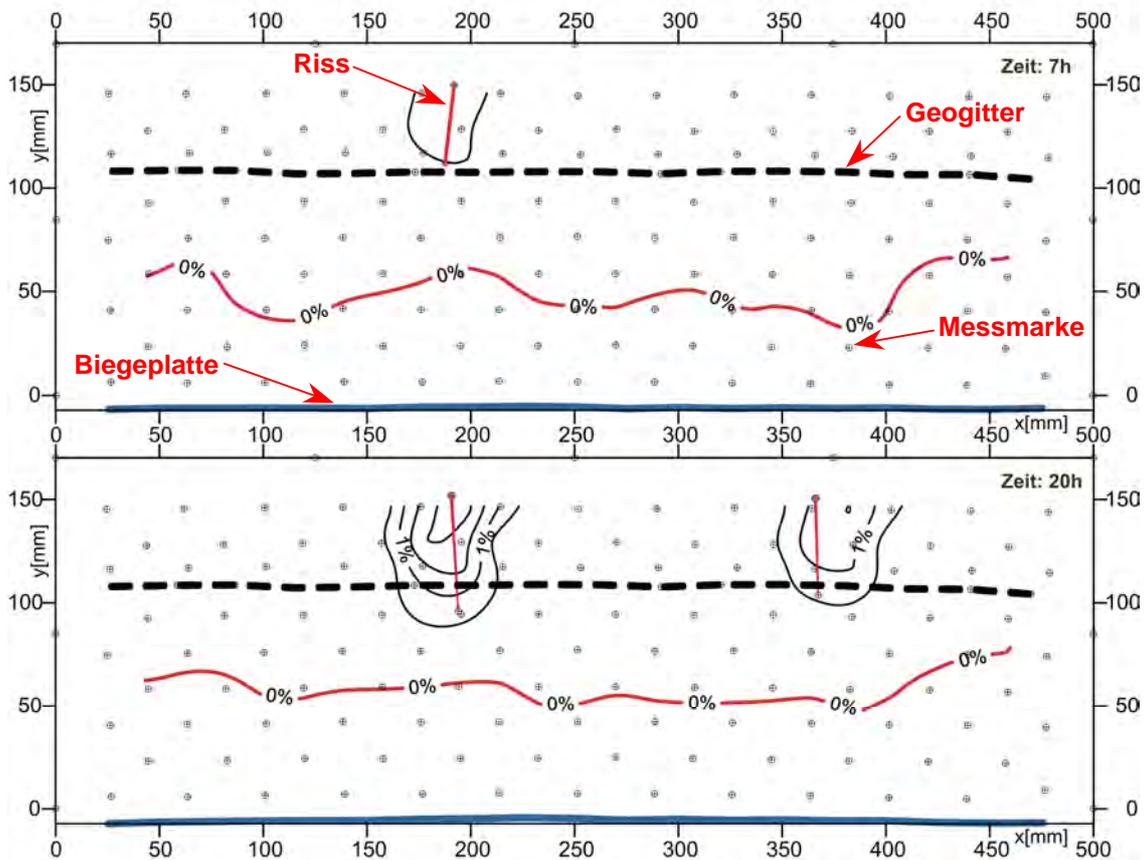


Abb. 6: Horizontaldehnungen in [%] und Rissverlauf Erdstoff IL bewehrt (B02), Biegestufe 7 und 20

schen zwei direkt benachbarten Punkten die horizontale Längenänderung berechnet. Die Analyse der Horizontaldehnungsentwicklung der bewehrten Proben Abb. 6 zeigt, dass das Geogitter einen deutlichen Einfluss auf die Dehnungs- und damit auch auf die Spannungsvergleichmäßigkeit hat und der entspannungsbedingten Rissvergrößerung entgegenwirkt. Eine Beschränkung der Rissbreiten durch die Bewehrung konnte bei allen bewehrten Proben beobachtet werden. Die positive Wirkung der Bewehrung war auch bezüglich der Risstiefen festzustellen. Während unbewehrte Probekörper mit nahezu vollflächigem Versagen reagierten, erreichten die maximalen Risstiefen der meisten bewehrten Proben nur den Bereich der Bewehrungslage bzw. liefen geringfügig darüber hinaus.

Wie im Vergleich von Abb. 5 und Abb. 6 deutlich wird, verhindert die Bewehrung eine Verschiebung der neutralen Faser nach unten. Die vom Erdstoff nicht aufnehmbaren Biegespannungen werden auf das Geogitter übertragen. Dieses setzt einen formschlüssigen Verbund zwischen Bewehrung und Erdstoff und eine ausreichende Zugfestigkeit der Bewehrung voraus. Es konnte festgestellt werden, dass beim dünneren Geogitter, auf Grund des schlechteren

Verbundes dessen Zugfestigkeit nicht ausgenutzt werden konnte. Die derart bewehrten Proben reagierten ähnlich den unbewehrten Prüfkörpern mit fast vollflächigem Versagen.

4 Zusammenfassung

Das angewandte photogrammetrische Messverfahren lieferte stabile Ergebnisse mit hoher Genauigkeit. Die Methode der Einbildmessung mit Zeitbasis eignete sich zur Lösung des geschilderten ebenen Vermessungsproblems. Zur Ermittlung der inneren und äußeren Orientierung der Kamera mit entsprechender Genauigkeit konnte auf ein Mehrbildverfahren zurückgegriffen werden. Im Nahbereich (Kameraentfernung zum Objekt ca. 90 cm) unter Laborbedingungen (einstellbare Kontrast- und Lichtverhältnisse) stellte dieses Messverfahren eine kostengünstige Alternative zum Einsatz eines metrischen Stereokamerasystems dar. Im Zuge der Untersuchungen wurden ca. 850 Messaufnahmen und ca. 100 Aufnahmen zur Kamerakalibrierung innerhalb von sechs Monaten belichtet und ausgewertet. Durch den Einsatz einer metrischen Digitalkamera und der Auswerte-Software mit semiautomatischer Punktdigitalisierung ließ sich der Bearbeitungsaufwand begrenzen ohne bei der Messgenauigkeit Kompromisse eingehen zu müssen. Mit der dargestellten Labor-Versuchsanordnung wurden verschiedene Geogitter-Erdstoff-Kombinationen in mehreren parallelen Versuchsreihen und unbewehrte Referenzproben des Dichtungserdstoffes untersucht, um gesicherte Aussagen zum Verformungs-Versagens-Verhalten der Dichtungsverbundsysteme treffen zu können.

Durch den Einbau von Geogittern in geringstverformbaren Deponieoberflächenabdichtungsschichten kann das Verformungs-Versagens-Verhalten bei Biegezugbeanspruchung deutlich beeinflusst werden. Es lässt sich eine aktive Beschränkung von Rissen und Dehnungen bewirken, wenn auf Grund der Geometrie der Bewehrung ein formschlüssiger Verbund zwischen Geogitter und Erdstoff gewährleistet werden kann. Die beste Wirkung in den Versuchen erzielte das steifere Bewehrungsmaterial mit geringeren Öffnungsweiten, deutlicherer Rippenausprägung und größerer Ausdehnung quer zur Bewehrungsebene.

5 Literaturverzeichnis

- BHAMIDIPATI, V.V.S. (1996): Geosynthetic Reinforced Mineral Sealing Layers of Landfills. Dissertation, Schriftenreihe des Institutes für Grundbau der Ruhr-Universität Bochum, Heft 28.
- DEPV, (2002): Verordnung über Deponien und Langzeitlager - Deponieverordnung vom 24. Juli 2002, BGBl. I Nr. 52 vom 29.7. 2002, S. 2807, Bundesanzeiger Verlag, Bonn.
- LUHMANN, T. (2000): Nahbereichsphotogrammetrie – Grundlagen, Methoden und Anwendungen. H. Wichmann Verlag, Heidelberg.
- QUANDT, T. (2000): Ein Beitrag zur Untersuchung des Grenzzugspannungs-Dehnungsverhaltens mineralischer Dichtungsschichten. Dissertation, Mitteilung / Institut für Landschaftsbau und Abfallwirtschaft der Universität Rostock, VI 100, VI S.
- SCHERBECK, R. (1992): Geotechnisches Verhalten mineralischer Deponieabdichtungsschichten bei ungleichförmiger Verformungswirkung. Dissertation, Schriftenreihe des Institutes für Grundbau der Ruhr-Universität Bochum, Heft 16.
- THOMAS, H. (2002): Untersuchungen zum Rissverhalten geogitterbewehrter Deponieoberflächenabdichtungsschichten – Entwicklung einer automatisierten Labor-Versuchs- und Messanordnung. In: Hörteraner Berichte zu angewandten Umweltwissenschaften 03 - Austrocknungsverhalten mineralischer Abdichtungsschichten

in Deponie-Oberflächenabdichtungssystemen. Tagungsband - Status Workshop, Höxter, S. 297-307.

THOMAS, H. UND QUANDT, T. (1999): Untersuchungen zum Rissverhalten geogitterbewehrter Deponieabdichtungen. In: Geotechnik, Sonderheft zur 6. FS-KGEO 1999 in München, S. 27-30.

THOMAS, H. (1997): Entwicklung einer photogrammetrischen Messmethode zur Erfassung der Grenzverformbarkeit bewehrter und unbewehrter mineralischer Abdichtungsschichten. Diplomarbeit, Universität Rostock, Institut für Landschaftsbau und Abfallwirtschaft.

DGM-Erstellung und Reliefanalyse aus Schrägluftbildern in Alaska als Grundlage angewandter Klimaforschung

LARS GLEITSMANN¹ & MARTIN KAPPAS¹

Zusammenfassung: Zur Durchführung von Luftbildbefliegungen unter für Senkrechtluftbildflüge ungenügenden Wetterbedingungen, wurde innerhalb des Geographischen Institutes der Universität Göttingen ein neuer Ansatz entwickelt: Um in ozeanisch geprägten Hochgebirgen, bei auf den Gipfeln aufliegender Wolkendecke, DGM's von Gletschern und Blockgletschern erstellen zu können, werden im Tiefflug innerhalb des Talgefäßes Schrägluftbilder erstellt, die als Mehrbildverband in einem Nahbereichs-Photogrammetrie-System photogrammetrisch auswertbar sind. Die so gewonnenen Informationen werden in einer Zusammenarbeit mit United States Geological Survey (USGS) für die Klimaforschung, die Geomorphologie und die Beurteilung des lokalen Naturgefahrenpotentials eingesetzt. Wenn es die Wetterbedingungen zulassen, werden die Schrägluftbildverbände durch Senkrechtluftbilder ergänzt, das verwendete System benötigt dabei keine Kameramontage oder Schwingungsdämpfung am Flugzeug, wodurch der notwendige Aufwand wesentlich reduziert wird.

1 Einleitung

In den letzten Jahrzehnten ist in Alaska ein Rückzug der meisten Gletscher und ein Zurückweichen des Meereises (der Packeisgrenze) nach Norden beobachtet worden (einige wenige Gletscher stoßen jedoch, anscheinend unabhängig vom globalen Trend, vor). Diese Effekte gehen einher mit der Veränderung der Vegetationsgrenzen und des Permafrostes. Diese Veränderungen könnten im Zusammenhang mit Auswirkungen des Phänomens eines weltweiten Klimawandels („Global change“) stehen. Derartige Klimaveränderungen bewirken im Bereich der Arktis und Subarktis auch morphologische Veränderungen. Gletscherstände und Formen des Permafrostes reagieren eher auf eine Klimaveränderung als auf Wetterschwankungen und bilden deshalb gute Klimaindikatoren. Die Indikation dieser Veränderungen wird durch ein Verfahren ermöglicht, Formveränderungen an geomorphologischen Phänomenen und Gletscheroberflächen mittels weniger, zeitlich versetzter, tiefer Vorbei- bzw. Überflüge und den dabei erstellten Schrägluft-Messbildern zu diagnostizieren. Mittels moderner, digitaler Nahbereichs-Photogrammetrie kann z.B. die Volumenveränderung der Kalbungsfront einer Gletscherzunge vom Leichtflugzeug aus ermittelt werden. Ziel dieser Forschungsarbeiten ist die Quantifizierung der Gletscher- und Morphodynamik mit höchstmöglicher Genauigkeit durch die Ableitung hochgenauer Gletscheroberflächen- und Geländemodelle.

Im Rahmen des DFG Projektes „Monitoring von Gletscherzungen in Alaska mittels digitaler Photogrammetrie aus Schrägluftbildern zur Quantifizierung von Gletscherschwankungen und Erfassung des Naturgefahrenpotenzials“ werden mehrere Gletscher Süd-Zentral-Alaskas regelmäßig mit Luftbildern überwacht. Derzeit ist es notwendig, zur Maßstabherstellung und Georeferenzierung der Meßergebnisse durch Geländearbeit Daten zu gewinnen bzw. „ground controlled Surveys“ durchzuführen. Das Projekt verfügt dabei über eine eigenständige Befliegungsdatengrundlage, die bis 1996 zurückreicht und 6 Befliegungskampagnen der Zielgletscher beinhaltet. Im Rahmen der Kooperation mit USGS wird auch der Wolverine Glacier, einer der drei „Benchmark Glaciers“ der USGS untersucht: Dieser Gletscher in der

Kenai Halbinsel wird seit 38 Jahren beforscht und gilt als einer der bestuntersuchten Gletscher Nordamerikas.

2 Die angewandte Technik

Die in den Vorarbeiten erprobte Methode der digitalen Geländemodell- und Oberflächenmodellerstellung aus Schrägluftbildern, die frei Hand aus dem offenen Fenster eines einmotorigen Flugzeuges kostengünstig und schnell entstehen, bietet hier wesentliche Vorteile gegenüber den herkömmlichen Methoden. Dabei ist auch weiterhin eine senkrechte Perspektive innerhalb dieser Photogrammetrie-Methode nutzbar, aber nicht im geringsten (wie bisher) erforderlich. Da mit unbekanntem Kamerastandorten gearbeitet werden kann, ist es möglich, ohne jede im Voraus festgelegte Befliegungslinie (von der nicht abgewichen werden könnte), den Flugweg durch den Forschungsraum als Momententscheidung zu wählen und den fliegerischen Erfordernissen und den günstigsten Aufnahmeperspektiven jederzeit anzupassen. Die Kamera als solche kann genauso gut, wenn es die Geländebedingungen und die Fragestellung zulassen, auch terrestrisch eingesetzt werden.

Der aus den Vorarbeiten abgeleitete methodische Ansatz ermöglicht Messungen, bis hin zum DGM, aus „frei Hand erstellten Schrägluftbildern“. Damit wird die Nutzbarkeit des Forschungskonzepts durch die weitreichenden Analysemöglichkeiten nachgewiesen. Zweifelsohne sind viele sich ergebende Fragestellungen der geomorphologischen Geländearbeit nicht ohne terrestrische Untersuchungen zu klären, aber vom Ansatz der Morphometrie bietet die Schrägluftbildperspektive im Hochgebirge die einzige Möglichkeit zur flächenhaften Quantifizierung von Oberflächenveränderungen. Dies gilt besonders für den hier geführten Nachweis eines luftgestützt funktionierenden, in die Methode eingebundenen Nahbereichs-Photogrammetrie-Systems.

Die Voruntersuchungen belegen, dass mit Hilfe der vom Leichtflugzeug aus erstellten Messbilder diese neue Methode der Nahbereichs-Photogrammetrie für die Fernerkundung anwendbar geworden ist. Sie kann wesentlich genauere Ergebnisse als Senkrechtluftbilder und Satellitenbildtechnik liefern. Aufgrund der gegebenen Bedingungen im Hochgebirge ist die hier vorgestellte Methode den bisher angewandten photogrammetrischen Methoden mit Senkrechtluftbildern aufgrund einer Vielzahl von Faktoren überlegen.

Aufgrund der erzielbaren hohen Messgenauigkeit ist es damit möglich geworden, Volumenveränderungen an Gletschern in kürzeren Beobachtungszeiträumen festzustellen, und durch den Vergleich zwischen den unterschiedlichen Digitalen Gelände- und Oberflächenmodellen (DGM) verschiedener Zeitpunkte zu quantifizieren. Da die dabei verwendeten Schrägluftbilder unter wesentlich geringeren Anforderungen an die Wetterbedingungen erstellt werden können, als dies bei Senkrechtluftbildern der Fall ist, ist die nötige Aufenthaltsdauer im Gelände wesentlich kürzer als es mit den bisherigen Methoden erforderlich war.

Diese Methode kann in Zukunft aufgrund ihrer großen Flexibilität für eine Vielzahl von Fragestellungen genutzt werden. Die deutliche Kostenreduktion gegenüber der Senkrechtluftbildtechnik und auch hochauflösenden Satellitenbildern kann eine Erfassung von Objekten in bisher unbeforschten Naturlandschaften zulassen. Dabei ist jedoch das System grundsätzlich ideal für Einzelziele geeignet, weniger für die flächendeckende Erfassung einer Landschaft. Durch die so erweiterten Möglichkeiten der Morphometrie wird eine Verbesserung der Datengrundlage für die Forschung und die Zukunftsprognosen in Bezug auf die Klimaentwicklung (Global Change) daraus ableitbar sein. Eine Evaluation von Naturgefahrenpotentialen, besonders in entlegenen Gebieten, wird dadurch wesentlich vereinfacht, bzw. erst ermöglicht.

Die Wetterverhältnisse im Süden Alaskas erlauben die Erstellung von Senkrechtluftbildern nur an sehr wenigen Tagen im Jahr, meist aufgrund der Wolkenbedeckung. An klaren Tagen ist oft die Windgeschwindigkeit (und / oder die Turbulenz) derart stark, dass eine Befliegung unmöglich wird. Gehen die Turbulenzen an Tagen mit Flugwetter über ein gewisses Maß hinaus, ist kein gezieltes Photographieren mehr möglich. Der Ansatz der Schrägluftbild-Befliegung bietet über den wesentlichen Vorteil der weitgehenden Wetterunabhängigkeit hinaus, auch die geeignetere Perspektive im Hochgebirge. Dies gilt insbesondere in Alaska, mit den im Forschungsgebiet außerordentlich steilen Bergflanken.

Das Prinzip der Schrägluftbild-Verbände zur Aufnahme von Gletschern in Steillagen und/oder bei Niedrigflügen unter einer Wolkendecke ist auch daher hervorragend geeignet, die Geländeoberfläche aufzunehmen, weil durch die steilen Geländebedingungen und den frei wählbaren Blickwinkel nach unten, im Regelfall eine nahezu senkrechte Perspektive auf den grössten Teil der Oberfläche des Zielgebiets in der Naturlandschaft erreicht wird. Damit ist in diesem Fall der Anwendung die Schrägluftbild-Photogrammetrie-Perspektive in einem entscheidenden Vorteil gegenüber der üblichen Senkrechtluftbild-Stereophotogrammetrie, in der Steilhänge stark verkürzt abgebildet werden.

2.1 Die Methodik der Auswertung

Die Messbilder werden mit der analogen Mittelformat Messkamera Rollei6008metric erstellt. Die Verwendung einer digitalen Messkamera ist bei den vorherrschenden Temperaturbereichen in Flughöhen von mehr als 2000 m (bei Temperaturen von minus 40°C bis plus 5° C) nicht ausreichend sicher möglich. Diese analogen Reséaukamera-Messbilder werden dann mit einem hochwertigen Scanner digitalisiert.

Als Mehrbildphotogrammetrie bzw. Mehrbildverfahren wird das in der RolleiMetric Software verwendete Verfahren zur photogrammetrischen Bildauswertung bezeichnet. Anstatt nur zwei Bilder zur Bildauswertung heranzuziehen (z.B. bei der Stereophotogrammetrie) können bei dem Mehrbildverfahren ausgewählte Bilder eines Bildverbandes kombiniert und zur Auswertung benutzt werden. Dadurch wird eine größtmögliche Flexibilität in der Anwendung gewährleistet. Die Mehrbildauswertung ist ein Verfahren zur Punktbestimmung und einer daraus resultierenden linienhaften Auswertung eines Objektes in jeweils mehreren (mindestens 3) Messbildern eines Bildverbandes. Die Objektpunkte werden dabei mittels Vorwärtsschritt bestimmt. Dabei kann die Erfassung von Punkt- und Linien-Informationen an der natürlichen Objektoberfläche orientiert durchgeführt und gespeichert werden. Bereits im Jahre 1996 war das Vorgängersystem RolleiMetric MR2 als „An innovative system for capturing three-dimensional measurements...“ (WARNER, GRAHAM, & READ, (Hrsg.) 1996, S.60) bekannt geworden und ermöglichte ...”Three dimensional coordinates are calculated by identifying the same points in three or more photographs” (WARNER, GRAHAM, & READ, (Hrsg.) 1996, S.61).

Die im Projekt erstellten Messbilder werden grundsätzlich als Mehrbildphotogrammetrie-Bildverbände angelegt, aus denen die für die Auswertung benötigten Bildkombinationen entnommen werden. Es werden aber je nach Wetterbedingungen und Ziel (Gletscher) auch Stereo-Senkrechtluftbilder und stereophotogrammetrisch auswertbare Messbilder (als Schrägluftbilder) erstellt. So wird z.B. das sehr flache Gletscherzungen-Ende der Knik-Gletscherzunge (das in nur 350m ü.d.M. liegt) entweder mit annähernd senkrechten Mehrbildverbänden oder direkt mit Senkrechtluftbildern erfasst, wenn die Wolkenuntergrenze dies zulässt. Die Schrägluftbilder ergeben teilweise einen senkrechten Blickwinkel auf die Zieloberfläche des Gletschers, da einige Gletscher zum Teil außerordentlich steil geneigt sind. Diese Messbilder sind dann auch wie Senkrechtluftbilder auswertbar und eine automatische Messung von Bildpunkten kann erfolgen.

Bei der Aufnahme der Messbilder sind, im Gegensatz zu traditionellen Senkrechtluftbildaufnahmen, Forward Motion Compensation (FMC) und eine Stabilisierung der Kamera nicht notwendig. FMC ist wegen der bei den Aufnahmen geringen Fluggeschwindigkeit der verwendeten Flugzeuge von 65 Knoten (120,9 km/h; Cessna C185) oder von 29 Knoten (53,9 km/h; Antonov AN2) und der hohen Verschlussgeschwindigkeit von mindestens 1/500 oder 1/1000 Sekunde der Mittelformat-Messkamera nicht notwendig. Bei der gegebenen Größe der Zielflächen ist eine Mindestentfernung von 1 km zum Randbereich des Zielgebiets anzunehmen. Das Problem, das mit FMC Systemen bekämpft wird, tritt hier nur eingeschränkt auf bzw. ist für unseren Genauigkeitsanspruch vernachlässigbar.

Eine Stabilisierung der Kamera ist hier nicht notwendig, da der menschliche Körper eine sehr gute Schwingungsdämpfungs-Charakteristik aufweist und die Vibration des Flugzeuges und des Luftstroms, der durch das offene Fenster des Flugzeuges zieht, völlig unterdrückt werden. Eine feste Verbindung zum Flugzeug ist aufgrund der nachträglichen Bestimmung der Kamerastandorte (im photogrammetrischen Rückwärtsschritt, vgl. S. 25, 26 u. 144 Rolleimetric Handbuch) nicht nötig, da dann mit dem ganzen Flugzeug gezielt werden müsste. Aufgrund der Möglichkeit, die Messkamera frei Hand zu bedienen, ist ein sehr genaues Anvisieren der Zielgebiete erst ermöglicht und das notwendige Einhalten der Schnittbedingungen zwischen den Messbildern sehr leicht zu erzielen. Auch ist es einfach, auf diese Art das Flugzeug so zu bewegen, dass keine störenden Flugzeugteile wie Tragfläche, Flächenstrebe oder Fahrwerksbein ins Bild ragen. Bei den hier verwendeten Mehrbildphotogrammetrie-Systemen ist durch die aus der traditionellen Senkrechtluftbild-Photogrammetrie bekannten Systeme der Forward Motion Compensation (FMC) und der starren Kameramontage mit Schwingungsdämpfung nach unserer Meinung nichts zu gewinnen. Das freie Handhaben der Messkamera aus den Fenstern des Flugzeuges heraus ermöglicht damit das Erreichen der für die Bildverbände notwendigen Aufnahmestandorte auch in der relativen Enge der gegebenen Talsysteme.

2.2 Erzielbare Messgenauigkeiten

Die Messgenauigkeit für die Bildkoordinatenmessung liegt bei einem Mittelformatmessbild bei der vierfachen Vergrößerung im Rolleimetric CDW in einer Größenordnung von 0,005mm (5 μ m). Strenggenommen muss man zwischen den verschiedenen Genauigkeiten der verwendeten Methoden unterscheiden: Bildkoordinatenmessung an Verknüpfungspunkten (5 μ m), Stereomessung an beliebigen Objektpunkten (10 μ m), durch Stereo-Matching automatisch bestimmte Punkte (10-20 μ m). Unabhängig von dem verwendeten Objektiv und der daraus resultierenden Entfernung können bei der Abbildung von 1000m Objektbreite des Zielobjekts auf dem Messbild der 6x6cm Mittelformat-Reséaukamera mindestens 5cm Filmmaterial ausgewertet werden. Mit einem Scan von 2500 dpi (etwa 5000 Pixel auf 5cm Film) resultiert daraus, dass 1 Pixel etwa 20cm Naturfläche des Objektes entspricht. Da der Mittelformatfilm bei 100ASA etwa 16000x16000 Bildpunkte besitzt, ist durch einen besseren Scan die Messgenauigkeit leicht zu erhöhen. Es ist in der CDW Software auch möglich, die Genauigkeit eines Bildverbandes zu simulieren, um darüber in der Vorbereitung die Information zu gewinnen, wie viel Naturstrecke des Zielobjektes pro Bildverband abgebildet werden darf, ohne die angestrebte Messgenauigkeit zu gefährden. Durch die Messung der Passpunkte in jeweils (pro Messung) mehr als drei Messbildern wird eine deutliche Überbestimmung des Mehrbildverbandes erreicht. Durch die Bündelausgleichung werden die Ergebnisse der Mehrbildorientierung verbessert, indem Mess-Ausreißer ausgeschlossen werden. Passpunkte in der Naturfläche entstehen durch Tachymetermessungen, die ein Objektkoordinatensystem im geodätischen System

ermöglichen. Diese in den Messbildern sichtbaren Passpunkte ermöglichen 3D Koordinaten der Systemfestlegung / Mehrbildorientierung, mit denen die Stabilität des Bildverbandes noch weiter verbessert wird. Die tatsächliche Messgenauigkeit ist durch die gute geometrische Konfiguration der Bildverbände und die Anzahl und Verteilung der Passpunkte, in Verbindung mit der Sicherheit der manuellen Messungen dieser Passpunkte, sichergestellt. Allgemein ist die erreichbare Messgenauigkeit deutlich höher (~ Faktor 2) als die notwendigen Parameter für die Auswertung.

3 Der Umfang der Forschungsarbeiten

Primäre Zielsetzung der Arbeit ist die genaue Erfassung der Gletscherschwankungen des Untersuchungsgebietes mittels digitaler Nahbereichs-Photogrammetrie. Diese Methode dient als Werkzeug zur Erfassung von Volumen- und Formveränderungen aus der Luft und ggf. auch vom Boden aus. Diese Untersuchungen sollen als Indikation globaler Klimaänderungen und ihrer regionalen Auswirkungen dienen. Konkret wird in diesem Projekt das Naturgefahrenpotential des Lake George Glacier untersucht. Dieser wurde vom Knik Glacier aufgestaut und richtete zuletzt 1967 verheerende Schäden an. Würde der Knik Gletscher erneut um 150m vorstoßen, würde der 60m tiefe See wieder aufgestaut und jedes Frühjahr ausbrechen. Der Knik-Gletscher bedroht mit dem größten Eisstausee Alaskas die Straßen- und Eisenbahnverbindungen von Anchorage und Umgebung sowie 3 neue Siedlungen mit 2 Flugplätzen und ca. 630 Einwohnern, die nach dem letzten Ausbruch von 1966 (HULSING, 1981) entstanden sind.

Geplant sind folgende Arbeiten:

Erfassung / Untersuchung von (bereits beobachteten) lokalen Vorstößen an Teilbereichen der Gletscherzungen des Knik- und des Lake George Gletschers:

Im Vergleich der Jahre 1998/99 und 2001 ist bei beiden (insgesamt stagnierenden) Gletschern in drei Teilbereichen ein deutliches, eingegrenztes lokales Vorstoßen mit (in zweien der drei Fälle) deutlichem Überfahren der alten Ufermoräne feststellbar. Die dritte Lokalität ist ein Teilbereich der Knik Gletscherzunge, wo sich die „Gorge“ (ein „ice marginal channel“, der das gesamte obere Lake George Tal entwässert) durch einen eingegrenzten Vorstoß zu schließen scheint.



Abb. 1: Ansicht des Kargletschers, als Messbild von Nordwesten gesehen, mit einigen eingemessenen Polygonen.

Erweiterte DGM und Oberflächenmodell-Erstellung aus Schrägluftbildern und Laser-Scanner-Daten auf der Basis der Vorarbeiten von 1999 und 2001 in der Projektphase 2003/2004 (Zeitreihen von Oberflächenmodellen identischer Gebiete):

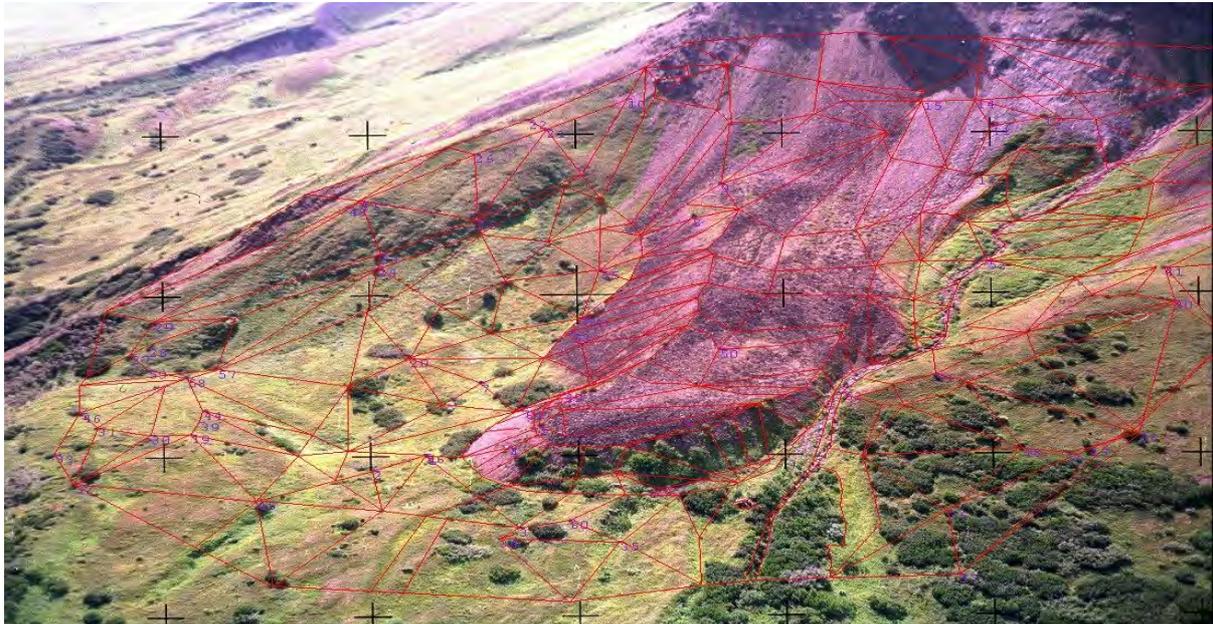


Abb. 2: Blockgletscher DGM aus Schrägluftbildern, mit Textur aus Luftbild aus 4000 m ü.d.M., das durch einen Schneeschauer hindurch aufgenommen wurde.

Es soll pro Aufnahmezeitpunkt jeweils ein DGM der Kalbungsfront des Colony Glaciers, der in den Lake George mündet, erstellt werden. Daraus resultiert eine genaue Quantifizierung der Veränderung der 4 km breiten Kalbungsfront. Desgleichen werden u.A. DGM's des Wolverine Glacier erstellt, der seit 36 Jahren vom USGS überwacht wird und für den genaue lokale Klimadaten zur Verfügung stehen. Direkt am Gletscher wird seit 32 Jahren eine Klimastation und ein Pegel betrieben. Es wird dabei eine Verknüpfung mit unpublizierten Daten der USGS Fairbanks erfolgen (u.a. aus Senkrechtluftbildern). Die Ergebnisse werden in bestehende GIS (Geographische-Informationssysteme) der USGS Fairbanks eingebunden. Für die DGM Erstellung in den Gletschereinzugsgebieten oberhalb der Schneegrenze werden Laser-Profilbefliegungsdaten (von Prof. KEITH ECHELMAYER, UAF Fairbanks) kostenneutral zur Verfügung gestellt. UAF verfügt über ein weitreichendes und ständig aktualisiertes Profil-Archiv. Die Ableitung eines hochgenauen Oberflächenmodells aus einer Verknüpfung von Schrägluftbild- und Laser-Scanner-Daten ist ein Schwerpunkt des Forschungsprojekts. Dieses Vorgehen der Verknüpfung der Daten aus Schrägluftbild DGM und Laserprofilbefliegung ist bisher methodisch noch nicht bearbeitet, Forschungsarbeiten dazu liegen auch international bis jetzt noch nicht vor. Laser Profilbefliegungen erzeugen gute Datengrundlagen oberhalb der Schneegrenze, unterhalb der Schneegrenze jedoch erzeugen blankes Gletschereis und Gletscherspalten Reflexionen, die keine Profilmessungen mit Lasern zulassen. Dieses Problem existiert für die Schrägluftbild-Photogrammetrie nicht, im Gegenteil sind Gletscherspalten und Seracs sehr genau zu vermessen. Aufgrund dieser Tatsache hoffen die Wissenschaftler von USGS und UAF auf eine Lösung der Messprobleme mittels der hier geplanten, neuen kombinierten Methode (Merge der Schrägluftbildmessung mit Laser-Scanner-Profilen). Im Bereich des Nährgebiets sind die Laserdaten der USGS von besonderer Bedeutung, da sie dort gute Ergebnisse liefern. Wegen der Reflexionsproblematik (Wasser; klares Eis) des Lasers im Zehrgebiet, unterhalb der Schneegrenze, ist dort die

Photogrammetrie und die Tachymetermessung wesentlich. Im Gegensatz zum Laser gibt es dort für die photogrammetrische Messung keine Probleme.

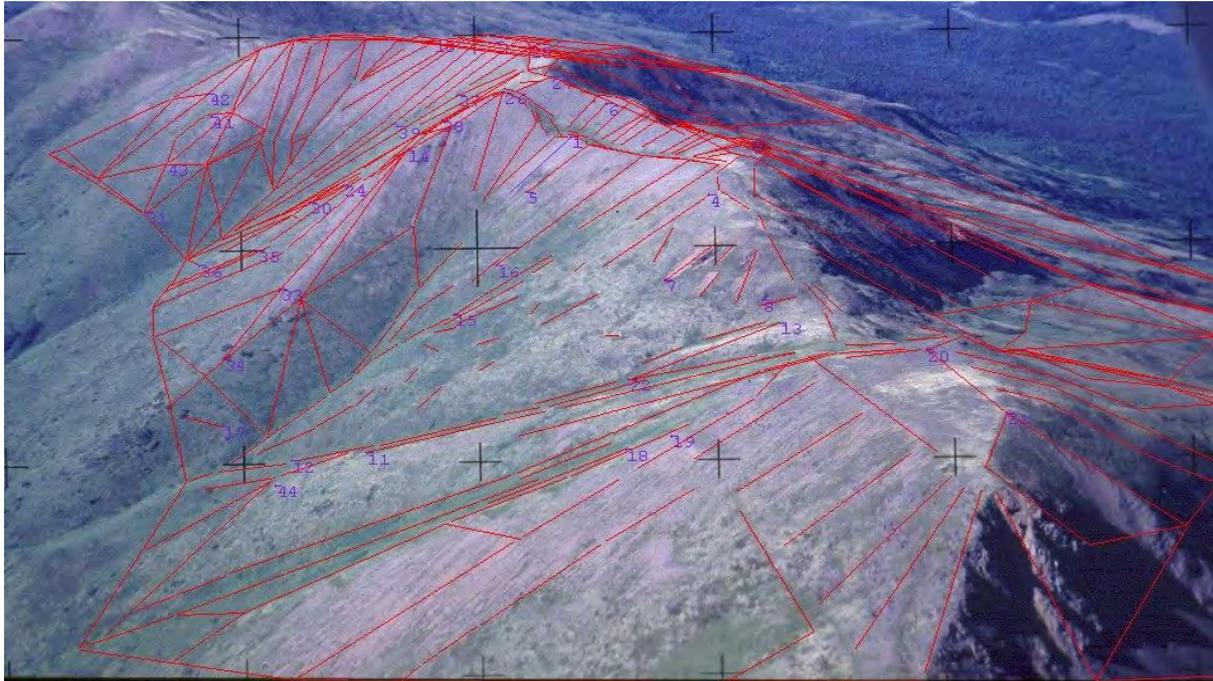


Abb. 3: Das DGM aus Schrägluftbildern des Thunderbird Ridge Höhenzuges, mit einem entzerrten Schrägluftbild als Textur. Blick von Südosten.

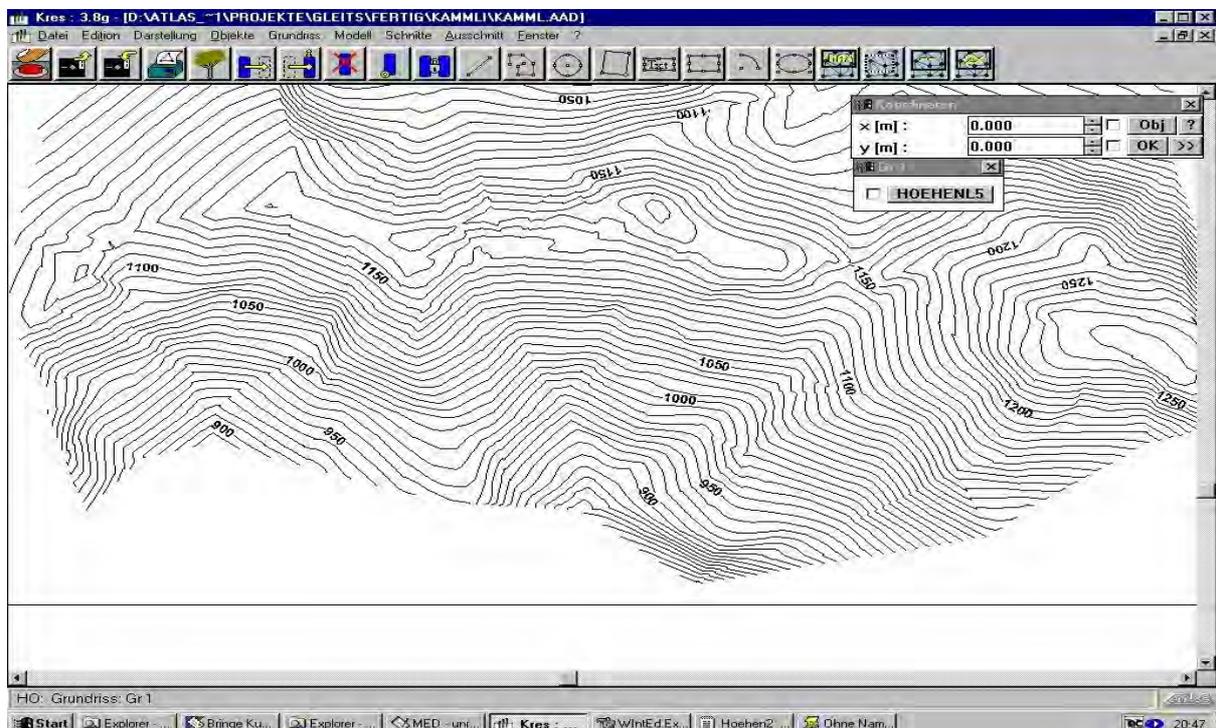


Abb. 4: Teil des Thunderbird Ridge DGM als Höhenlinienkarte, tatsächliche Höhenwerte photogrammetrisch aufgrund dreier bekannter Höhenpunkte in der Naturlandschaft ermittelt (hier im „Kres“-Modul des ATLAS DGM mittels der Punkt-Koordinaten des Rolleimetric Systems automatisch angelegt). Die Darstellung bezieht sich direkt auf die Messungen, **ohne Glättung oder Interpolation**. Höhen in Metern ü.d.M., Isohypsenabstände 10 m.

4 Das verwendete System in Gegenwart und naher Zukunft:

Gegenwärtig handelt es sich um ein System mit manueller Auswertung in Monomessungen eines Mehrbildverbandes, abhängig von Passpunkten am Boden („ground-controlled-Survey“), um georeferenzierte, maßstabsgetreue Oberflächenmodelle zu produzieren. Dabei sind mindestens drei Passpunkte, in der Naturfläche des Zielobjektes, notwendig. Die Passpunkte müssen ausreichend weit voneinander entfernt sein, um die Oberflächensituation der betrachteten Naturfläche zu representieren (die Regel der Basislinie). Natürlich sind zur Evaluation der Genauigkeit der Georeferenzierung mehr als drei Passpunkte erforderlich, sechs oder besser neun sind wünschenswert, um mit voneinander unabhängigen Dreiergruppen von Passpunkten dann mindestens zwei, besser drei verschiedene Systemfestlegungen, für den selben Bildverband, miteinander vergleichen zu können. Der Vergleich der jeweiligen photogrammetrischen Messergebnisse mit den Messwerten der Geländearbeit ergibt dann eine sichere Überprüfung des erstellten DGM. Die Werte der Geländearbeit entstehen durch das Einmessen der Punkte mit D-GPS und/oder Tachymeter und Laserentfernungsmesser, wobei auch diese Werte jeweils miteinander verglichen werden. Die jeweilige Passpunkt-Erkennung in den Messbildern ist hierbei ein kritischer Faktor, von der Identifizierung des Passpunktes in jeweils mindestens drei Messbildern hängt der gesamte Georeferenzierungsprozess ab. Da die Passpunkte im Gelände frei gewählt werden können und auch mit Farbe markiert werden (es handelt sich hier aber nicht um „signalisierte Passpunkte“), ist diese Erkennbarkeit sichergestellt. Die atmosphärischen Bedingungen in Alaska sind, mit der sehr klaren Gebirgsluft, ideal geeignet. Da die Passpunkte am Boden, in der Naturfläche teilweise auf lokalem Permafrost oder auf Toteiskomplexen im Untergrund liegen, wird im Verlauf der Forschung auch die Position der Passpunkte im Gelände mehrfach kontrolliert. Eine reale Verschiebung der Passpunkte ist hier durch diese morphologischen Effekte nicht auszuschließen.

Mit der bereits vorhandenen und verfügbaren Technologie von automatisierten Oberflächenmessungen auch in Mehrbildverbänden (GEODELTA, Niederlande) und der Anwendung von DGPS-INS-Messungen zur Kamera-Raumlage und Positionsfeststellung im Aufnahmezeitpunkt (Prof. Heimes, FH Bochum) wird das System wesentlich fortentwickelt werden. Eine „ground-controlled-survey“ wird dann nicht unbedingt notwendig sein. Damit wird die oben beschriebene Prozedur nicht mehr notwendig sein, falls das Experiment Erfolg hat. Bei einer direkten Georeferenzierung und anschließender Verknüpfung (Bündelausgleichung) des Bildverbandes könnte man ganz auf Passpunkte verzichten.

Natürlich werden hier die Ergebnisse der Messungen im „No ground control survey“ Modus mit denen der oben beschriebenen „Ground control survey“ überprüft. Da in diesem Forschungsprojekt das gesamte Entwicklungsspektrum der Luftbildphotogrammetrie am gleichen Zielobjekt benutzt wurde (bzw. wird), ist diese Kontrolle hier gut möglich.

Das INS System (Litef LLN-G1 , IMU Inertial Measurement Unit, with FOG's -Fibre Optical Gyros, and with Micro-mechanical Accelerometers) wird dabei direkt an der metrischen Kamera befestigt und mit ihr „handheld“ betrieben. Das D-GPS wird an geeigneter Stelle im Flugzeug montiert und ist mit flexiblen Kabel mit der Kamera-INS-Kombination verbunden. Diese Art der Mittelformat-metrischen Luftbildbefliegung wird als stereophotogrammetrische Auswertung aus einem fest eingebauten, stabilisierten Senkrechtluftbildsystem („LEO“) bereits durch Prof. F.-J. Heimes der FH Bochum betrieben. Eine Kooperation mit dieser Abteilung der FH Bochum besteht bereits.

Die Software der Firma GEODELTA arbeitet mit manueller Startvorgabe eines Punktes in einem Bild des Mehrbildverbandes, dann wird der Punkt von dem System in den anderen Bildern des Bildverbandes gesucht. Dadurch wird die Arbeitsgeschwindigkeit wesentlich erhöht werden können, und die manuelle Kontrolle der Messungen bleibt erhalten. Im

Vergleich zu rein manuellen Mess-Systemen dürfte hier der etwaige Verlust an Messgenauigkeit unerheblich sein. Dieses moderne Nahbereichs-Photogrammetrie-System wird in den Niederlanden in Werften zu Schiffsreparatur und Umbau (Körperoberflächen, Wasserbau etc.) eingesetzt.

5 Ausblick

Angesichts der heute beobachteten Veränderungen terrestrischer Klimaaufzeichnungen kann auf globale Klimaveränderungen geschlossen werden (IPCC, 2001). Diese sind gegenwärtig aufgrund der zunehmenden Besiedlung ehemals marginaler Gebirgsräume umso bedrohlicher. Auch im dünnbesiedelten Alaska sind gefährliche Landschaftsbereiche jetzt genutzt, die in der Vergangenheit aus diesen Gründen unbesiedelt blieben. Dieser Trend existiert weltweit, besonders auffällig in Entwicklungsländern, denen die Mittel zur Evaluation dieser Probleme fehlen. Die Gefährdung von Tourismusstrukturen in den Alpen durch Massenverlagerungsprozesse, insbesondere in den letzten Jahren, hat auch in Deutschland Naturgefahren ins Licht der Öffentlichkeit gerückt. Zur Untersuchung dieser Phänomene ist das (luftgestützte) RolleiMetric System gut einsetzbar, besonders in Hochgebirgsregionen.

Aufgrund dieser Einsicht muss der Nutzen solcher physiogeographischer Forschungen hoch bewertet werden. Es ist keine Grundlagenforschung, deren Nutzen nicht direkt messbar ist. Es ist vielmehr eine Anwendung vorhandener digitaler Photogrammetrie-Technologie zur kostengünstigen Bewertung von Naturgefahrenpotentialen.. Diese Untersuchungen sollen insgesamt als Indikation globaler Klimaveränderungen mittels der regionalen Auswirkungen dienen.

6 Literaturverzeichnis

- CLARK, S.H.B. & BARTSCH, S.R., 1971: Reconnaissance Geologic Map and Geochemical Analyses of Stream Sediment and Rock Samples of the Anchorage B-6 Quadrangle, Alaska. USGS Open-file report 475, U.S.A.
- GLEITSMANN, L., 2001: (unveröffentlicht): Zur Geomorphologie ozeanisch geprägter Hochgebirge: DGM-Erstellung und Reliefanalyse aus Schrägluftbildern in Alaska. Geographisches Institut, Universität Göttingen.
- HULSING, H., 1981: The Breakout of Alaska's Lake George. USGS Popular Publications. Denver, Colorado, U.S.A., 15 S.
- IPCC, 2001: Climate Change 2001. The Scientific Basis
- KÄÄB, A. & VOLMER, M., 2000: Surface Geometry, Thickness changes and Flow fields on Creeping Mountain Permafrost: Automatic Extraction by Digital Image Analysis. Permafrost and Periglacial Processes, 11, S. 315-326.
- KARLSTROM, T.N.V., 1965: Upper Cook Inlet area and Matanuska River Valley. In: PÉWÈ, T.L., FERRINAS, O.J., NICHOLS, D.R. & KARLSTROM T.N.V.: Guidebook for field conference F, central and south-central Alaska, International Association for Quaternary Research, 7th Congress, Fairbanks, Alaska, U.S.A.
- MAYO, L.R. & TRABANT D.C., 1982: Geodetic Trisection, Altitude, and Ice-Radar Surveying Techniques used at Knik Glacier, Alaska, and Summary of 1979, 1980, and 1981 Data. USGS Open-File Report 82-685, Fairbanks, Alaska, U.S.A., 26 S.
- PÉWÈ, T.L., 1975: Quaternary Geology of Alaska. USGS Professional Paper 835, Washington, U.S.A., 145 S.

- POMASKA, G., 1988: ROLLEIMETRIC - ein Systemkonzept für photogrammetrische Ingenieur Anwendungen. Zeitschrift für Photogrammetrie und Fernerkundung (Bildvermessung und Luftbildwesen), 57 (3), S. 189-198.
- REGER, R.D. & UPDIKE, R.G., 1983: Upper Cook Inlet And The Matanuska Valley. In: PÉWÉ, T.L. & REGER, R.D. (Hrsg.): Richardson and Glenn Highways, Alaska – Guidebook to Permafrost and Quaternary Geology. Guidebook 1, Fourth International Conference on Permafrost, July 18-22, 1983, Fairbanks, Alaska, U.S.A., S. 185-259.
- ROLLEI FOTOTECHNIK GMBH (Hrsg.), 1999: RolleiMetric CDW. Close-Range Digital Workstation. Benutzerhandbuch. Rollei Fototechnik GmbH, Abteilung RolleiMetric, Braunschweig, 235 S.
- TRABANT, D.C. & MAYO, L.R., 1979: Knik Glacier, Alaska – May 1979 Monument and Glacier Survey, USGS Open-File Report 80-48, Fairbanks, Alaska, 20 S.
- WAHRHAFTIG, C. UND COX, A., 1959: Rock glaciers in the Alaska Range. Bulletin Geol. Soc. Amer., 70 (4), S. 383-436.
- WARNER, W.S., GRAHAM, R.W. & READ, R.E. (Hrsg.), 1996: Small format Aerial Photography. Whittles Publishing, Caithness, Schottland, 348 S.
- WASHBURN, A.L., 1979: Geocryology – A survey of periglacial processes and environments. 2. Aufl., Norwich, 406 S.
- WESTER-EBBINGHAUS, W., 1987: Ingenieursphotogrammetrie - neue Möglichkeiten. Forum, 4, S. 193-213.
- WESTER-EBBINGHAUS, W., 1989: Das Réseau im photogrammetrischen Bildraum. Photogrammetrie und Fernerkundung, 57 (3), S. 64-71.
- WESTER-EBBINGHAUS, W., 1990: High precision industrial Photogrammetry. Photogrammetric Record, 8.
- WÜRLANDER, R. & EDER, K., 1998: Leistungsfähigkeit aktueller photogrammetrischer Auswertemethoden zum Aufbau eines digitalen Gletscherkatasters. Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie, 34 (2), S. 167-185.

Lassen sich über die Fernerkundung erweiterte Kenntnisse zur seismogenen Zone Bodensee-Stuttgart (9°-Ost) gewinnen?

HANS-ULRICH WETZEL¹ & HANS JOACHIM FRANZKE²

Zusammenfassung: In diesem Beitrag werden Bruchinterpretationen an der N-S verlaufenden seismisch aktiven Albstadt-Scherzone (Meridian 9 Ost) zwischen dem westlichen Bodensee und Stuttgart vorgestellt. Durch den Einsatz hoch auflösender Satellitendaten (Landsat-TM, ERS-1/2, ASTER-DEM, X-SAR-SRTM) war es möglich, das morphostrukturelle Muster dieser Zone zu kartieren und mit den strukturgeologischen Bearbeitungen und seismologischen Untersuchungen anderer Autoren zu verknüpfen. Es gelang, die durch geologische Untersuchungen bisher nur schwach belegte Albstadt-Zone als drei bis fünf Kilometer breiten Geländestreifen mit relativ deutlichen Rahmenstörungen und zahlreichen Internbrüchen auf ca. 150 km Länge zu kartieren. Verschneidungen mit NW-SE-Störungen (Lineationen) des Deckgebirges zeigen dextrale Verschiebungen an den NW-SE-Strukturen und sinistrale Bewegungen an der Albstadt-Scherzone.

1 Einführung und Ziel

1.1 Fragestellung und strukturelle Situation

Ziel der vorgestellten Arbeiten ist es, mit Fernerkundungsinterpretationen erweiterte Angaben zu neotektonischen Störungsaktivitäten (ca. letzte 10 Ma) von seismisch aktiven Gebieten in Deutschland zu gewinnen (Projekt DFNK, Deutsches Forschungsprojekt zur Vermeidung von Naturkatastrophen, koordiniert im GFZ Potsdam).

In Deutschland existieren mehrere Nord-Süd streichende Zonen, in denen gehäuft seismische Ereignisse auftreten können, deren Intensitäten nach der makroseismischen Intensitätsskala EMS-92 die Stufe 8 („schwere Gebäudeschäden“) erreichen können. Es sind dies das Ober-, Mittel- und Niederrheingebiet (Oberrheingraben NNE-SSW, Niederrheingraben NNW-SSE), ein N-S-Streifen an der Schwäbischen Alb (Albstadt-Scherzone), das Bodenseegebiet im südlichen Fortstreichen der Albstadt-Zone, eine weitere N-S-Zone zwischen Ostthüringen und dem sächsischen Vogtland (Regensburg-Leipzig-Rostock-Zone) sowie ein Gebiet von der Riesalb zum Altmühltal in Bayern (GRÜNTAL et al. 1998).

Die Herdflächen konzentrieren sich im wesentlichen in einem Teufenintervall zwischen 8 und 15 km, befinden sich also in einer Tiefe, wo ausnahmslos Gesteine des kristallinen Basements anzutreffen sind und die Gesteine sich aufgrund der Umschließungsdrücke (über 2 Kb) und Umgebungstemperaturen von über 250°C im Übergangsbereich von kataklastischen zu duktilen Verformungen befinden. Das wird im Einzelnen jedoch durch die Verformungsge-

¹Dr. Hans-Ulrich Wetzel, GeoForschungsZentrum Potsdam, Department 1, Sektion 1.4, Telegrafenberg A17, D-14473 Potsdam, e-mail: wetz@gfz-potsdam.de

²Dr. Hans Joachim Franzke, Institut für Geologie und Paläontologie, Technische Universität Clausthal, Leibnizstraße 10, D-38678 Clausthal-Zellerfeld, e-mail: hans.joachim.franzke@tu-clausthal.de

schwindigkeit (Strainrate) kontrolliert und bei den hohen Beschleunigungen seismischer Ereignisse wird im allgemeinen Bruchversagen eintreten. Es ist in einigen Gebieten (z.B. Egerbecken, BANKWITZ et al. 2003) nachgewiesen, dass Fluide bis in diese Tiefen versenkt werden, wodurch die Flüssigkeitsdrücke den Stress herabsetzen und der verminderte effektive Stress (anliegender Stress minus Flüssigkeitsdruck) erheblich die Scherwiderstände von existierenden Frakturzonen vermindern und diese reaktivieren können. Fluide besitzen so auch für das Bruchversagen von Gesteinen an neugebildeten Bruch- bzw. Gleitflächen erhebliche Bedeutung. Bei den jüngsten seismischen Ereignissen (1911, 1943, 1978, 1999, 2000) in der Albstadt-Scherzone werden 0,1 bis 0,2 m Bewegungsamplituden während der seismischen Ereignisse angegeben (STANGE & BRÜSTLE 2001). Da die bei den Beben in Deutschland an den Herdflächen ausgelösten Dislokationen so gering sind, ist bei den relativ großen Herdtiefen (Herdiefen von 4 -10 km für die stärkeren Ereignisse der Albstadt-Scherzone) nicht damit zu rechnen, dass sich Versätze an Herdflächen direkt an der Erdoberfläche bemerkbar machen. Häufig tritt sogar die Situation ein, dass flachliegende Ablöseflächen (Detachment-Flächen) in der Oberkruste existieren, an denen eine geomechanische Abkopplung vom Unterbau und damit von den Herdflächen erfolgt. Solche Detachmentflächen können im Kristallin selbst existieren (flachliegende Scherzonen, Deckenbahnen) oder sind auf den Grenzbe- reich zum unverfalteten Deckgebirge (Stockwerksgrenzen) konzentriert. Sie sind besonders wirksam, wenn Salinargesteine fließfähige Detachments bilden, wie das großflächig in der Norddeutschen Senke und seinen südlichen Ausläufern (Subhercynes Becken, Leinebergland, Hessische Senke, Thüringer Becken) der Fall ist.

In unserem Beitrag zeigen wir die erzielten Zwischenergebnisse aus dem Gebiet zwischen Bodensee und Stuttgart (seismogene Zone Bodensee-Stuttgart oder „**9°-Ost-Zone**“). Diese auch als **Albstadt-Scherzone** bezeichnete seismogene Zone hat im Untergrund solch einen erwähnten effektiv wirksamen Entkopplungshorizont, in dem das Salinar des Mittleren Muschelkalks die Funktion der Ablösefläche bereits in geringer Tiefe von im Mittel um 500 m übernimmt. Durch die geringe Viskosität des ca. 60 Meter mächtigen Muschelkalksalinars können Scherspannungen aus dem Unterbau nach den Berechnungen von REINECKER & SCHNEIDER (2002) nicht oder kaum in das postsalinare Deckgebirge (Oberer Muschelkalk, Jura) übertragen werden. Das bedeutet, dass die Einsenkung des NW-SE streichenden Hohenzollern-Grabens (maximal 225 m) und die dabei eingetretene Querdehnung (maximal 100 m) im Hangenden des Muschelkalksalinars durch Streckung des Gesteinssegmentes oberhalb der Abscherfläche („bookshelf-Tektonik“) als **sekundärer** Effekt der seismischen Aktivität in der Albstadt-Scherzone zu erklären ist.

1.2 Interpretationsmethodik und Datengrundlagen

Diese sekundären Hinweise auf das Bruchgeschehen in der Zone, die sich als Bruchstrukturen in Form von Auflockerungszonen, Engklüftungsbereichen, Zonen mit Vegetations- und Feuchtigkeitsanomalien äußern und sich morphologisch als Steilkanten, Stufen oder Taleinkerbungen abbilden können, bieten die Chance einer Detektion mit Fernerkundungsdaten (Radar: Bodenfeuchtigkeit und Rauigkeit; DEM: morphologische Strukturen; optische Daten: Vegetations- und Feuchtigkeitsanomalien, lineare Elemente). Ansatz unserer Interpretation von Relief- und Texturmerkmalen war darum die Kombination von optischen Satellitendaten mit Radardaten und geologischen Strukturinformationen. Die Interpretationsmethodik stellten die Autoren (FRANZKE, WETZEL & WERNER, 2000) mit Beispielen bei der Analyse der komplizierten Wechselbeziehungen zwischen Mineralisationen, variszischen und post-variszischen Bruchgefügen im Kristallin des Schwarzwaldes vor.

Für die großregionale Interpretation, in der zunächst die morphologisch wirksame Bruchstrukturierung Deutschlands in der Übersicht kartiert werden konnte (FRANZKE & WETZEL, 2001), wurden LANDSAT-TM und das vom Deutschen Fernerkundungsdatenzentrum (DFD) der DLR aus ERS-1-Daten (1992-1994) und mit digitalen Geländedaten verknüpfte Radarmosaik von Deutschland (KOSMANN, 1997) genutzt (auf 100 m Bodenauflösung resampelte Radardaten). Für die Detailanalyse einzelner neotektonisch relevanter Bruchstrukturen sind jedoch Daten höherer Auflösung erforderlich (Abb. 1).

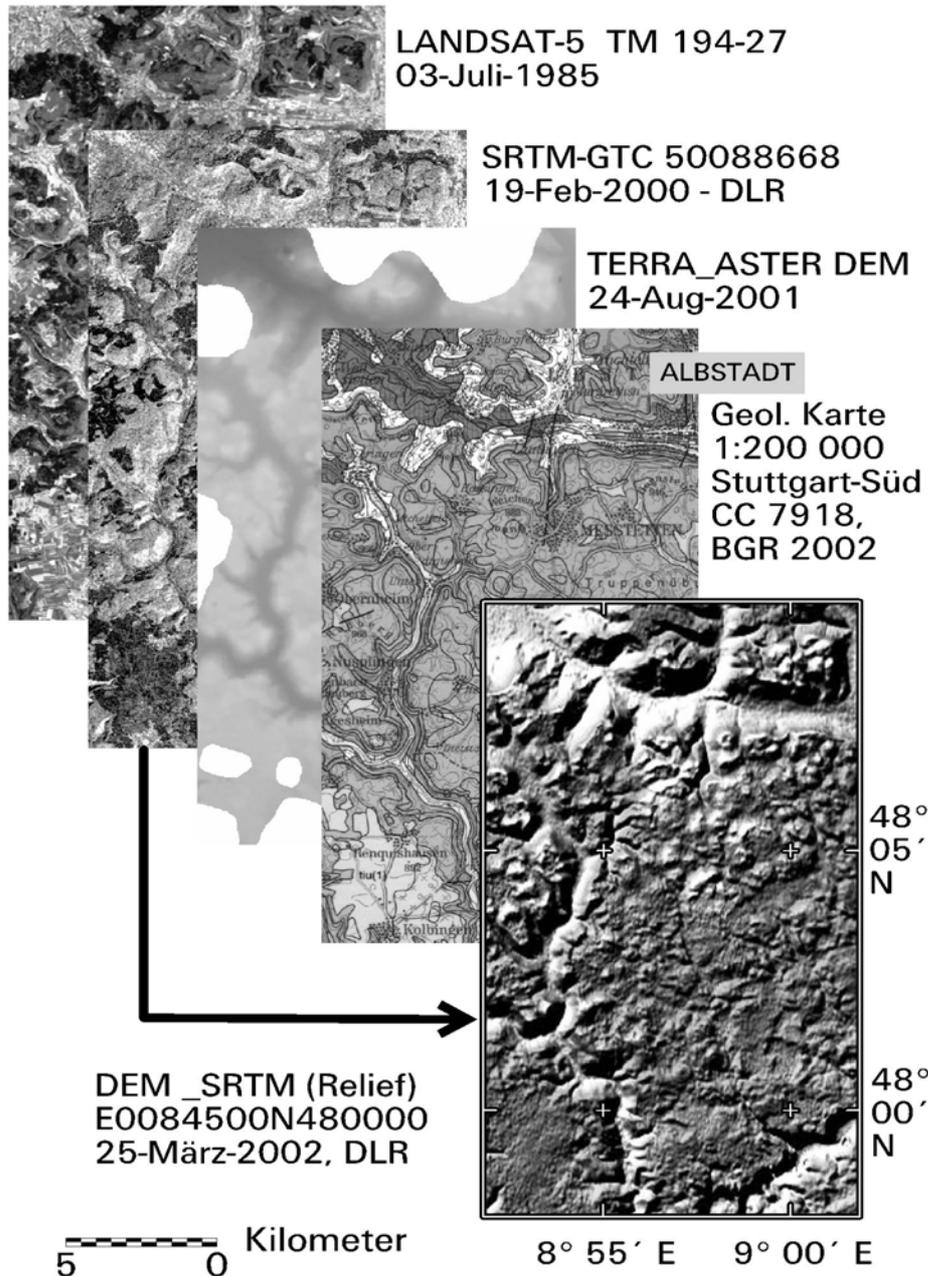


Abb.1: Interpretationsdaten

Dazu bieten sich **X-SAR-Daten der SRTM-Mission** (Februar 2000) an. Bei der Prozessierung der DLR wurden für jeden Bildpunkt die Helligkeitswerte über Range gerastert. Da von

jedem Punkt auch die dreidimensionale Position ermittelt wurde, ist das Bildprodukt dann auch ortho-entzerrt und in Kartenprojektion transformiert worden. Damit liegen für jeweils 150 km Flugstreifen für den Range von 50 km digitale Radarintensitätsbilddaten vor (Geocoded-Terrain-Corrected GTC-Datensätze mit pixel spacing: 25 m).

Mit Virtual-GIS-Tools wurden aus **TERRA-ASTER-Daten generierte DEM** mit LANDSAT-Daten bzw. Radar-GTC-Daten überlagert und für die Detektion von morphologischen Strukturen und Bruchindikationen genutzt. Zusätzlich wurden **Reliefdarstellungen** der von der DLR prozessierten SRTM-DEM verwendet. ASTER- und SRTM-Daten lagen jedoch nicht flächenhaft für alle Bereiche der Untersuchungsgebiete vor. Die Überlappungsbereiche ergänzten sich aber.

Die Fernerkundungsinterpretationen werden genutzt, das aus **geologischen Karten** und durch **strukturgeologische Spezialarbeiten** anderer Autoren kartierte Strukturmuster der Albstadt-Scherzone zu erweitern. Dies ermöglicht neue Aussagen nicht nur in Hinblick auf das Flächeninventar, sondern auch bezüglich des Bewegungsverhaltens der Bruchflächen (Störungs kinematik) und zu den möglichen gegenseitiger Altersbeziehungen.

2 Ergebnisse

2.1 NNE-SSW Albstadt-Scherzone und interne N-S-Strukturen

Die Auswertung der Satellitendaten, vor allem aber deren Kombination mit den digitalen Höhenmodellen und der Reliefdarstellung der X-SAR-SRTM-Mission zeigt eine kontinuierlich vom Bodensee bis nördlich von Stuttgart auf über 150 Kilometer Länge zu verfolgende Zone, innerhalb der im Deckgebirge der Süddeutschen Scholle in einem bis 5 km breiten Geländestreifen gehäuft N-S streichende Reliefkanten, Talverläufe) auftreten. Das wird von uns als Einwirkung einer in dieser Richtung intensivierten Bruchzerteilung angesehen (Abb. 2). Nach den geologischen Kartierungen und der sehr geringen gegenseitigen Beeinflussung der kartierten Lineationen (Brüche und Auflockerungszonen) handelt es sich wahrscheinlich um eine breit angelegte Kluftzone, gemixt mit ebenfalls scharig auftretenden Einzelstörungen mit sehr kleinen Versatzbeträgen an den einzelnen Störungsflächen. Diese NNE-SSW-Zone hat nachweisbar eine durch interne Texturen und Rahmenstörungen belegbare Erstreckung, war aber auf den publizierten geologischen Karten bisher nur in einem kurzen Abschnitt unmittelbar südlich des Hohenzollerngrabens kartiert (z. B. Geologische Übersichtskarte 1:200.000, Blatt Stuttgart-Süd, BGR-Hannover 2002). Damit kann die von REINECKER & SCHNEIDER (2002) in diesem regionalen Verlauf erwartete Scherzone auch an der Oberfläche kartiert und ihre strukturelle Verknüpfung erfasst werden.

Der 12 Kilometer östlich zur Albstadt-Zone verlaufende, ebenfalls NNE-SSW streichende Lauchertgraben, stellt eine weitere parallele Zone mit dem gleichen Internaufbau dar.

2.2 Verknüpfung mit regionalen Strukturen

Die Albstadt-Scherzone und der Lauchert-Graben werden von den bekannten NW-SE-Brüchen der Bonndorfer Grabenzone am Bodensee, dem Hohenzollerngraben, der Rottenburger Flexur, dem Fildergraben bei Stuttgart und weiteren kleineren NW-SE-Strukturen geschnitten. Als dritte Bruchrichtung treten noch ENE-WSW verlaufende Strukturen hinzu, vor allem die breite Zone des „Schwäbischen Lineaments“ nördlich der Albtrauf bei Tübingen. Durch die bisherigen geologischen Feldkartierungen konnten die Schnittbereiche beider Struktur-

richtungen aber aufgrund der schlechten Aufschlusslage und der geringen Intensität der Einzelstrukturen (kaum im Gelände erfassbare Gesteinsversätze) wenig beurteilt werden.

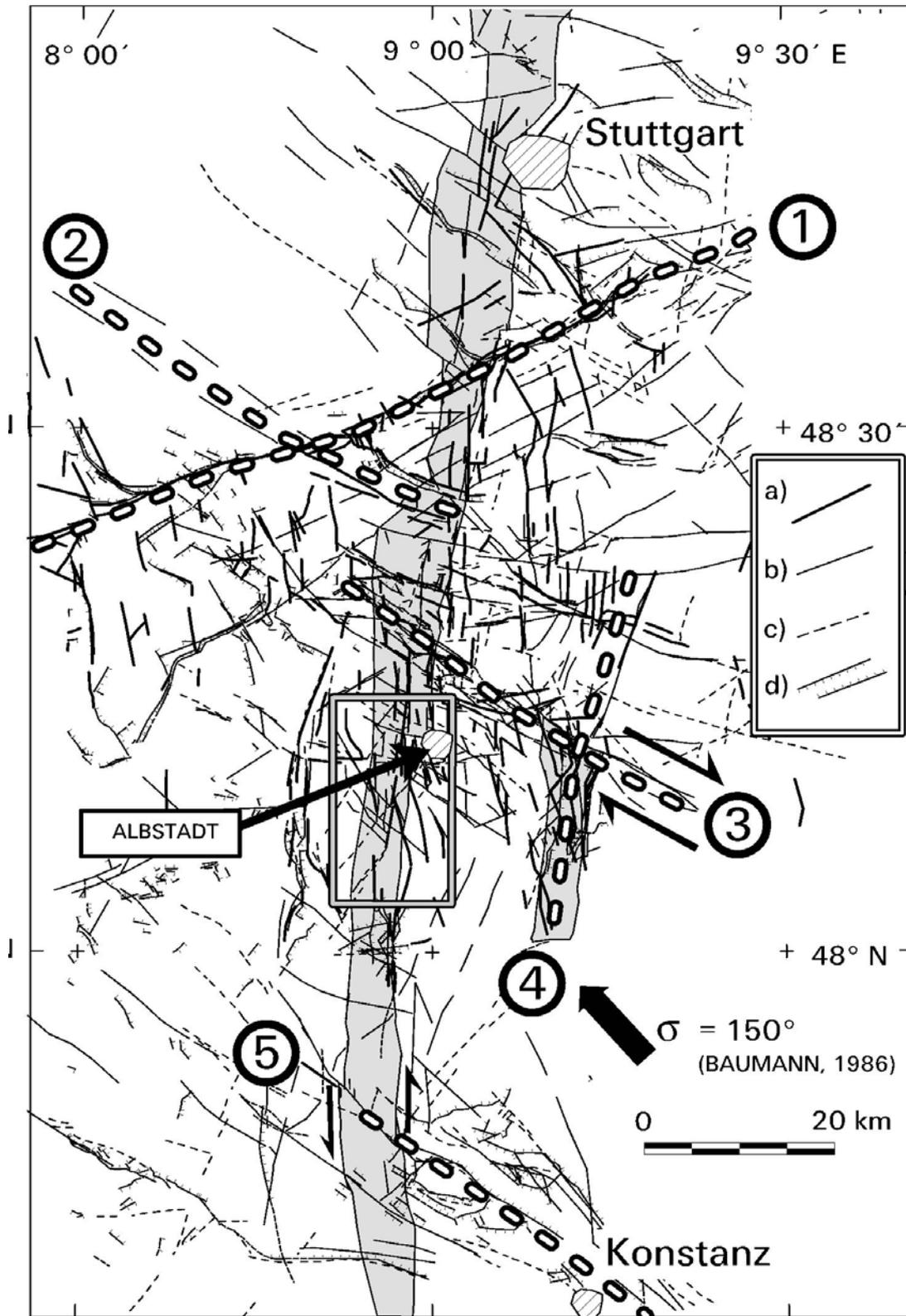


Abb. 2: Albstadt-Scherzone zwischen Stuttgart und Bodensee (grau unterlegt); Strukturelemente nach Interpretation aus a) SRTM-Relief, ERS1-Radarmosaik mit untergelegtem DEM, ASTER-DEM;

b) Radarintensitäten (ERS1-Mosaik und SRTM-GTC); c) optischen Satellitendaten (Landsat-5); d) geologischen Aufnahmen (Geol. Kartenwerke 1: 200 000); 1- Schwäbisches Lineament; 2- Rottensburger Flexur; 3- Hohenzollern-Graben; 4- Lauchert-Graben; 5- Bodensee-Grabensysteme; σ) Richtung der nealpinen Kompression / σ_{H-max} nach Baumann (1986)

Ein Teil der NW-SE- und der WSW-ENE-Brüche setzt auch in den Unterbau, also in das Variscische Basement des Schwarzwaldes, hinein und kann dort aufgrund des Auftretens von oberkarbonisch/permischen Magmatitgängen (ca. 300-280 Ma) und an ihnen ausgeschiedenen mesozoisch-känozoischen hydrothermalen Gangmineralisationen als über einen langen Zeitraum mehrfach reaktiviert angesehen werden (WERNER & FRANZKE 2001).

2.3 Detailinterpretation eines Segments der Albstadt-Scherzone

Die Analyse der Kreuzungsbereiche der N-S-Zonen mit den NW-SE-Störungen zeigt, dass an den NW-SE-Störungen im Kartenbild, abgebildet wird nur die Horizontalkomponente der Bewegungen, sich stets eine, wenn auch schwache, **rechtslaterale Verschiebung** ergibt. Das

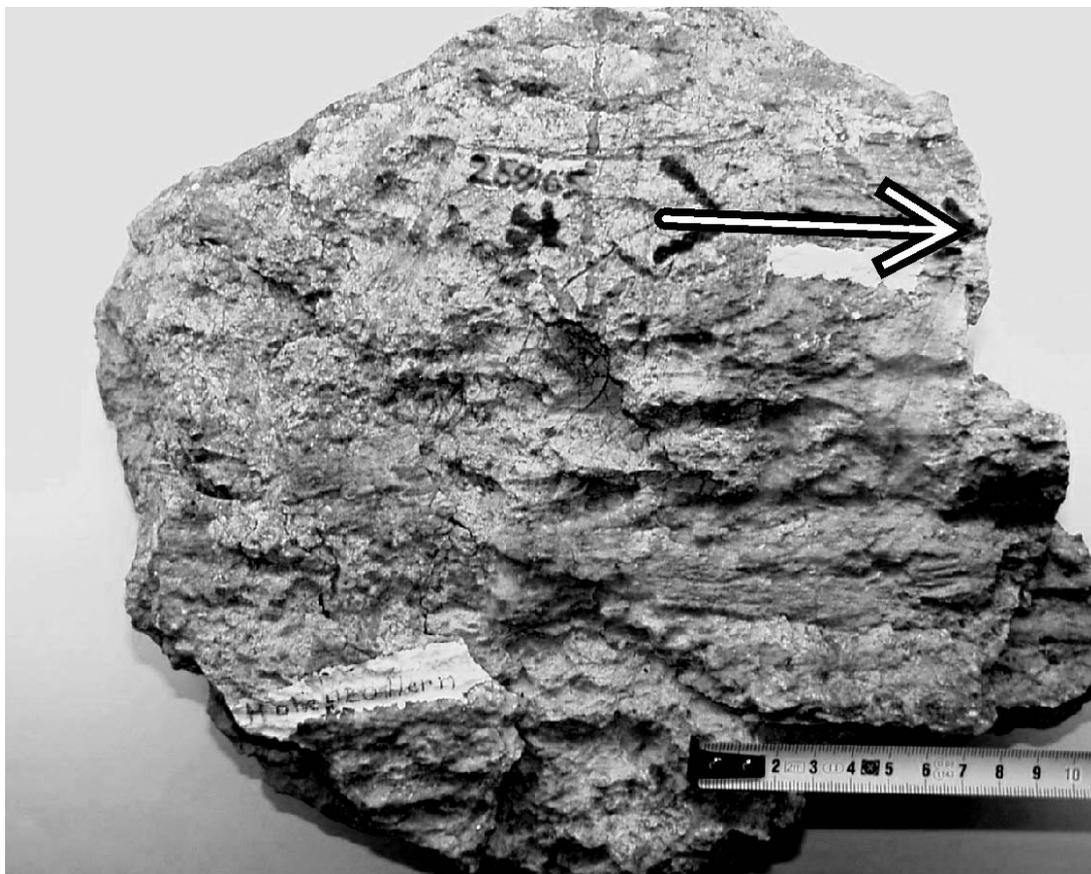


Abb.3: Handstück vom SW-Rand des Hohenzollern-Grabens
Horizontale Gleitstreifen (Pfeil) als strike-slip-Bewegungsmarken

kann durch die Geländerecherchen von REINECKER und SCHNEIDER (2002) und die Übersichtsbegehungen der Autoren bestätigt werden (Abb. 3). Am Schnittpunkt mit der Rottensburger Flexur ist außerdem eine sprunghafte Verschmälerung der Albstadt-Scherzone festzustellen. Die Lineationskartierung legt nahe, dass beide Strukturrichtungen gleichzeitig aktiviert wurden und die NW-SE-Brüche sich teilweise noch nachbewegten.

In Abbildung 4 ist eine detailliertere Interpretation des Gebietes südlich von Albstadt dargestellt. Die Ergebnisse beruhen auf der Bearbeitung der in Abbildung 1 aufgeführten Datenbasis. Die Albstadt-Scherzone (grau hervorgehoben) wird durch eine Vielzahl parallel zur Ge-

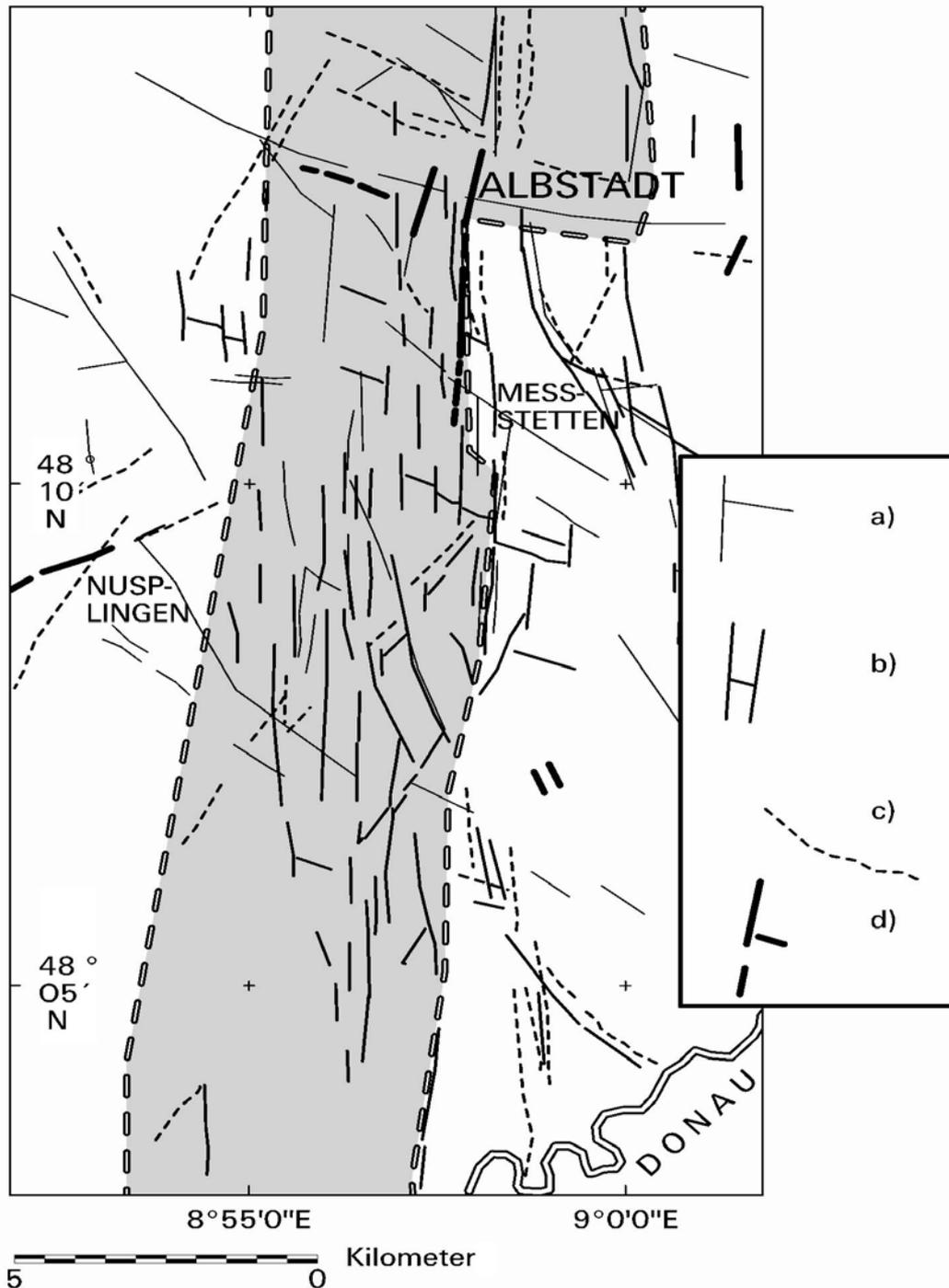


Abb.4: Detailinterpretation der Bruchsysteme der Albstadt-Scherzone
(Ausschnitt zwischen Albstadt und Donau)

a) SRTM-Relief, ERS1-Radarmosaik mit untergelegten DEM, ASTER-DEM; b) Radarintensitäten aus ERS1-Mosaik und SRTM-GTC; c) optische Satellitendaten (Landsat-5); d) geologische Aufnahme (Geol. Kartenwerke 1: 200 000)

samtzone verlaufenden und eng gebündelten kleineren Lineationen von zwei bis drei Kilometer Länge markiert. In geologischen Karten waren nur der östliche Rand der Zone südlich von Albstadt und kleinere Querstrukturen markiert. Nach der Lineationsdichte ist der Ostrand der Albstadt-Scherzone ebenfalls deutlicher ausgeprägt. Neben parallel zu den Flanken der Scherzone verlaufenden Lineationen (N-S) gibt es davon nach links (NNW-SSE) abweichende Lineationen, die auf diagonale Scherflächen hindeuten und von uns geomechanisch als Riedel-Scherflächen gedeutet werden. Riedel-Flächen gibt es in der Geomechanik in zwei Gruppen und zwar als synthetische und antithetische Riedel-Flächen, je nachdem, ob sie die dominierende Scherrichtung der Hauptscherzone unterstützen (synthetisch) oder eine Gegenbewegung wahrnehmen (antithetisch). Beide Scherflächentypen führen durch die entgegengesetzte Gleitung von Segmenten innerhalb der breiteren Scherzonen zu deren Ausdünnen, wenn dabei der Anteil duktiler Verformungen hoch ist. Im Sprödbbruchregime treten als Analogon interne Gesteinsschleppungen und Blockrotationen innerhalb der Störungszonen auf. Dies weist nach der Lage der internen Lineation auf **linkslaterale Verschiebungstendenzen** innerhalb der Albstadt-Scherzone hin, die auch von REINECKER und SCHNEIDER (2002) diskutiert wurden. Diese Autoren stellten durch die Herdflächenlösungen von Erdbeben und durch tektonische Felduntersuchungen fest, dass an den N-S- bis NNE-Brüchen neotektonisch linksdrehende Verschiebungen und an den NW-SE-Brüchen vornehmlich rechtsdrehende neotektonische Schrägverschiebungen vonstatten gehen und die „schwäbische Richtung“ (WSW-ENE) sich neotektonisch eher indifferent verhält. Dieses Bewegungsbild ist mit der auf das Gebiet einwirkenden neoalpinen Kompression kompatibel (σ_{H-max} ca. 150° , BAUMANN, 1986), so dass man von einer Anregung des Schollenfeldes durch die orogene Konvergenz im Alpenbereich ausgehen kann. Die eingangs erwähnte Streckung des postsalinaren Deckgebirges über dem Detachment-Horizont des Salinars führte zu den verbreiteten Grabenbildungen im postsalinaren Deckgebirge, wobei sowohl N-S-(NNE-SSW) Gräben (z. B. Lauchert-Graben) als auch NW-SE-Gräben (z. B. Hohenzollern-Graben) entstanden sind.

Die detaillierte Auswertung des Bruchmusters anhand der Satellitendaten zeigte, dass sich die **N-S-Strukturen als relativzeitlich jüngste Brüche** durch das übrige Schollenfeld hindurchsetzen und bewegungskinematisch linkslateral dominiert sind. Dabei ist zu beobachten, dass sie beim Durchtrennen der NW-SE- und WSW-ENE- Bruchzonen nach Norden allmählich in ihrer Repräsentanz im Deckgebirge schwächer werden, so dass eine gewisse Barrierewirkung der Querstrukturen anzunehmen ist. Analog zu gegenwärtigen „Nordwanderung“ der seismischen Ereignisse scheint sich auch eine Bruchausbreitung nach Norden anzudeuten. Die jüngsten Ereignisse (1999/2000) deuten darauf hin, dass sich die gegenwärtigen seismischen Aktivitäten innerhalb der Albstadt Scherzone im Segment zwischen Hohenzollerngraben im Süden und Rottenburger Flexur im Norden konzentrieren. Eine weitere querende Barriere nach Norden stellt dann nach diesem Konzept die breite Zone des „Schwäbischen Lineaments“ (WSW-ENE) und weiterhin die Zone des Fildergrabens (NW-SE) südlich von Stuttgart dar.

3 Ausblick

Die hier vorgestellten Zwischenergebnisse lassen es aussichtsreich erscheinen, durch die Verknüpfung der Informationen verschiedener hochauflösender Satellitensysteme bei der bruchtektonisch-neotektonischen Analyse von Gebieten wie dem süddeutschen Raum zwischen Stuttgart und Bodensee Fortschritte zu machen. Das heisst, dass sich auch in dicht besiedelten und weitgehend mit einer dichten Boden- und Vegetationsdecke überzogenen Bereichen **sekundäre** Effekte seismischer Aktivitäten zur Interpretation nutzen lassen. Wesentliche Interpretationsansätze (Reliefbeziehungen zur Tektonik) können dabei durch Einbeziehung

detaillierterer Höhenmodelle gewonnen werden, die auf terrestrischer Basis gewonnen oder durch Satellitenmissionen (SRTM, ASTER) abgeleitet wurden.

4 Literaturverzeichnis

- BANKWITZ, P., SCHNEIDER, G., KÄMPF, H., BANKWITZ, E. (2003): Structural characteristics of epicentral areas in Central Europe: study case Cheb Basin (Czech Republic).- *Journal of Geodynamics*, **35**: 5-33, 14 Abb.; Amsterdam, (Pergamon Press).
- BAUMANN, H. (1986): Der Hohenzollerngraben – Wirkung einer tiefreichenden Störung auf das regionale Spannungsfeld.- *Berichtsband 1984-1986, Teil A, SFB 108 „Spannung und Spannungsumwandlung in der Lithosphäre“*, 15-28, 5 Abb., 1 Tab.; Universität Karlsruhe.
- FRANZKE, H. J., WETZEL, H.-U. (2001): Geologische Interpretation eines ERS-1 Radar Mosaiks von Deutschland. – *Publikationen Deutsche Ges. Photogrammetrie und Fernerkundung*, **10**:503-510, 4 Abb.; Berlin.
- FRANZKE, H. J., WETZEL, H.-U. & WERNER, W. (2000): Das Strukturmuster des Schwarzwaldes aus der Sicht bruchtektonisch interpretierter TM- und ERS-1-Daten. - *Publ. Deutsche Ges. Photogrammetrie u. Fernerkundung (DGPF)*, Bd. 8: 481-493; Berlin
- GRÜNTAL, G., MAYER-ROSA, D., LENHARDT, W. A. (1998): Abschätzung der Erdbebengefährdung für die D-A-CH-Staaten – Deutschland, Österreich, Schweiz.- *Bautechnik*, **10**: 3-17, 6 Abb., 2 Tab., Verl. Ernst & Sohn; Stuttgart.
- KOSMANN, D. (1997): Bildverarbeitung für satellitengestützte Radarsysteme am Beispiel der Radarkarte von Deutschland. - *Techn. Akad. Esslingen, Bildverarbeitung '97*, ISBN 3-924813-38-8.
- REINECKER, J. & SCHNEIDER, G. (2002): Zur Neotektonik der Zollernalb: Der Hohenzollerngraben und die Albstadt-Erdbeben.- *Jber. Mitt. Oberrhein. Geol. Ver., N. F.*, **84**: 391-417, 8 Abb., 1 Tab.; Stuttgart.
- STANGE, ST., BRÜSTLE, W. (2001): Neuere seismische Aktivitäten auf der Schwäbischen Alb.- *Tagungsband DGG Frankfurt 2001*: S. 149; Frankfurt/Main.
- WERNER, W., FRANZKE, H. J. (2001): Postvariszische bis neogene Bruchtektonik und Mineralisation im südlichen Zentralschwarzwald.- *Z. dt. geol. Ges.*, **152/2-4**: 405-437, 12 Abb., 1 Tab.; Stuttgart.

Structural Interpretation of LANDSAT ETM- and ERS-Radar Satellite Data from Southwest Czech Republic and Northern Austria as Contribution to Seismic Microzonation Studies

BARBARA THEILEN-WILLIGE¹

***Abstract:** The present study is an attempt to integrate various data sets as LANDSAT ETM – and satellite radar (ERS) -data and geological and geophysical data from the investigation area in the southern Czech Republic and northern Austria to obtain a better understanding of processes influencing the damage intensity of stronger earthquakes. Special attention is given to the mapping of structural features visible on satellite imageries from the area in order to investigate the tectonic setting and to detect surface traces of fracture and fault zones that might influence the contour and degree of seismic shock and earthquake induced secondary effects as soil liquefaction. Linear features visible on remote sensing - data from the test area were mapped and risk areas delineated using Geographic Information System (GIS)-technology. As risk areas were mapped for example those regions with relatively higher risk of seismic wave amplification due to intersecting fault zones which might guide and amplify seismic waves or due to water saturated soils. The evaluations of the LANDSAT 7 ETM and ERS-data were compared, correlated and combined with available geologic and geophysical data. The results of this study allow an application for seismic microzonation purposes.*

1. Introduction

The Czech Republic and Austria have often been prone by natural hazards as earthquakes and earthquake induced secondary effects. The Euro Code 8 (EC8) requires the elaboration of earthquake risk maps on national level and their documentation mainly in form of the national application document (NAD) to the EC8. An important condition for the elaboration of such earthquake hazard maps is the knowledge of local differences in the ground shaking of the subsurface according to local site conditions. Earthquake damage may vary locally, being a function of the type of structures in the subsurface and / or soil mechanical ground conditions, as for example of faults and fractures, lithology or ground water table (Gupta, 1991). Previous earthquakes have indicated that the damage and loss of life are mostly concentrated, for example in areas underlain by deposits of soft soil. Soft soils amplify shear waves and, thus, amplify ground shaking. It has been observed by macroseismic studies of topographic effects, that in valleys and depressions damage intensity was higher because of higher earthquake vibration.

Other factors influence the strength of earthquake shaking at a site as well, including the earthquake's magnitude and the site's proximity to the fault. Source distance and depth, azimuthally variation of source radiation, inelastic absorption, focussing effects of geologic structures are further influencing facts: Seismic waves travelling in the subsurface might be refracted at sharply outlined discontinuities as faults, and, thus, arrive at a summation effect that influences the damage intensity. Earthquakes often are guided along existing fault zones.

¹) Dr. habil. Barbara Theilen-Willige, Privat-Dozentin, Technische Universität Berlin, Fakultät VI, Institut für Angewandte Geowissenschaften, Ackerstr.71-76, 13355 Berlin, and Büro für Angewandte Geowissenschaftliche Fernerkundung (BAGF), Birkenweg 2, D-78333 Stockach, Germany, E-mail: Barbara.Theilen-Willige@surf24.de, Fax: 0049 (0)7771 918857

Earthquake intensity, thus, can be amplified by guided seismic waves along fault zones. Fault zones could cause constructive interference of multiple reflections of seismic waves at the boundaries between fault zones and surrounding rocks. Precise delineation of those faults can be a veritable input in seismic risk analysis in order to improve the understanding of the influence of surface near tectonic structures on macro seismic intensity and on earthquake related faulting processes. Soil – structure interactions have to be studied as well in order to estimate the effects of future earthquakes.

For this reason, it is important to study carefully the existing surface-near fracture and fault pattern in order to get a better understanding of the interaction between existing tectonic pattern and seismic wave propagation. Lineament analysis based on satellite imageries can provide many useful hints and informations concerning the tectonic pattern and fault geometries

2. Objectives and Approach

Aim of this research is to investigate the use of different remote sensing data and their GIS based evaluation for the detection of the tectonic setting and of earthquake - fault interaction and fracture patterns at the earth's surface. This study is an attempt to integrate various data sets as LANDSAT ETM- and satellite radar data (ERS) and seismotectonic data from the southern Czech Republic and northern Austria. To obtain a general better understanding of processes influencing the damage intensity of stronger earthquakes, including primary and secondary effects as ground motion, liquefaction potential and landslide susceptibility, an image based GIS was elaborated, as shown schematically in Fig.1.

For enhancing the LANDSAT ETM- and ERS-data for the purposes of this study digital image processing has been carried out. Various Image Sharpening tools (ENVI Software/ CREASO) were tested to find the best suited combinations. Finally the bands 3,2,1 (RGB) and 8 and 3, 6.1, 6.2 (RGB) and 8 were selected to be transformed to a HSV high resolution (15 m) image product. Although various methods of image processing and enhancement were investigated to enhance the ERS radar image (histogram / contrast stretching, filter operations), finally the original ERS-image was used as base for the geologic and tectonic researches for not loosing subtle geologic informations. The geographic position of the images is shown in Fig 2. The remote sensing data were used for generating an image based GIS.

Based on the LANDSAT ETM- and ERS-data lineament analysis and mapping (using ArcGIS) has been carried in order to detect surface traces of fracture and fault zones that might influence the contour and degree of seismic shock. Linear arrangement of pixels depicting the same colour / gray tone were mapped as linear features, lineations or lineaments.

(- The term lineament or lineation is a neutral term for all linear, rectilinear or slightly bended image elements. Lineaments often represent the surface expression of faults, fractures or lithologic discontinuities. -)

Fig. 3 shows an example of linear anomalies in the vegetation appearance that were mapped as linear feature or lineaments, Fig. 4 an example for morpologic criteria as linear ridges and depressions and the contour of lakes.

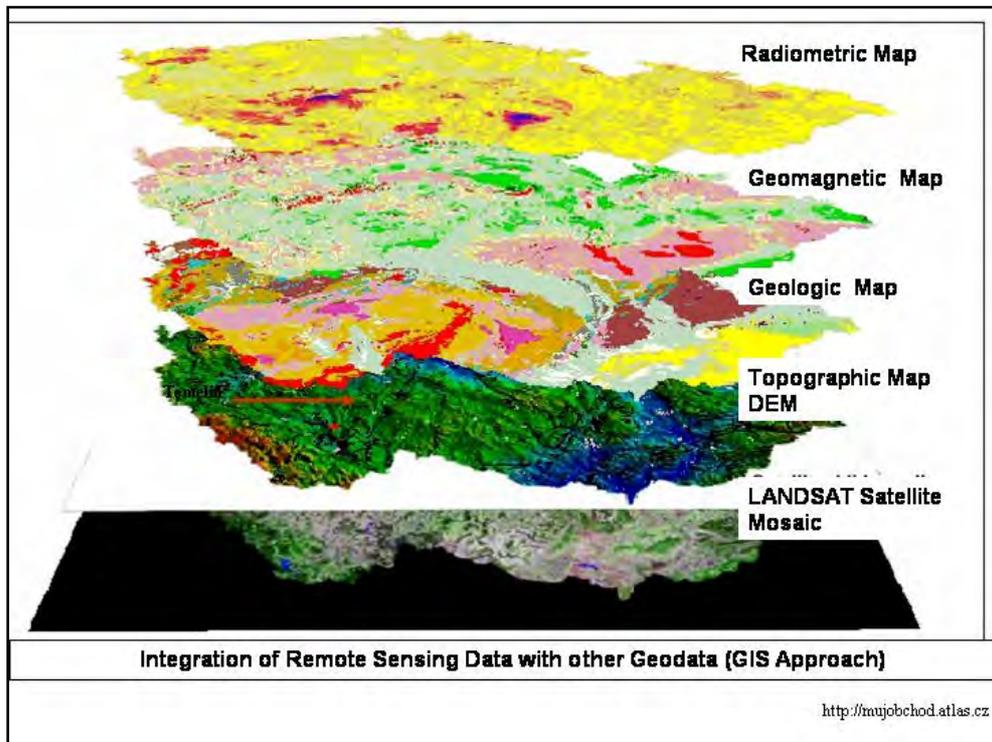


Fig. 1: Remote Sensing and GIS Approach

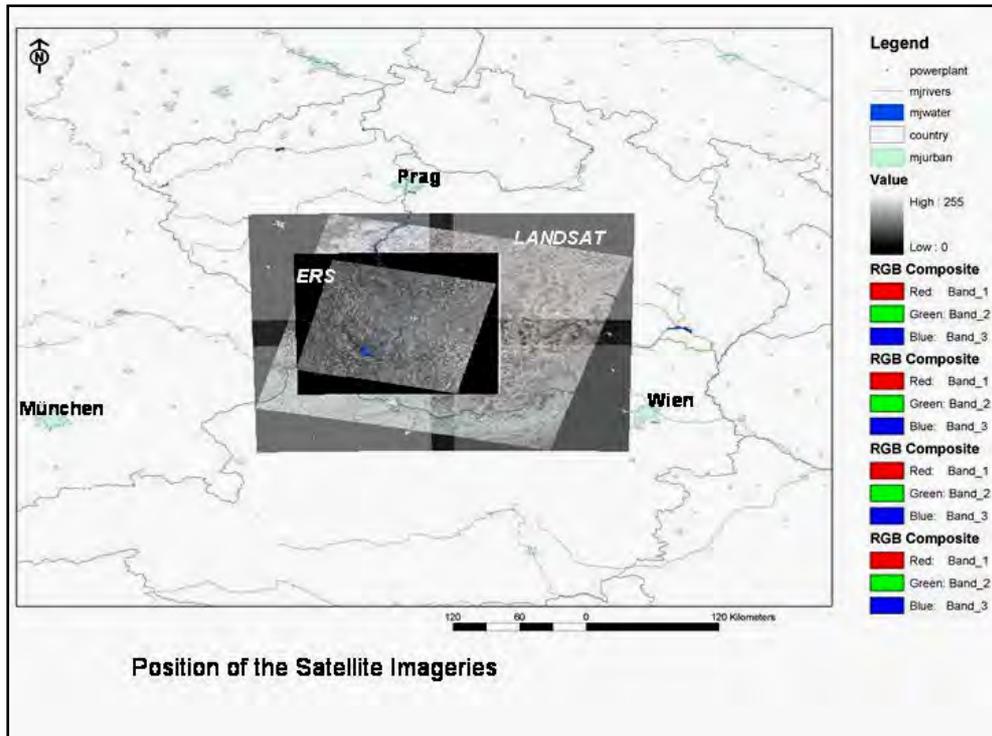


Fig. 2: Position of the LANDSAT ETM- and ERS-image
 LANDSAT 7 ETM, path 191, row 026, IG, 15.9.1999, 09:44:12 UTC
 ERS 1/2, SAR Geocoded Image, Orbit 23752, Frame 2619, 5.11.1999

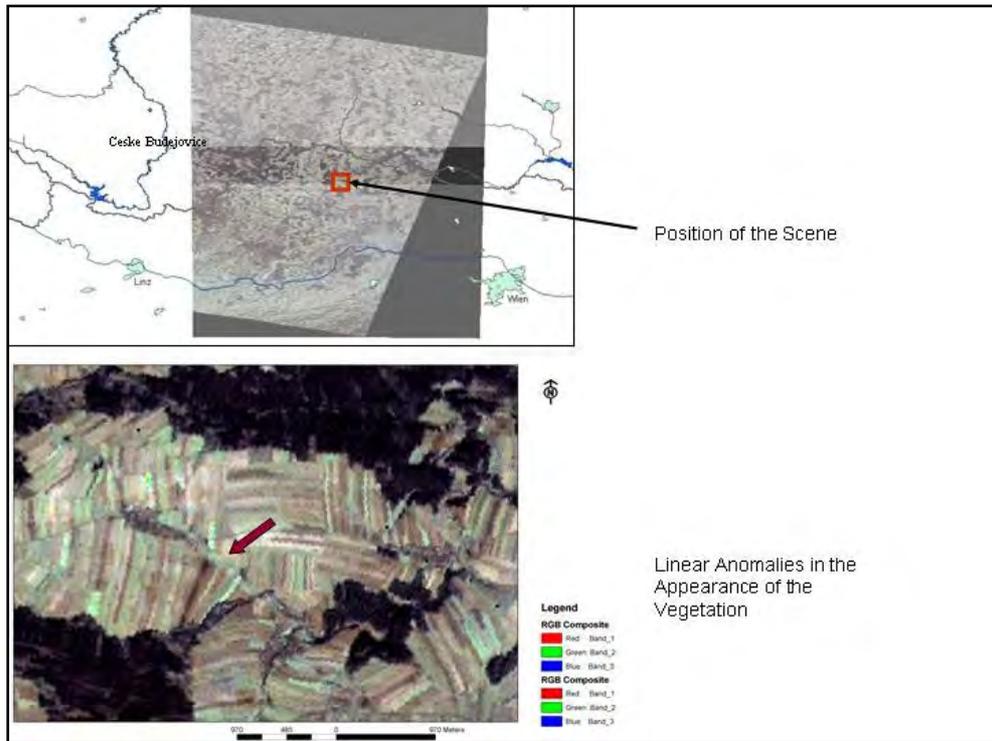


Fig. 3: Linear features on the LANDSAT 7 image visible due to linear anomalies in the appearance of the vegetation

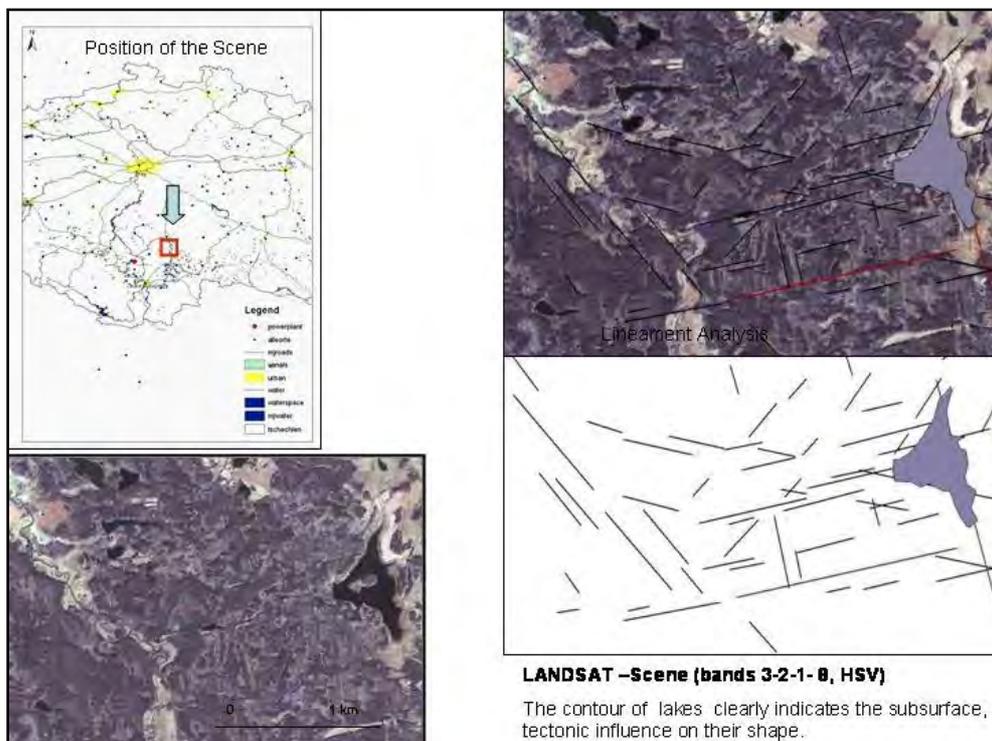
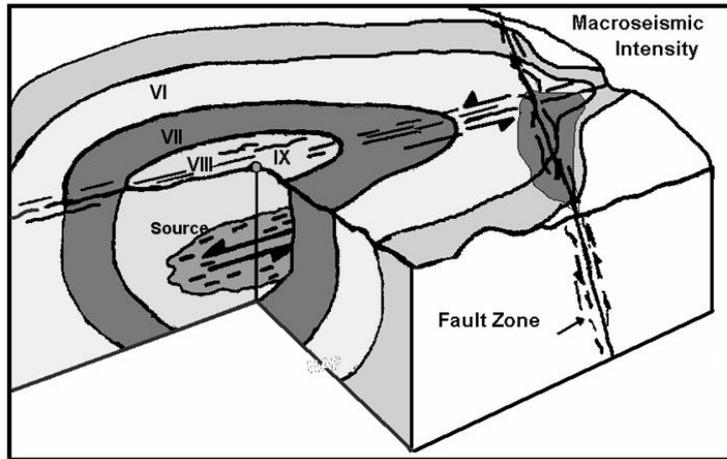


Fig. 4: Shape and contour of lakes as indices for the tectonic pattern

Fault segments, their bends and intersection are more apt to concentrate stress and amplify seismic shock. Fault segments, segments with en-echelon structure or bends of the fault trace, areas of fault intersections are the most probable sites of stress concentration and creation of stronger earthquake shock. The highest risk must be anticipated in junctions of differently oriented ruptures, especially where one intersects the other. Intersecting fault zones could cause constructive interference of multiple reflections of seismic waves at the boundaries between fault zones and surrounding rocks, see Fig.5.

Therefore special attention is focussed on precise mapping of traces of faults based on satellite imageries, often expressed as linear features. Results of evaluations of remote sensing image data were compared and combined with the maps of known faults and fracture zones.



Structural Influence on Macroseismic Intensity

Fig. 5.: Structural influence on macroseismic intensity

1) Outline: Seismic waves in the subsurface might be refracted at sharply outlined discontinuities as faults and fracture zones. Guided seismic waves along fault zones can be amplified and arrive a summation effect that influences the damage intensity. Thus, the shapes of contour lines of iso-seismal maps are influenced as well, as demonstrated schematically above. Mapping of linear features (lineaments) visible on radar imageries can help to detect those fault zones. VI-IX are zones of seismic intensity.

3. Geomorphologic, Geologic and Seismotectonic Setting of the Southern Bohemian Massif

The investigation area is part of the Bohemian Massif forming undulated peneplains and hilly regions bordered by a belt of mountainous areas. Fig.6 provides a geomorphologic overview based on Digital Terrain Data.

Analysing remote sensing, topographic and geologic data a circular structure of the Bohemian Massif is obvious (Fig.6, 7 and 8), although the southern part of the structure has been compressed due to the alpine movements to north.

Concerning its geotectonic position the southern Bohemian Massif is belonging to the Moldanubikum Zone as part of the East-European branch of the Variscian Belt.

The tectonic setting of the southern part of the Bohemian Massif is represented by mainly three structural levels: Cadomian, Variscian and Alpine. The Alpine compression affected the geologic units of the whole Bohemian Massif by significant movements along fault zones (SKACELOVA & HAVIR, 1998). It is most probable that the latest vertical tectonic movements on the faults in South-Bohemian took place during the Middle up to Upper Pliocene. In the southern part of Bohemian tectonic activity still continued, however with decreasing intensity, in the Lower Pleistocene.

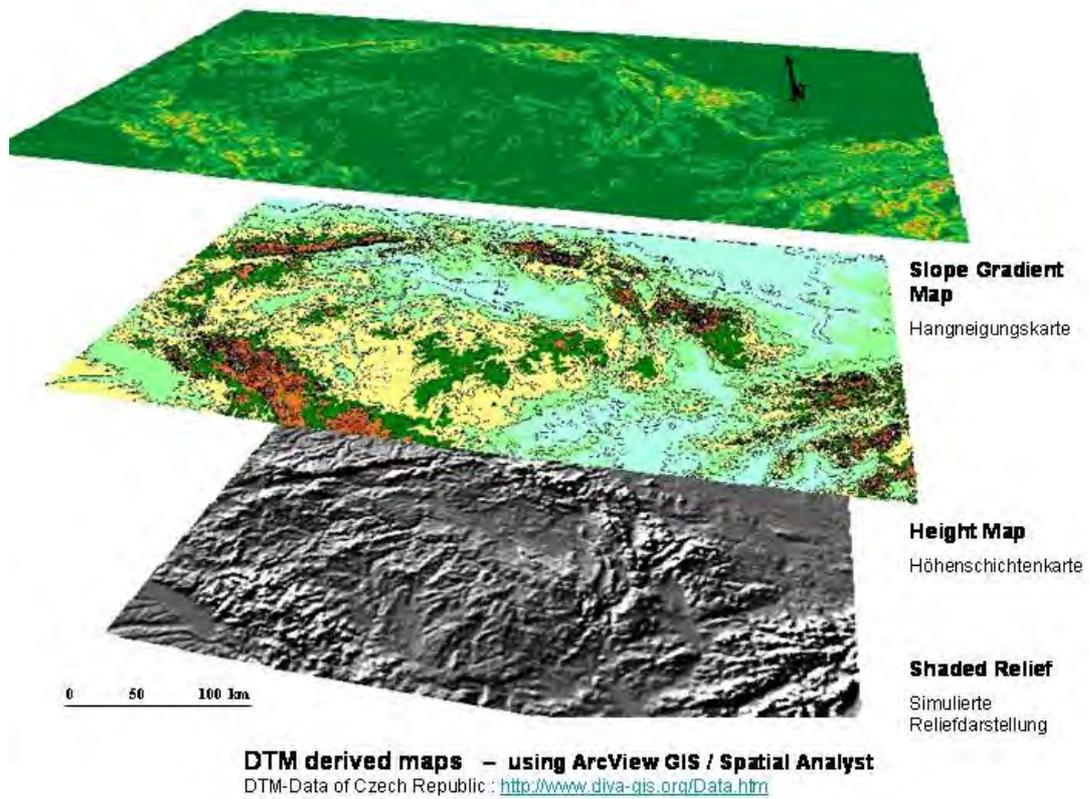
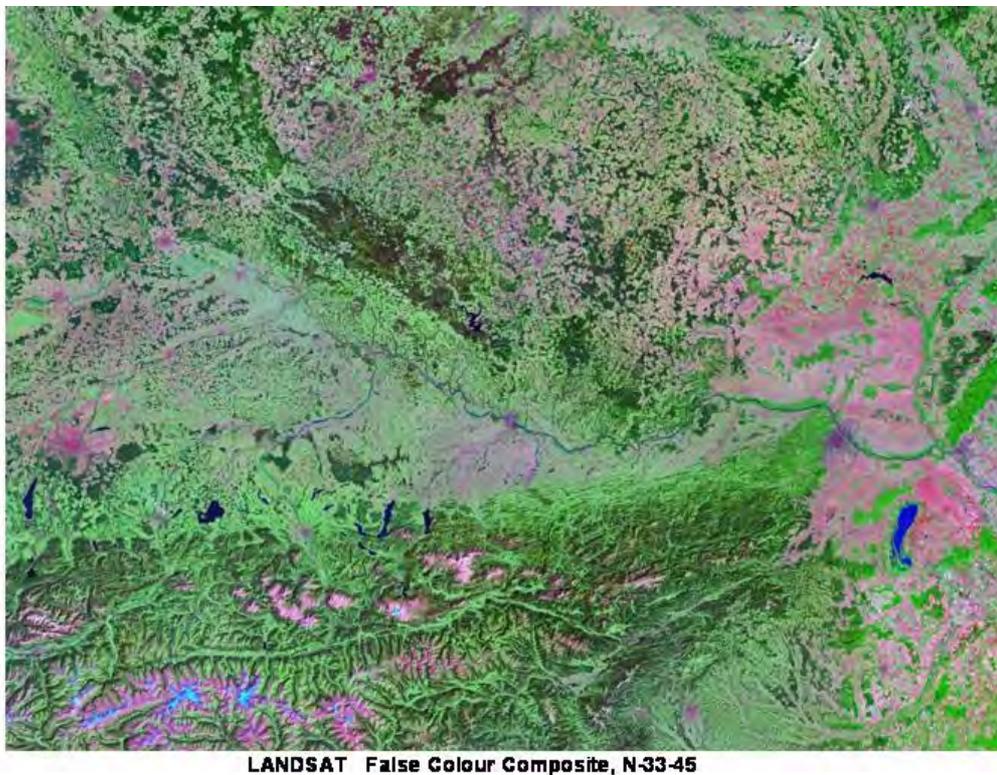


Fig.6: Geomorphologic Situation



Source: <https://zulu.ssc.nasa.gov/mrsid/mrsid.pl>

Fig.7: Circular structure of the Bohemian Massif visible on LANDSAT TM images

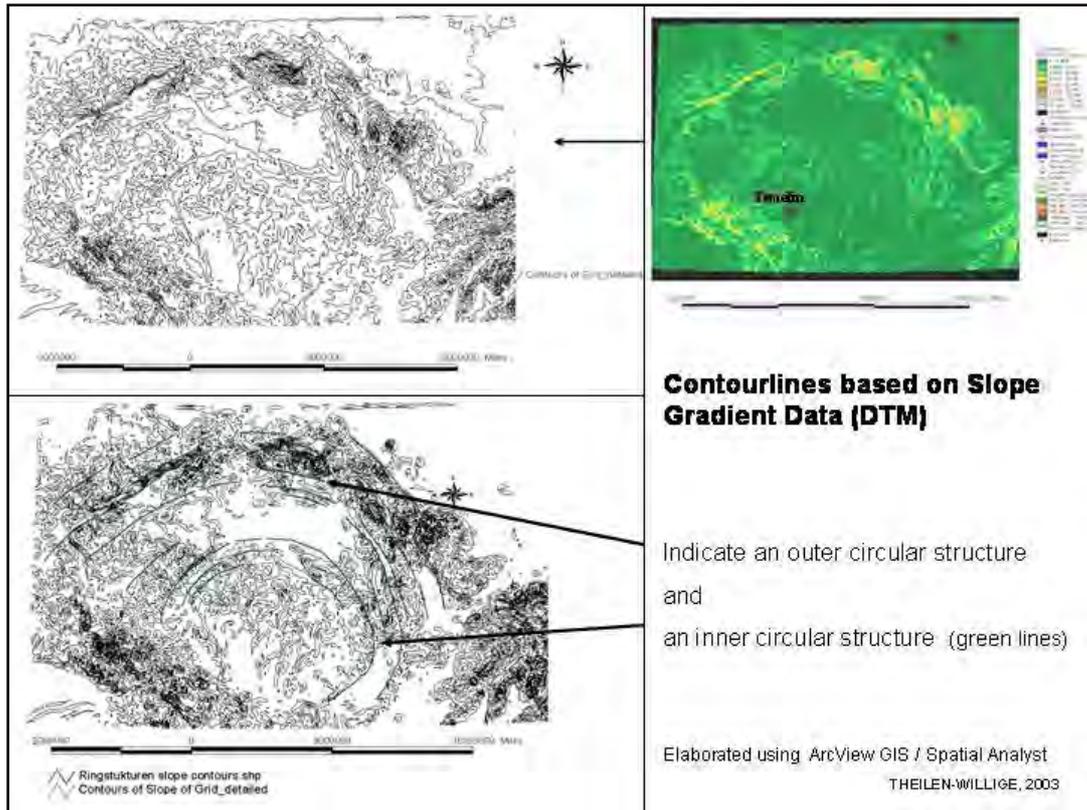


Fig. 8: Structural Information derived by Slope Gradient Map-Analysis

The lithologic situation is characterized mainly by the occurrence of metamorphic facies as granitic and gneissic rocks, migmatites and shists (ROHRMÜLLER, MIELKE & GEBAUER, 1996). The seismic activity is relatively weak in the study area and concentrated in isolated areas. Macroseismic earthquake manifestations in these regions were described in historical archives but most of them were assigned to the strong earthquakes in the Vienna Basin. Recent seismic activity has been monitored by seismological stations of the Institute of Physics of the Earth (IPE), Misery University Brno since 1992 (Fig.9). Swarm-like pattern of seismic activity is characteristic of the West Bohemia region and the neighbouring Vogt land (FRG). The occurrence of seismic tectonic activity and the found orientation of principal stresses in NW Bohemian Massif confirm recent sinisterly movements along tectonic structures as Navy Kostel-Pocaty-Zwota line (HAVIR, 2000). Tectonic stress concentration, which leads to the seismic activity of the region, also affects other physical fields such as the gravitational field, and causes rock deformation, mutual displacement of rock blocks, generation of cracks of various sizes and directions or ground water level changes. The interpretation of field data indicated two successive stages of Pliocene stress orientation: the E-W compression and NE-SW extension.

Traces of these tectonic activities can be found on LANDSAT ETM- and ERS-imageries.

4. Evaluations of LANDSAT ETM-Data

Based on the LANDSAT ETM, bands 3,2,1 (RGB) and 8 (HSV) image product a lineament analysis and mapping was carried out. Lineaments are detectable on the LANDSAT image mainly due to the drainage pattern, the shape and orientation of the numerous lakes, and linear anomalies within the vegetation appearance, see Fig.10. Fig.11 represents a LANDSAT ETM scene from the area south of the city Jindrichuv Hradec demonstrating the

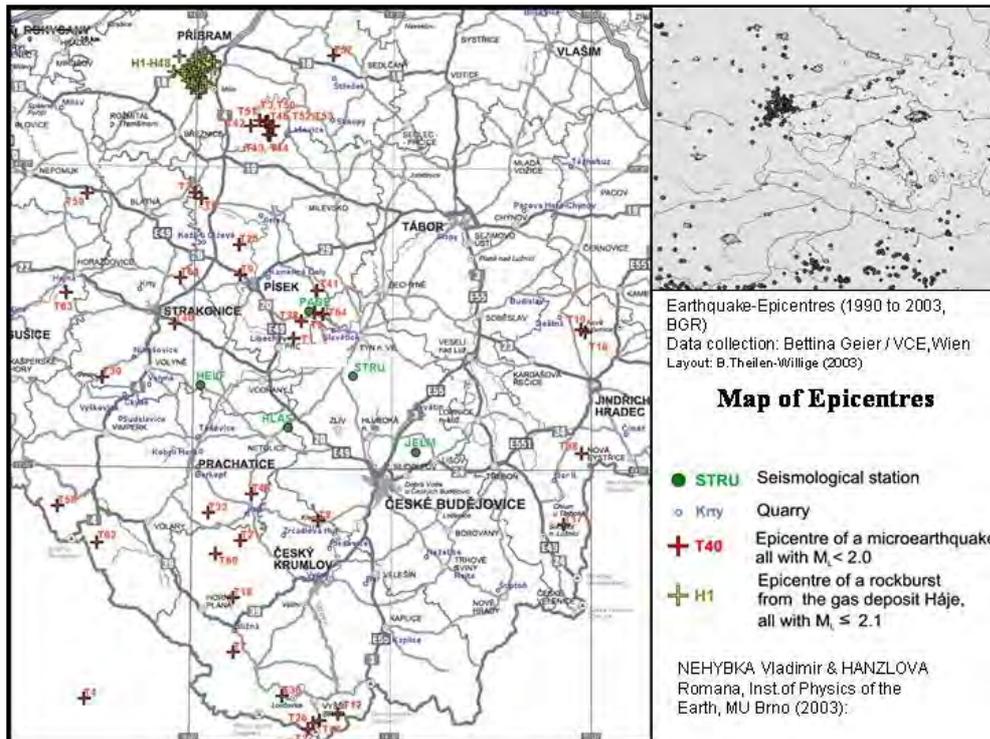


Fig. 9: Map of Epicentres

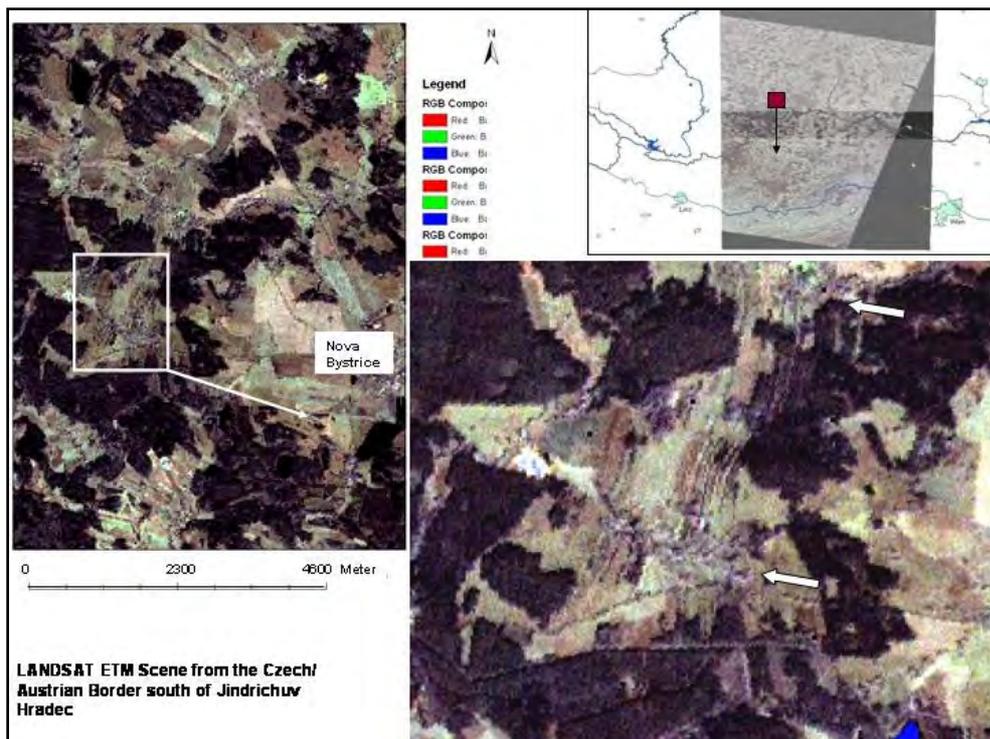


Fig.10.: Linear features visible on the LANDSAT 7 scene - traces of neotectonic movement?

visibility of linear features obviously related to neotectonic movements. Fig 12 shows the lineament map as a whole.

On the satellite imageries and topographic maps can be distinguished areas with a high concentration of lakes and wetlands. This can easily be demonstrated by a density map of the lakes created in ArcGIS, Fig.12. In case of stronger earthquakes macro-seismic intensity usually is higher in those areas with water saturated surface-near layers and areas with high

water tables. For the same earthquake, the effect of ground shaking can be several times greater at sites with thick, water-saturated soil than on those on competent bedrock. The level of the ground water table has an influence on seismic wave propagation and reflection, and as

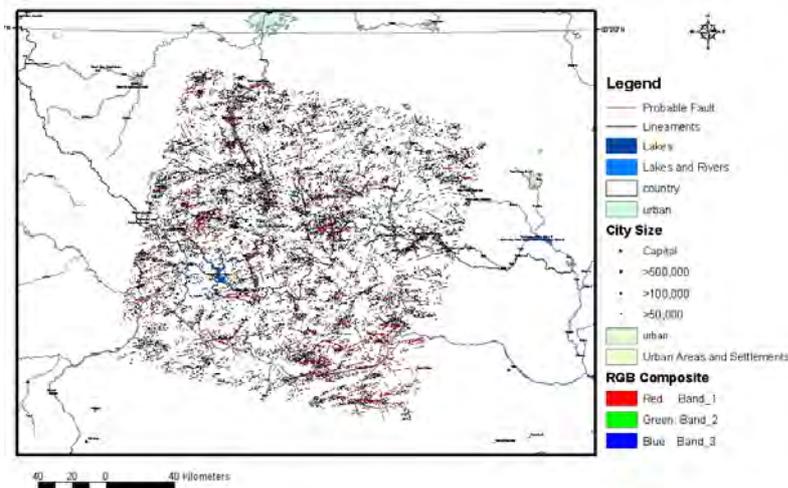


Fig. 11: Lineament map based on the LANDSAT image

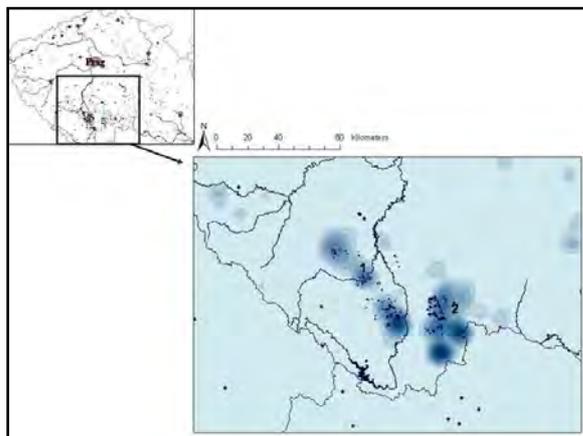


Fig. 12 : Density distribution of lakes in SW Czech Republic

The density distribution of lakes clearly shows areas with higher occurrence of lakes within a NW-SE and a N-S-trending depression.

For stronger earthquakes the effect of ground shaking can be several times greater at sites with thick, water saturated soils and high groundwater levels due to amplification of ground shaking than on those on competent bedrocks.

result on ground shaking. Therefore these areas were mapped as risk areas with potential higher risk of earthquake ground shaking, Fig.13.

Fault segments and areas of fault intersections are the most probable sites of stress concentration and creation of stronger earthquake shock. The highest risk must be anticipated in junctions of differently oriented ruptures, especially where they overlap each other. Those areas can be considered as being more exposed to earthquake shock due to amplification of guided seismic waves along crossing fault zones and to soil amplification. Therefore special attention is pointed on areas with distinct expressed lineaments on the LANDSAT image, as well as on areas with intersecting / overlapping lineaments. Based on lineaments that are

supposed to be probable faults a density map was created (Fig.14). Comparing this density map with the seismic risk map of Austria it seems to be obvious that lineament analysis can contribute to the enhancement of seismic microzonation maps by considering more detailed surface-near site conditions.

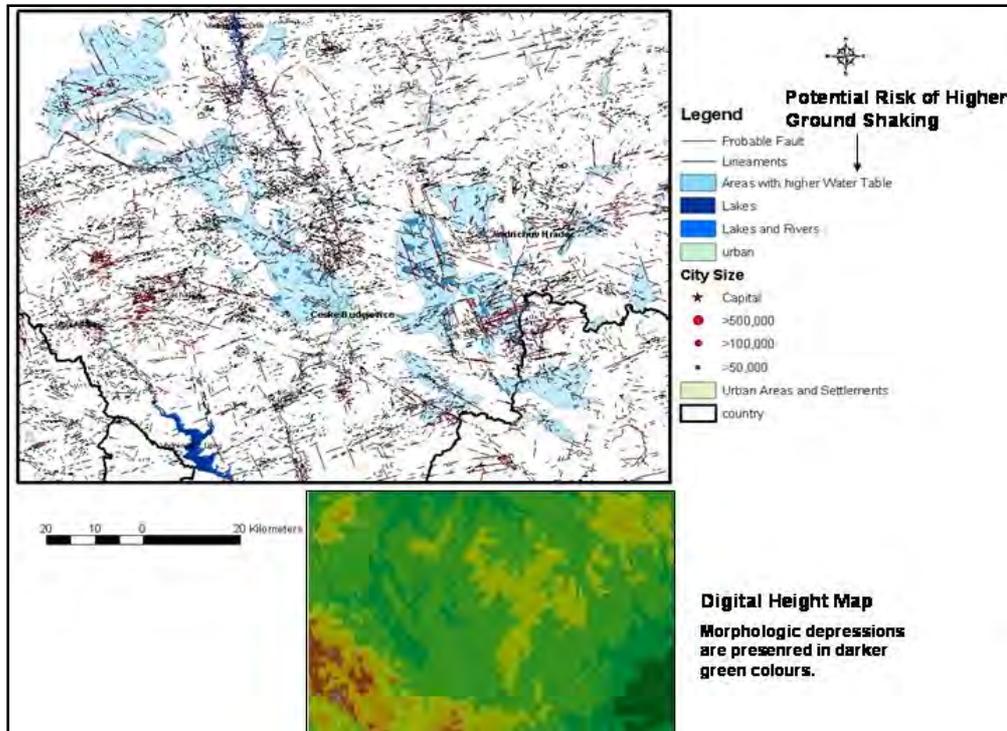


Fig. 13: Influence of water tables and topographic influence on damage intensity:

Potential risk of higher ground shaking during stronger earthquakes in areas with higher water tables and water saturated soils (blue) and areas with intersecting fracture and fault zones has to be considered. Topographic effects have to be considered as well. Within the same earthquake morphologic depressions as valleys and basins usually show higher damage intensities than the environment.

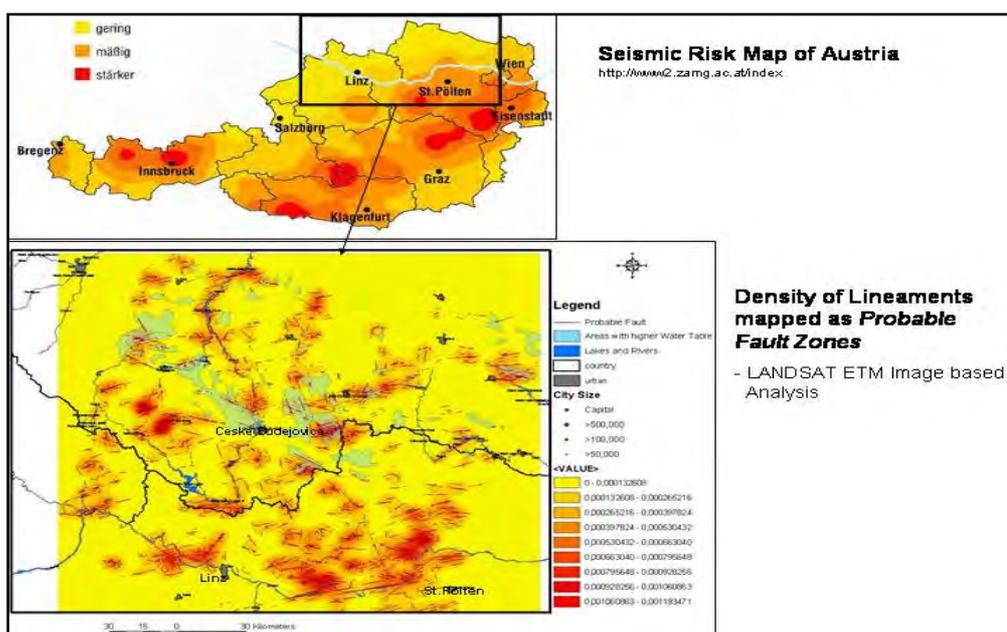


Fig.14: Contribution of lineament analysis to seismic microzonation studies

Areas of fault intersections are the most probable sites of stress concentration and creation of stronger earthquake shock. Lineament analysis contributes to the detection of those areas.

5. Evaluation of the ERS Image

Due to the viewing direction of radar the typical geometric distortions of SAR images preferentially enhance certain morphostructural features, others are suppressed. Changes in the intensity of SAR signal reflections are mainly correlated to variations of the relief, surface grain and humidity. Thus, radar imagery represents a valuable tool to detect small variations in the topography (Chorowicz et al.,1996). Studying offsets and deformation of topography and of young deposits, topographic anomalies, linear morphologic features as linear valleys, escarpments, etc., helps to identify faults on radar imageries. Especially on enlargements of ERS-satellite radar data up to a scale of more than 1: 50.000 many of the faults and fracture zones are traced as linear features and linear arrangements of pixels on the radar imageries. Using enlargements of radar imageries the detectibility of linear features on radar imageries can be improved to a great deal. This is demonstrated in Fig.15 and 16.

Comparing the radar derived lineament maps with available tectonic maps of this area it seems to be obvious, that most of the larger lineaments visible on radar imageries can be correlated with fault zones in the field. Several orthogonal systems of principal lineament distributions can be observed as NW-SE, SW-NE and N-S, E-W. The most prominent features on the LANDSAT and ERS-imageries are NNW-SSE oriented lineaments.

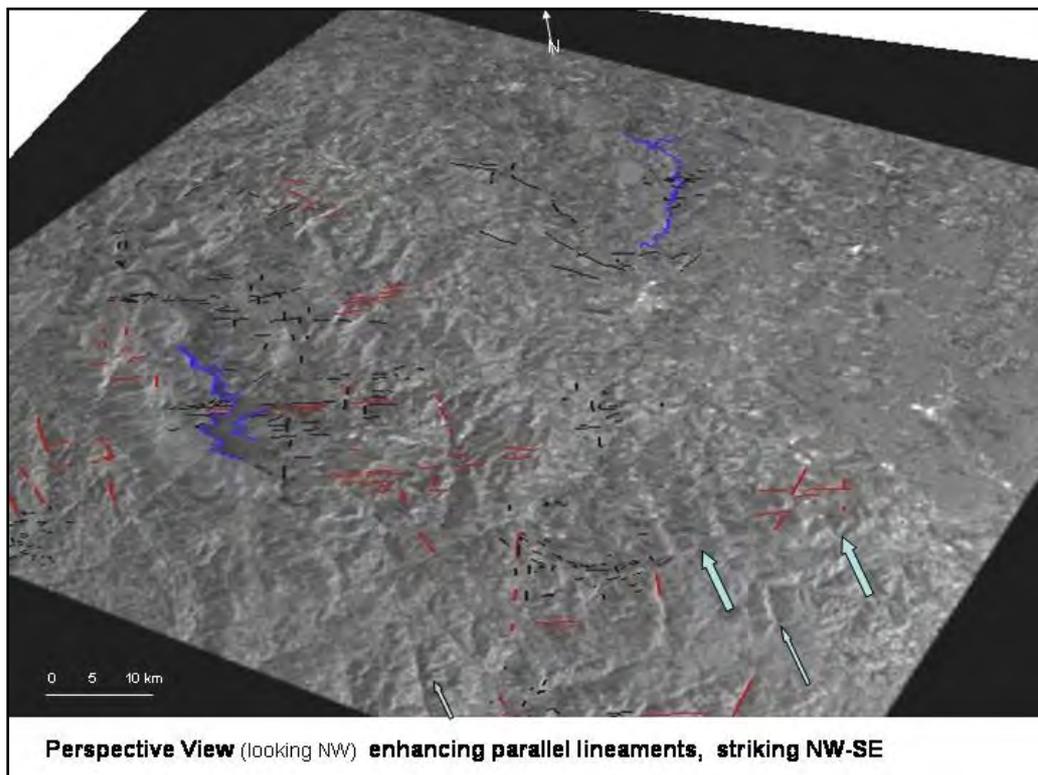


Fig. 15: ERS image from the southern Czech Republic and northern Austria

This is in agreement with the observed fault pattern described for example by BEHR,et.al.(1994). The lineament analysis contributes to a more detailed knowledge of the tectonic setting.

6. Conclusions

Remote sensing data and their interpretation serve as important layers in a GIS data base in order to perform earthquake hazard maps.

Some of the results can be summarized as followed:

➤ The lineament maps provide informations concerning the tectonic pattern of the investigation area, especially the position of fracture zones and faults. Lineament maps were combined with available geologic and geophysic maps. Many of the distinct lineaments visible on the satellite imageries could be verified as fault zones. Others seem to trace yet unknown fault zones.

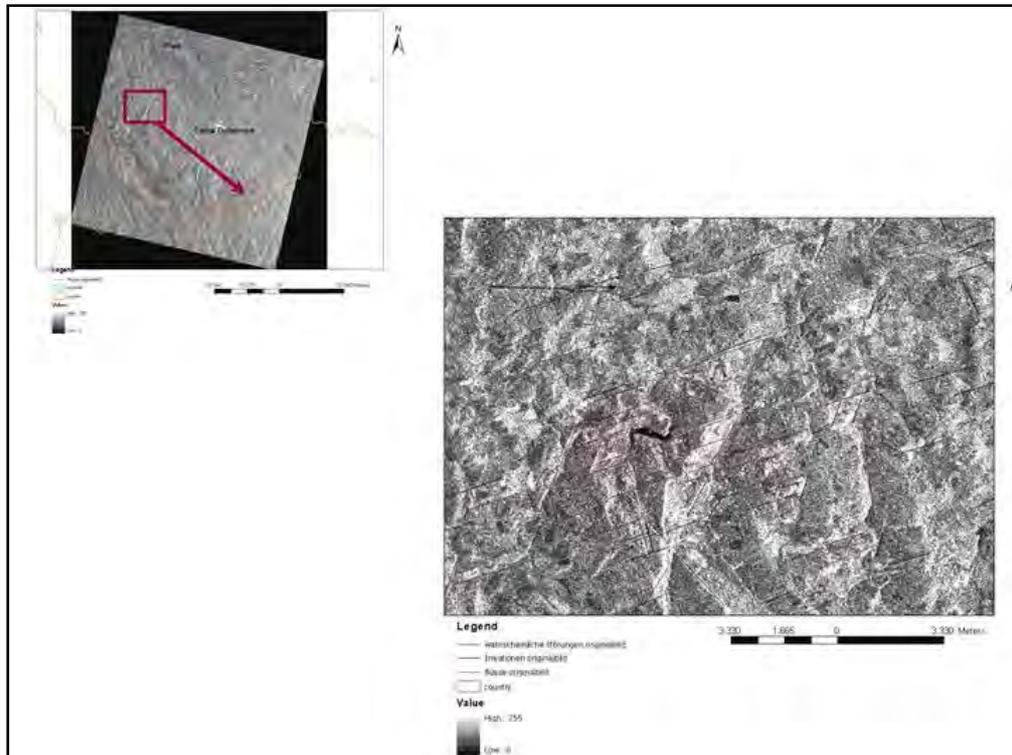


Fig. 16: Lineament Analysis based on the ERS image from the Bavarian Forest

➤ Fault zones could cause constructive interference of multiple reflections of seismic waves at the boundaries between fault zones and surrounding rocks and ,thus, amplify earthquake damage. Areas with intersecting lineaments were delineated and mapped as potential higher damage risk sites.

➤ Traces of neotectonic movements are clearly detectable on the satellite imageries. Evidence for neotectonism is indicated by geomorphologic features (sag-ponds, scarps, etc.), especially by the drainage pattern (bending and off-setting of rivers).

➤ On the satellite imageries and topographic maps can be distinguished areas with a high concentration of lakes and wetlands. In case of stronger earthquakes macroseismic intensity usually is higher in those areas with watersaturated surface-near layers. The level of the ground water table has a dominating influence. Therefore these areas were mapped as risk areas with potential higher risk of ground shaking.

7. Acknowledgement

The financial and logistic support of VCE Holding GmbH/ Wien is kindly acknowledged. The author thanks Dr.C.König and Dr.Th. König / Bildverarbeitungsbüro König/ Diessen for their support concerning the image enhancement of the LANDSAT and ERS-Data, the Austrian Federal Ministry of Agriculture, Forestry, Environment and Water Management for financial support and Dr. K. Lamprecht, Austrian Federal Environment Agency Ltd for project coordination.

8. References

- Behr, H.-J., Dürbaum, H.J., Bankwitz, P. et al., 1994: Crustal structure of the Saxothuringian Zone: Results of the deep seismic profile MVE-90 (East).- *Z.geol.Wiss.*, 22(6), 647-769, Berlin
- Bräuer, V. & G. Jentzsch (2001): Abgrenzung von Gebieten mit offensichtlich ungünstigen geologischen Verhältnissen. - AKEnd PDF-Internet-Publikation
- Bankwitz, P. & Bankwitz, E., 1992: Application of Satellite Data to Seismic Risk Assessment: Strain Analysis of Fault Lineament Systems.- *Berliner Geowiss.Abh.*, D, 1, 51-58, Berlin
- Chorowicz, J. et al., 1996: A new approach to map active faults related to seismic hazards, examples of the Atacama (Chile) and Dead Sea (Middle East) fault zones. *Proc. Sec. ERS Applications Workshop*, London, UK, 6-8 Dec. 1995, ESA-SP-383.
- Czech Geological Survey (1998): Atlas Map Ceske Republiky GEOCR 500, CD-ROM, Prag
- Freudenberger, W. & Schwerd, K., 1996: Erläuterungen zur Geologischen Karte von Bayern 1:500.000.- 4. neu bearb. Auflage, Bayerisches Geol. Landesamt (Hrsg.), München
- Jentzsch, G. 2001 : Vulkanische Gefährdung in Deutschland - Entwicklung eines Kriteriums zum Ausschluss von Gebieten für die weitere Untersuchung hinsichtlich der Eignung als Standort eines Endlagers für radioaktive Abfälle.-
- Havir, J., 2000: Stress Analysis in the Epicentral Area of I NOVÝ KOSTEL (WESTERN BOHEMIA).- *J. Geophys. Res.*, BOHEMIA, Institute of Physics of the Earth, Masaryk University, Brno, Czech Republic, <http://www.ipe.muni.cz/art/c104.pdf>
- Havir, J., 2001 : Paleostress analysis in the Jakubòovice quarry (the Nížký Jeseník Upland) - an example of results affected by folding.- *Bulletin of the Czech Geological Survey*. Vol. 76, No. 3. 169-177. 2001, Czech Geological Survey, ISSN 1210-3527
- Hurtig, E. & Stiller, H., 1984: Erdbeben und Erdbebengefährdung.- Akademie-Verlag, Berlin
- Mayer-Rosa, D., Rüttener, E., Fäh, D. et al., 1997: Erdbebengefährdung und Mikrozonierung in der Schweiz.- NFP 31- Schlussbericht, vdf, Hochschulverlag an der ETH Zürich
- Prachar, I., 2003: Temelin Nuclear Power Plant – Geological Investigation.- in: SUJB (Hrsg., 2003): Seismic Hazard Assessment of Temelin NPP Site.- Workshop-papers, March 27-28, 2003, Prag, unpubl.
- Rohrmüller, J., Mielke, H. & Gebauer, D., 1996: Tektonik.- Geologische Karte von Bayern, 1:500.000, 252-259, Bayerisches Geol. Landesamt (Hrsg.), München
- Scherbaum, F., Schneider, G. & Langer, H., 1993: Herd- und Ausbreitungsvorgänge bei Erdbeben.- in: DFG (Hrsg., 1993): Naturkatastrophen und Katastrophenvorbeugung – Bericht zur IDNDR.- VCH Verlagsgesellschaft, 151-176, Weinheim
- Schneider, G., 1996: Erdbebengefährdung in Mitteleuropa – Hinweise aus Geodäsie und Gravimetrie auf Scherzonen mit seismischen Bewegungscharakter.- *Deutscher Verein für Vermessungswesen, Landesverein Baden-Württemberg*, 43 Jg., 1, 47-56
- Skacelova, Z. & Havir, J., 1998: Earthquakes on the Eastern Margin of the Bohemian Massif recorded by the Stations of the IPE Brno.- “Exploration Geophysics, Remote Sensing and Environment”, V. 2, 16-
- SUJB (Hrsg., 2003): Seismic Hazard Assessment of Temelin NPP Site.- unpubl. Workshop Papers, March 27-28, 2003, Prag
- Theilen-Willig, B., 2000: Seismic Hazard Zoning based on Evaluations of Remote Sensing Data (LANDSAT TM-/SIR-C/X-SAR-Radar) of the Lake Constance Area/ Southwest Germany in Comparison with Field Check.- *Photogrammetrie-Fernerkundung-Geoinformation (PFG)*, 1, 19-32, Schweitzerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart

Wetzel, H.-U & Franzke, H.-J.,2001: Geologische Interpretation eines ERS-1-Radarmosaiks von Deutschland.- Publ. Der Deutschen Ges. f. Photogrammetrie u. Fernerkundung, Vorträge 21.Wiss.-Techn.Jahrestagung der DGPF,503-510, Berlin

Vydal Cesky Geologiccky Ustav (1998): Atlas map Ceske Republiky GEOCR 500.- Prag, Digitaler Atlas, CD-ROM

Möglichkeiten der Fernerkundung zur Analyse terrestrischer Impaktstrukturen

HEIKO ZUMSPREKEL & LUTZ BISCHOFF¹

Zusammenfassung: Die Erhaltungsfähigkeit terrestrischer Meteoritenkrater und ihre Erkennbarkeit in Luft- und Satellitenbildern hängen von einer Vielzahl naturräumlicher bzw. regionalgeologischer Rahmenbedingungen ab. In dem Beitrag werden die Möglichkeiten und Probleme zur Erfassung des strukturellen Aufbaus, der Verbreitung von Impaktlithologien und Targetgesteinen in komplexen Impaktstrukturen mit Hilfe von Landsat-TM-Daten anhand von Fallbeispielen aufgezeigt.

1 Einleitung

Fernerkundung kommt bei der Identifikation und Untersuchung des Aufbaus von terrestrischen Meteoritenkratern (Impaktstrukturen) seit Jahrzehnten eine wichtige Rolle zu. Von den heute über 160 bekannten Meteoritenkratern auf der Erde wurden viele mithilfe von Luft- und Satellitenbildern entdeckt und ihr Impaktursprung durch nachfolgende Geländearbeiten nachgewiesen. Einen guten Überblick des derzeitigen Forschungsstandes gibt ein WWW-Katalog, der vom Planetary and Space Science Centre der University of New Brunswick stetig aktualisiert wird (WHITEHEAD & SPRAY 2003).

Die Erkennbarkeit von Meteoritenkratern in Fernerkundungsdaten ist von folgenden Faktoren abhängig:

- **Naturräumliche Bedingungen:** Während Krater in ariden Gebieten mit direkt aufgeschlossenen Festgesteinen dem Betrachter häufig ins Auge springen, sind Strukturen in Gebieten mit dicht bewachsener Vegetation weitaus weniger deutlich, so dass die Auswertung multispektraler bzw. optischer Daten schnell an ihre Grenzen stößt.
- **Regionalgeologische Verhältnisse:** In den Gebieten des kanadischen und baltischen Schildes werden zahlreiche Krater durch ringförmige bis polygonale Seen nachgezeichnet. Sie sind zwar deutlich zu erkennen, setzen sich jedoch von ihrer Umgebung aus glazial geformten Seenplatten kaum als ringförmige Anomalien ab.
- **Post-Impakt-Ereignisse:** (1) **Erosionsprozesse:** Impaktstrukturen unterliegen insbesondere in ihren Randbereichen relativ schnell der Erosion. Die Deformation in zentralen Bereichen reicht dagegen bis in größere Tiefen, so dass diese länger erhalten bleiben. Veränderungen der ursprünglichen Kratermorphologie sind außerdem vom Verwitterungsverhalten des Targetmaterials und der Stärke und Dauer der Erosionsprozesse abhängig. (2) **Sedimentation:** Durch die Bedeckung mit jüngeren Ablagerungen oder ihre Lage in marinen Räumen sind viele Krater einer direkten Beobachtung mit Satellitenbildern nicht zugänglich. Andere Beispiele zeigen jedoch auch, dass durch eine frühere Sedimentbedeckung alte Impaktstrukturen vor Erosion geschützt wurden und daher heute geologisch überliefert sind. (3) **Post-Impakt-Deformation:** Die ursprüngliche Ringform von Kratern kann, wie z.B. bei der

¹ Dr. Heiko Zumsprekel und Prof. Dr. Lutz Bischoff, Geologisch-Paläontologisches Institut, Corrensstr. 24, 48149 Münster, email: zumspre@uni-muenster.de, bischol@uni-muenster.de

Sudbury-Struktur in Kanada, durch nachträgliche Deformationsereignisse verloren gehen.

- Datengrundlage: Impaktkrater zeigen unterschiedliche Signaturen in optischen Satelliten- oder Luftbildern, thermalen Infrarotbildern, Radardaten, aeroradiometrischen oder -magnetischen Daten.

Ein einheitlicher Schlüssel zur Untersuchung terrestrischer Impaktkrater ist daher aufgrund der variierenden naturräumlichen Gegebenheiten, Datengrundlagen und fernerkundlichen Methoden kaum definierbar. Im vorliegenden Beitrag werden einige Fallbeispiele terrestrischer Krater aufgezeigt, die aufgrund günstiger Bedingungen gut mithilfe von multispektralen Satellitendaten analysiert werden können. An ihnen soll der mit zunehmender Größe generell komplexere Aufbau von Impaktkratern und die Möglichkeiten der Erfassung von Impaktlithologien und des strukturellen Inventars verdeutlicht werden. Als Grundlage dienen Bilddaten aus dem Datenarchiv der University of Maryland (GLCF 2003), in dem Landsat TM-Daten aus dem Zeitraum Ende der 1980er Jahre bis Mitte der 1990er Jahre Geowissenschaftlern frei zur Verfügung gestellt werden.

2 Grundlagen der Kratergenese

Impaktkrater entstehen durch den Einschlag kosmischer Projektile (Asteroide, Kometen) mit ausreichender Größe (30 - 50 m) und Geschwindigkeit (> 11.2 km/s) auf planetaren Oberflächen. Die hierbei auftretenden Schockwellen mit Drücken von über 100 GPa überschreiten die Festigkeitseigenschaften der Targetgesteine bei weitem. Neben der Verdampfung, Aufschmelzung und Brekzierung der Gesteine in der Umgebung des Einschlagpunktes kommt es zu irreversiblen, schockmetamorphen Veränderungen im mikroskopischen Bereich, durch die sich ein Impakt eindeutig nachweisen lässt.

Die Kraterentstehung lässt sich nach MELOSH (1989) in drei Phasen mit jeweils unterschiedlichen dominierenden physikalischen Kräften gliedern: (1) Kontaktphase zwischen dem Projektil und den Targetgesteinen bzw. Kompression des Targets, (2) Exkavationsphase, die zur Öffnung des Kraters führt, (3) Modifikationsphase. In diesem kratermechanischen Modell wird von der Bildung einer temporären, im Querprofil schüsselförmigen Kraterhohlform (transient crater oder cavity) ausgegangen, die am Ende der Exkavationsphase ihre maximale Ausdehnung erreicht hat. Sie stellt keine stabile Hohlform dar, sondern wird während der Modifikationsphase durch gravitative Kräfte verändert. Die Prozesse während dieses letzten Stadiums der Kratergenese sind besonders bei größeren, sog. komplexen Impaktstrukturen maßgebend. Im Zentralbereich (central peak) komplexer Strukturen werden tiefer liegende Gesteinseinheiten strukturell aufgerichtet und emporgehoben. In äußeren Bereichen führt der gravitative Kollaps zu einer starken seitlichen Vergrößerung, zur Bildung von konzentrischen Störungen und radialen Brüchen innerhalb einer terrassenähnlichen, aus einzelnen Gesteinschollen aufgebauten Zone.

Wie vor allem aus statistischen Auszählungen und Größenmessungen an Kratern auf anderen Planetenoberflächen wie dem Mond oder Mars bekannt ist, zeigen komplexe Impaktstrukturen mit wachsendem Durchmesser eine weitere Gliederung des Kraterinneren. Bei der Ausbildung eines topografischen Beckens, das ringförmig den central peak umschließt und seinerseits von einem ringförmigen Hoch umgeben ist, wird die Struktur als central-peak-basin bezeichnet. In den noch größeren peak-ring-basins ist kein central peak entwickelt und das gesamte Kraterzentrum wird von einem Becken eingenommen, dem sich nach außen hin ein ringförmiges, topografisches Hochgebiet anschließt. Die größten Impaktstrukturen zeigen zusätzlich zum äußeren Kratertrand zwei oder mehrere Ringe und werden als multi-ring-basins bezeichnet.

Prinzipiell sind diese morphologischen Übergänge von einfachen zu komplexen Strukturen auf terrestrische Krater übertragbar. Der Durchmesserbereich, in dem eine bestimmte Kratermorphologie auftritt, ist in erster Linie abhängig von der Größe des Impaktereignisses und der Gravitationskraft des Planeten. Daneben spielen die Eigenschaften des Targetmaterials und möglicherweise die Einschlagsgeschwindigkeit des Projektils eine Rolle. Auf der Erde ist ein Übergang von einfachen Kratern zu komplexen Impaktstrukturen ab einem Durchmesser von zwei Kilometern in sedimentärem Targetmaterial und vier Kilometern in kristallinen Gesteinen nachweisbar (GRIEVE & PILKINGTON 1996). Morphologien von central-peak-basins bzw. peak-ring-basins sind auf der Erde aufgrund erosiver Prozesse seltener erhalten. Analog zu den Beobachtungen von Mond und Mars müssten bei terrestrischen Kratern central-peak-basins mit einem Durchmesser von 22 bis 30 km entwickelt sein. Peak-ring-basins sollten auf der Erde mit Durchmessern zwischen 30 und 62 km auftreten (FRENCH 1998). Obwohl auf der Erde mehrere Impaktstrukturen einen ausreichenden Durchmesser von > 100 km besitzen, wird bisher nur der Chicxulub-Krater auf der Halbinsel Yucatán in Mexiko als multi-ring-basin interpretiert (MORGAN & WARNER 1999).

3 Fallbeispiele

3.1 Roter Kamm

Der Rote Kamm westlich der Huns Mountains in der namibischen Wüste ($27^{\circ} 45' S / 16^{\circ} 17' E$, Alter 33.7 Ma nach KOEBERL et al. 1993) steht exemplarisch für einen jungen, etwa schüsselförmig aufgebauten, einfachen Krater (Abb. 1). Seine Ringform setzt sich um ca. 40 bis 90 m von der Umgebung ab und ist in der ansonsten durch NW-SE-verlaufende Longitudinaldünen geprägten Landschaft deutlich zu erkennen. Der Kraterdurchmesser beträgt 2.5 km. Die Struktur ist recht ähnlich aufgebaut wie der bekannte Meteor Crater in Arizona (Durchmesser 1.3 km) oder der Wolfe Creek Crater in Australien (Durchmesser 0.875 km). Die Entstehung des Roten Kamms durch einen Impakt wurde zuerst von FUDALI (1973) angenommen, allerdings konnten erst REIMOLD & MILLER (1989) und REIMOLD et al. (1994, 1997) eine Schockmetamorphose in Impaktschmelzgesteinen und -brekzien nachweisen. Ein großer Teil der Kraterflanken und des Krateräußeren wird von jungen Sandablagerungen bedeckt. Auch das Innere ist mit äolischen Sanden verfüllt, so dass der Krater heute eine Tiefe von nur 50 m aufweist, während der wirkliche Kratergrund mehrere Hundert Meter tief liegt.

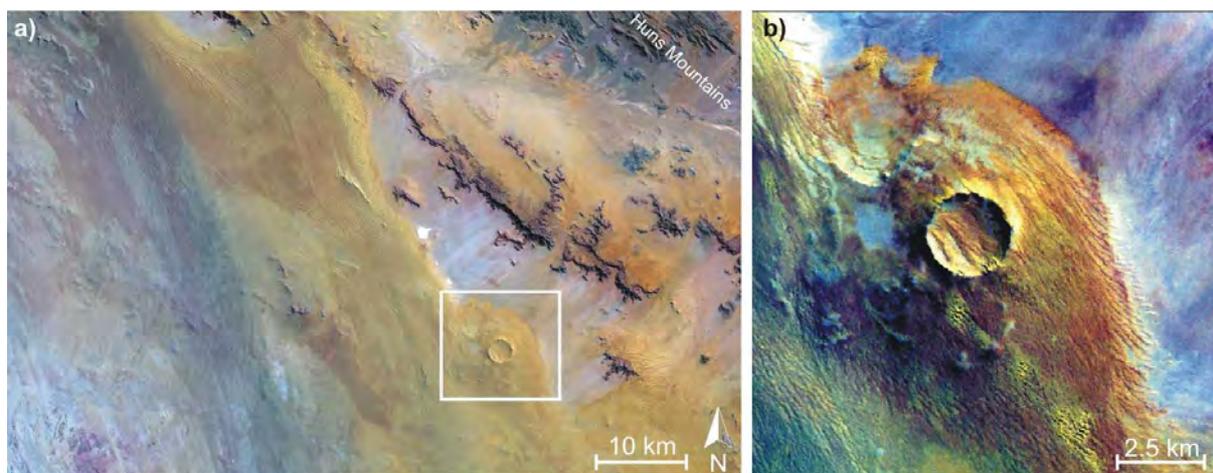


Abb.1: (a) Lage des Kraters Roter Kamm in der Namib-Wüste SW' der Huns Mountains (Landsat TM 731 [rgb]). (b) Vergrößerter Bildausschnitt zeigt die Überdeckung des Kraterandes und Kraterinneren mit Sanddünen.

Das Targetmaterial aus karbonatreichen Metasedimenten der neoproterozoischen Gariép Formation und präkambrischen Graniten und Granodioriten ist nur stellenweise am Kraterrand aufgeschlossen. Impaktgesteine finden sich ebenfalls nur vereinzelt am Kraterrand und in der näheren Umgebung.

3.2 Upheaval Dome

Upheaval Dome liegt in der Canyonlandschaft des Colorado-Plateaus im SE des Bundesstaates Utah ($38^{\circ} 26' N / 109^{\circ} 54' W$, Alter < 170 Ma). In Landsat-Daten sind Reste des Zentralbereichs als ca. 2.5 km großes bull's eye zu erkennen, das sich in der ansonsten tektonisch schwach deformierten Region des Colorado-Plateaus abhebt. Das Targetmaterial setzt sich aus vorwiegend siliziklastischen Gesteinen des Karbons bis zur Kreide zusammen. Da die regionale Geologie auch von einem Salzdiapirismus geprägt wird, der sich allerdings in Form kleinerer Salzdome mit 300 - 400 m Durchmesser äußert, wird neben einer Impaktentstehung auch eine Deutung als Salzdom für möglich gehalten (JACKSON et al. 1998). KRIENS et al. (1999) ziehen hingegen mikroskopische Anzeichen einer Schockmetamorphose, Funde von shatter cones und strukturelle Kriterien als Impaktnachweis heran. Aufgrund der tief eingeschnittenen Canyons sind die Aufschlussverhältnisse im Krater hervorragend. In Landsat-Daten lassen sich vom Zentrum der Struktur nach außen folgende siliziklastischen Sedimentgesteine unterscheiden (Abb. 2): (1) klastische Sedimentgesteine der Cutler Group (Perm) bzw. Moenkopi und unteren Chinle Formation (Trias) anhand ihrer dunkelgrünen bzw. hellblauen Farbe, (2) die obere Chinle Formation und der Wingate Sandstone anhand ihrer olivgrünen bis bräunlichen Farbe (Jura), (3) die ebenfalls jurassische, aber jüngere Kayenta Formation (graublau bis violett), die auch in den Canyons in der Umgebung des Upheaval Dome aufgeschlossen ist, (4) der Navajo Sandstone (Jura) als jüngste Einheit des Targetmaterials anhand seiner generell hellen Spektralfarbe. Diese Anordnung entspricht einer stratigraphischen Verjüngungsrichtung von innen nach außen und ist somit typisch für den central uplift eines komplexen Kraters. Nach KRIENS et al. (1999) wird der central uplift von einer ringförmigen Synklinale umschlossen, die einen Durchmesser von ca. 5 km besitzt. Der äußere Kraterrand ist im Falle des Upheaval Dome nicht mehr erhalten.



Abb. 2: Upheaval Dome in Utah (Landsat TM 543 [rgb], Erläuterungen siehe 3.2.)

3.3 Spider

Spider ($16^{\circ} 44' S / 126^{\circ} 05' E$, Alter > 570 Ma) liegt in der südlichen Kimberley-Region im Nordwesten Australiens und fällt in Landsat-Daten vor allem durch eine radiale Anordnung einzelner Höhenrücken ins Auge (Abb. 3 a). Der Nachweis als Impaktstruktur geht auf HARMS et al. (1980) und SHOEMAKER & SHOEMAKER (1988, 1996) zurück. Das Targetmaterial besteht aus Sand- und Siltsteinen der paläoproterozoischen Kimberley Group. Impaktgesteine sind nicht erhalten, so dass von einer tiefen Erosion unterhalb des Kraterbodens ausgegangen werden muss. In der Umgebung des Kraters sind die Gesteine zu einer breiten Synklinale gefaltet. Wie am umlaufenden Streichen zu erkennen ist, taucht die Synklinalachse in östliche Richtung und verläuft nördlich der Spider-Struktur.

Der Krater zeigt einen komplexen strukturellen Aufbau (Abb. 3 b): Er liegt innerhalb einer strukturellen Senke mit einem Durchmesser von 11 - 13 km, die von Abschiebungen bzw. Flexuren begrenzt wird. Eine Schar von 20 Überschiebungen - zu erkennen an der Anordnung von Höhenrücken - breitet sich radial von einem gemeinsamen Zentrum aus. Die Deckenstapel sind entlang einer etwa NNW-gerichteten Achse bilateral symmetrisch angeordnet, die Transportrichtung ist generell von N nach S gerichtet. Die längsten Überschiebungsbahnen sind bis zu 3 km zu verfolgen. Das Zentrum der Struktur wird von einem strukturellen Dom mit einem Durchmesser von ca. 0.5×1 km eingenommen. Im S verläuft zwischen dem strukturellen Rand und dem Zentrum eine breit gespannte Antiklinale.

Den komplexen Überschiebungsbau erklären SHOEMAKER & SHOEMAKER (1996) durch einen niedrigen Einschlagwinkel des Projektils aus nördlicher bis nordwestlicher Richtung. Bedingt durch den schiefen Einschlag, glitten Gesteinsmassen an der Basis der transient cavity in südliche Richtung, bevor die Modifikationsphase mit der Bildung des central uplift einsetzte. Andere Überlegungen gehen von einer Bildung während der Modifikationsphase aus (KENKMANN 1999, ABELS 2001). Beim Kollaps der transient cavity kommt es zu einem konvergenten Massentransport und somit zu einer räumlichen Einengung, die durch Faltung und/oder Deckenstapelung ausgeglichen wird. Bildhaft ist der Überschiebungsbau im Kraterzentrum vergleichbar mit dem Schließen einer Irisblende, während Faltungen dem Heben eines Tischtuchs entsprechen. Im Falle von Spider erklärt dies hingegen nicht den im Gelände zu beobachtenden, fast ausschließlich nach S gerichteten Deckentransport. ABELS (2001) geht daher davon aus, dass die Kratergenese durch die bereits existierende, durch den Synklinalbau bestimmte Morphologie beeinflusst wurde: Ein höheres Relief im Norden führte hier zu einem vergleichsweise stärkeren Kollaps als im S des Kraters.

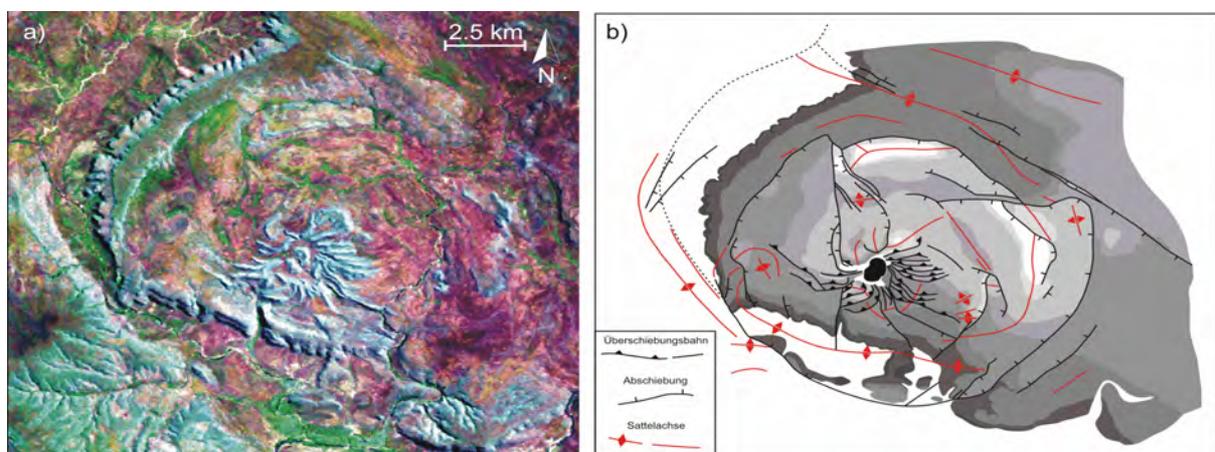


Abb. 3: (a) Die Spider-Struktur (Landsat TM 741 [rgb]). (b) Vereinfachte geologische Karte und strukturelle Elemente des Kraters nach ABELS (2001) und SHOEMAKER & SHOEMAKER (1996). Das Alter lithologischer Einheiten ist durch Grauabstufungen gekennzeichnet. Schwarz entspricht der ältesten Einheit, weiß alluvialen Ablagerungen.

3.4 Gosses Bluff

Gosses Bluff im Northern Territory Australiens ($23^{\circ} 50' S / 132^{\circ} 19' E$, Alter 142.4 ± 0.5 Ma nach MILTON et al., 1996 a) liegt in der ariden Halbwüstenregion der Missionary Plain zwischen den Faltengebirgen der McDonnell Ranges im N und der James Ranges im S (Abb. 4 a). Die Targetgesteine bestehen aus steil aufgerichteten siliziklastischen Sedimentgesteinen. Der Impaktkrater ist auf ein Niveau unterhalb des Kraterbodens erodiert. In der ansonsten ebenen Landschaft hebt sich morphologisch ein polygonaler Ring aus Sandsteinen mit Höhen um 250 m und einem Durchmesser von 4.5 km ab. Die Berge bestehen aus verwitterungsresistenten Sandsteinen, die innerhalb des central uplift strukturell emporgehoben und durch Erosion herauspräpariert wurden. Nach MILTON et al. (1996 a) werden die Sandsteineinheiten vom Zentrum (Ordovizium) nach außen hin (Devon/Karbon) stetig jünger. Anhand von allochthonen Impaktbrekzien, die stellenweise erhalten sind, und durch Funde von shatter cones wurde Gosses Bluff von MILTON et al. (1972) als Meteoritenkrater nachgewiesen. Im Umkreis des Höhenrückens sind oberflächliche Calcrete-Bildungen verbreitet. Sie weisen auf eine erhöhte Porosität des Untergrundes hin, die nach PRINZ (1996) durch eine stärkere Brüchigkeit des schockmetamorph beanspruchten Targetmaterials zu erklären ist. In Landsat-Daten zeigen die Calcrete-Bildungen in einer Entfernung von bis zu 6 km vom Kraterzentrum eine homogene Spektralfarbe. Kleinere, isolierte Hügel in der weiteren Umgebung der Struktur beeinflussen das Drainagenetz in einem Umkreis von 20 bis 22 km. Dies ist auch der ursprüngliche Durchmesser, der für Gosses Bluff angenommen wird, zumal er mit Resultaten aus geophysikalischen Messungen gut korreliert (MILTON et al. 1996 b).

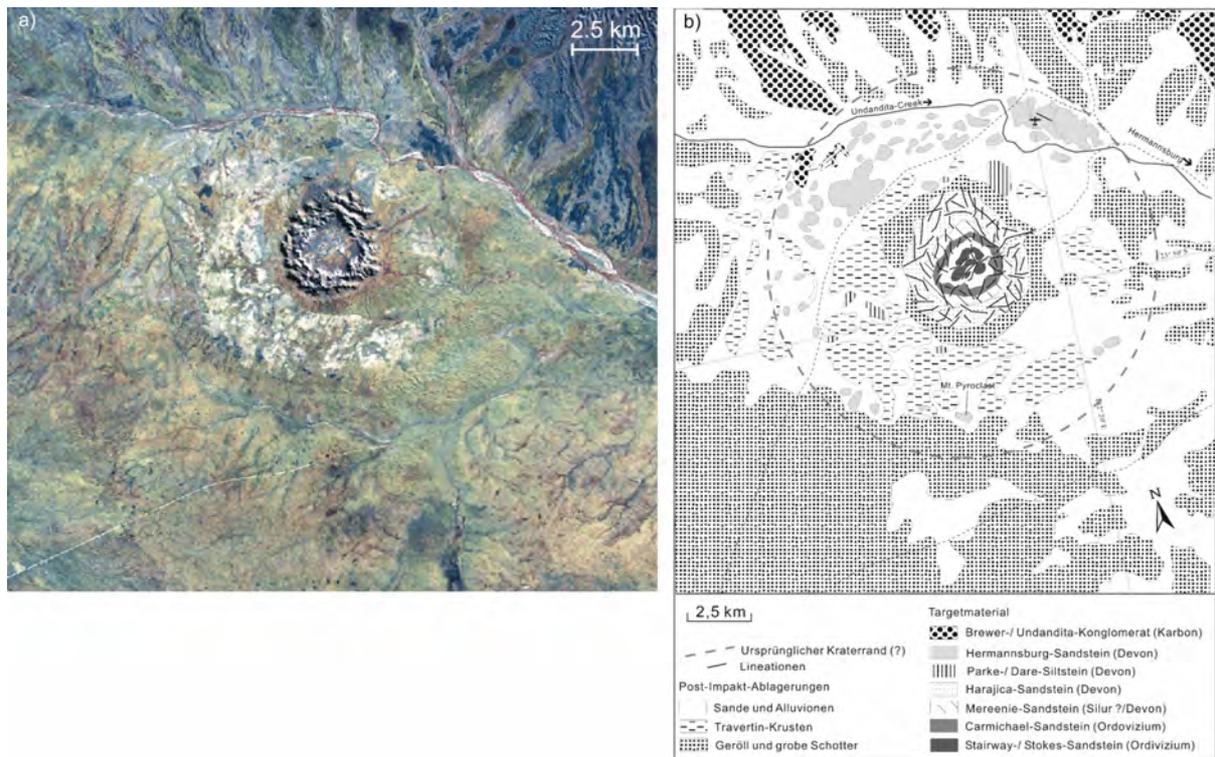


Abb. 4: (a) Der Krater Gosses Bluff (Landsat TM 432 [rgb]) zeigt einen morphologisch herauspräparierten central uplift und einen durch helle Calcrete-Bildungen zu verfolgenden äußeren Ring. (c) Vereinfachte geologische Übersichtskarte des Kraters nach Geländebefunden und multispektraler Bildanalyse (PRINZ 1996).

3.5 Aorounga

Aorounga liegt in der Sahara-Region Borkou im nördlichen Tschad ($19^{\circ} 06' N / 19^{\circ} 15' E$) und besitzt einen Durchmesser von ca. 17 km. Eine Deutung der Struktur als Impaktkrater wurde relativ früh für möglich gehalten. Da Aorounga nahe dem vulkanischen Tibesti-Massiv und südöstlich des Emi Kouss-Vulkangebietes liegt, wurde ein vulkanischer (GRIEVE et al. 1988) bzw. plutonischer (ROLAND 1976) Ursprung lange Zeit favorisiert. Funde von shatter cones und schockmetamorphe mikroskopische Anzeichen belegen, dass es sich um einen Meteoritenkrater handelt (BECQ-GIRAUDON et al. 1992, KOEBERL 1998). Der Krater wurde bisher nicht datiert, muss jedoch jünger als das Targetmaterial aus oberdevonischen Sedimentgesteinen sein. In Landsat-Daten ist Aorounga anhand von mehreren konzentrischen Ringen mit unterschiedlicher Spektralfarbe bzw. Grauton zu erkennen (Abb. 5 a). Aufgrund der vorherrschenden SW-NE-Windrichtung haben sich in der ariden Region lineare Sandsteinrücken (Yardangs) gebildet, die Längen von mehr als 10 km erreichen. Sie erscheinen in den Kanälen des sichtbaren und infraroten Bereichs dunkel und werden von hellen, schmalen Tälern getrennt, in denen äolische Dünensande akkumulieren. Der im thermalen Bereich des Infrarots aufzeichnende Landsat-Kanal 6 ist von den äolischen Ablagerungen weniger beeinflusst und zeigt die Kratermorphologie sehr deutlich (Abb. 5 b). Die Struktur lässt sich in (1) eine massive zentrale, dunkle Erhebung, (2) einen inneren Ringgraben, (3) einen dunklen Ringwall, (4) einen breiteren, mit äolischen Sanden verfüllten, helleren äußeren Ringgraben und (5) einen äußeren Ringwall gliedern, der auch als ursprünglicher Durchmesser interpretiert wird. Luftbildinterpretationen zeigen, dass Sandsteine des inneren und äußeren Ringwalls mit konzentrischer Anordnung des Streichens zum Teil nach innen, zum Teil nach außen einfallen (ROLAND 1976). In der Umgebung der Struktur lagern die Schichten hingegen nahezu sählig. Die Ausbildung mehrerer konzentrischer Ringe könnte eine Folge der unterschiedlichen Verwitterungsanfälligkeiten der Targetgesteine sein, allerdings steht die Kratermorphologie in guter Übereinstimmung mit einem wenig erodierten central-peak-basin, dass sich trotz des geringen Kraterdurchmessers in einem sedimentärem Material entwickelt hat.

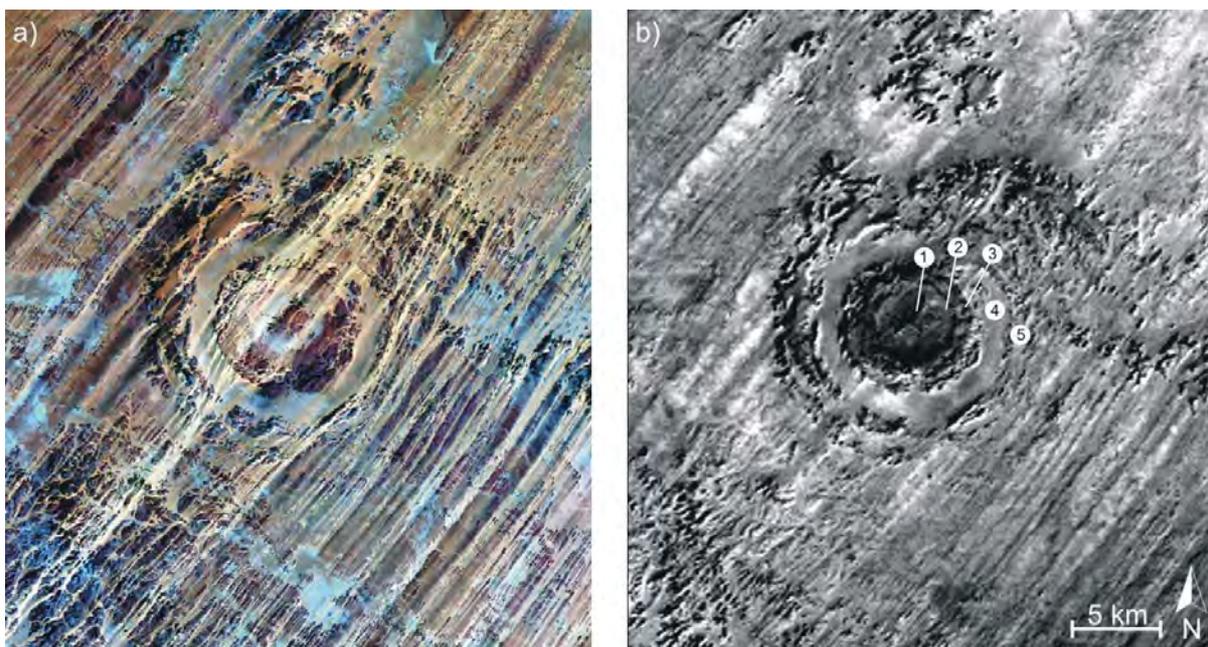


Abb.5: (a) Landsat TM 741 (rgb) des Aorounga-Kraters. (b) Der Thermalkanal des Landsat TM 6 zeigt die Kratermorphologie ohne seine Überlagerung mit äolischen Dünenzügen.

3.6 Araguainha

Der Araguainha-Krater liegt im tropischen Zentral-Brasilien (Region Mato Grosso, 16° 46' S / 52° 59' W) und besitzt einen Durchmesser von 40 km. DEUTSCH et al. (1992) datieren den Einschlag auf das Obere Perm. Das Targetmaterial besteht aus einer ca. 1800 m mächtigen, subhorizontal gelagerten Abfolge aus paläozoischen Sedimentgesteinen sowie dem unterlagernden kristallinen Grundgebirge des Brasilianischen Schildes. Araguainha setzt sich morphologisch als flaches, ringförmiges Becken innerhalb einer Schichtstufenlandschaft ab, das sich nach THEILEN-WILLIGE (1982) weiter untergliedert: Den Kern der Struktur (1 in Abb. 6 a) bildet ein zentrales Hochgebiet, das in eine innere Senke (ca. 550 m ü. NN) und einen Hügelring (bis 700 m ü. NN) unterteilt werden kann und einen Gesamtdurchmesser von 7 bis 8 km besitzt. Nach außen schließt sich ein 1,5 bis 4 km breiter, flach gewellter Niedergürtel (2) mit Höhen um 480 m ü. Meeresspiegel an. Ihm folgt ein 8 bis 12 km breiter äußerer Bereich (3), der durch eine lebhaft Morphologie aus Tafelbergen, zusammenhängenden Höhenrücken und Schichtkämmen mit Höhen zwischen 500 und 700 m gekennzeichnet ist. Der Kraterrand (4) besteht aus einem radial verlaufenden Grabensystem mit 0,5 bis 2,5 km Breite und wird von einem System konzentrischer Brüche begrenzt.

Von besonderer Bedeutung für die Erkennbarkeit des Kraters in den TM-Daten ist die Vegetation in Form der savannenartigen campos cerrados, einem Wechsel von Grasland, lichtigem Wald und Buschland sowie dichten Galeriewäldern entlang von Flüssen (BISCHOFF & PRINZ 1994). Anhand der vorherrschenden Pflanzenvergesellschaftungen lässt sich die radiale Abfolge des paläozoischen Targetmaterials und der strukturelle Aufbau des Kraters sehr gut ableiten (s. BISCHOFF & PRINZ 1994 und Abb. 6 b).

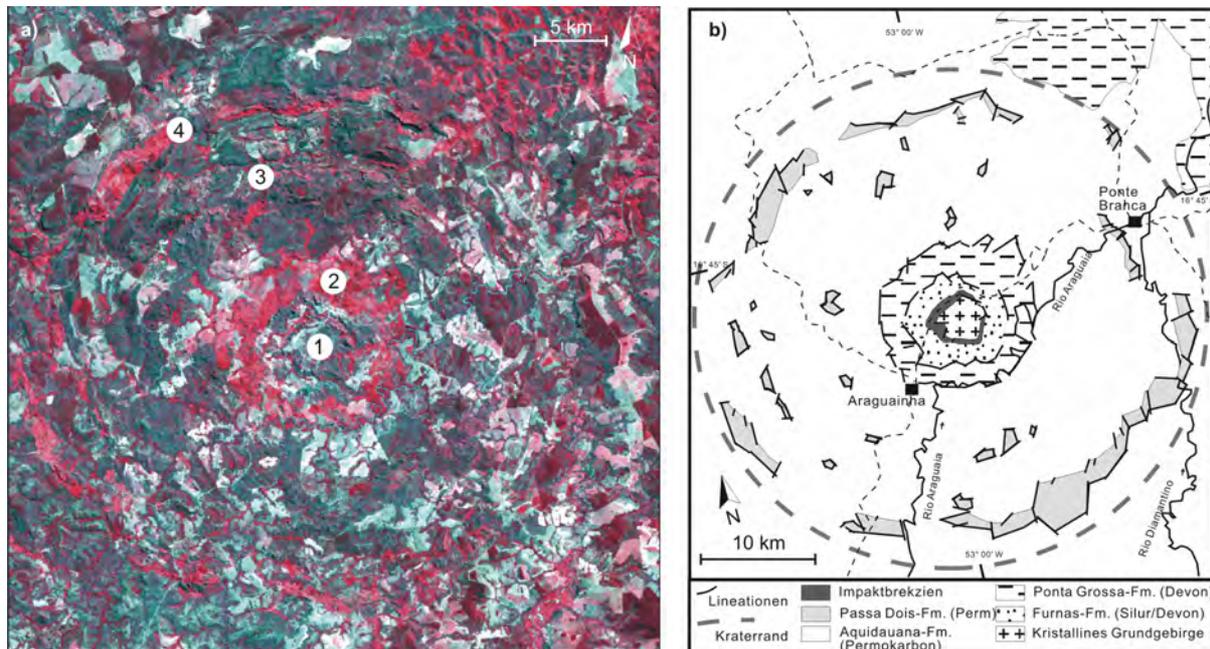


Abb. 6: (a) In Farbinfrarotbildern wie der Landsat TM-Kanalkombination 432 (rgb) des Araguainha-Kraters lassen sich die Targetlithologien des Kraterinneren und der äußeren Terrassenzone sehr gut identifizieren. (b) Vereinfachte geologische Übersichtskarte des Araguainha-Kraters nach Geländebefunden und multispektraler Bildanalyse (BISCHOFF & PRINZ 1994).

4 Schlussfolgerungen und Ausblick

Die Verteilung der heute bekannten Impaktkrater auf den einzelnen Kontinenten ist sehr ungleich (s. WHITEHEAD & SPRAY 2003): Dort, wo die klimatischen und regionalgeologischen Bedingungen günstig sind bzw. intensive Forschungsprogramme nach Meteoritenkratern seit Jahrzehnten betrieben werden, sind entsprechend viele Strukturen bekannt. So ist die Entdeckung neuer, großer Strukturen in Nordamerika oder Australien wenig wahrscheinlich. Auf der anderen Seite ist die Kraterdichte in den tropischen Regionen Afrikas und Südamerikas und in den wenig zugänglichen Regionen Asiens relativ gering. Prinzipiell stellt sich die Frage, ob die Suche nach neuen Strukturen mit herkömmlichen optischen Satellitenbilddaten nach ihrer jahrzehntelangen Anwendung noch Aussicht auf weitere Erfolge hat. Nach vorsichtigen Abschätzungen aus der Beobachtung heutiger erdnaheer Asteroiden und Kometen (SHOEMAKER et al. 1994) liegen die terrestrischen Einschlagsraten bei $5.9 \pm 3.5 \times 10^{-15} \text{ km}^2 / \text{a}$ für Krater mit einem Durchmesser von $> 20 \text{ km}$. Berücksichtigt man nur Einschläge in phanerozoischer Zeit ($< 590 \text{ Ma}$), so sind bei einer Fläche von der Größe Nordamerikas (22 Mio. km^2) zwischen 30 und 120 Krater zu erwarten. Derzeit sind nur 15 phanerozoische Strukturen mit einem Durchmesser $> 20 \text{ km}$ bekannt, von denen sich 5 unter jüngeren Deckschichten befinden und in Satellitenbildern nicht zu erkennen sind. Somit ergibt sich für den gut untersuchten nordamerikanischen Kontinent, dass zwischen 8 und 30 Prozent der phanerozoischen Krater fernerkundlich identifiziert werden können, wohingegen die übrigen Strukturen entweder erodiert sind, unter Sedimentbedeckung stehen oder aufgrund der eingangs erwähnten limitierenden Faktoren nicht zu erkennen sind.

Auf der Landfläche Afrikas (30.3 Mio. km^2) sind bei einer analogen Abschätzung zwischen 42 und 168 phanerozoische Krater mit $D > 20 \text{ km}$ zu erwarten. Bisher ist nur eine Struktur (Morokweng) nachgewiesen, die zudem unter jüngerer Bedeckung verborgen ist. Legt man hier die ungünstigste Erwartung der Erkennbarkeit von Kratern mit Satellitenbildern zu Grunde, so sollten drei bis vier weitere Strukturen $> 20 \text{ km}$ zu finden sein. In der gleichen Größenordnung liegt die Wahrscheinlichkeit, auf dem südamerikanischen Kontinent entsprechend große Krater neu zu entdecken. Größere Chancen - auch in gut untersuchten Gebieten - bestehen, kleinere Meteoritenkrater mit einem Durchmesser $< 20 \text{ km}$, die statistisch häufiger auftreten, zu finden. Multispektrale Sensoren wie ASTER oder SPOT 5 erlauben mit ihrer im Vergleich zu Landsat verbesserten räumlichen Auflösung eine genauere Beobachtung kleinerer ringförmiger geologischer Anomalien.

Zunehmende Bedeutung erlangt außerdem die Verknüpfung optischer Satellitenbilddaten mit anderen, komplementären Geodaten. So können beispielsweise stark veränderte oder morphologisch eingerpumpte Krater mit Hilfe genauer digitaler Höhenmodelle visualisiert werden.

Neben Radardaten (z.B. ERS, Radarsat) zur Erfassung heutiger Kratermorphologien stellen vor allem geophysikalische Datensätze wichtige Quellen dar, die in Geoinformationssystemen in die Analyse von Impaktstrukturen integriert werden. Aeroradiometrische Daten (airborne gamma ray), in denen der Zerfall der Isotope ^{40}K , ^{232}Th , ^{235}U bzw. ^{238}U aufgezeichnet wird, sind weniger von oberflächlichen Reflexionseigenschaften beeinflusst und zeichnen Signale aus einer Tiefe von bis zu 30 bis 40 cm auf. Sie stellen somit einen ergänzenden Datensatz dar, um die Gesteinsverbreitung von Impaktlithologien und dem Targetmaterial unter geringer Verwitterungsbedeckung zu erfassen. Zur Analyse von Impaktsignaturen in tieferen Erdstockwerken finden geophysikalische Daten wie Aeromagnetik, Seismik oder Schweremessungen Anwendung. Abb. 7 zeigt exemplarisch die Impaktsignaturen des Kraters Strangways im Norden Australiens in unterschiedlichen Geodaten. Gleichzeitig ermöglicht die GIS-Analyse auch die Einbindung von Geländebeobachtungen und einen direkten Ver-

gleich mit fernerkundlichen Interpretationen. Im Fall von Impaktstrukturen in marinen Räumen, die in den letzten Jahren zunehmend in den Mittelpunkt der Impaktforschung gerückt sind, stützt sich die fernerkundliche Analyse ausschließlich auf geophysikalische Methoden.

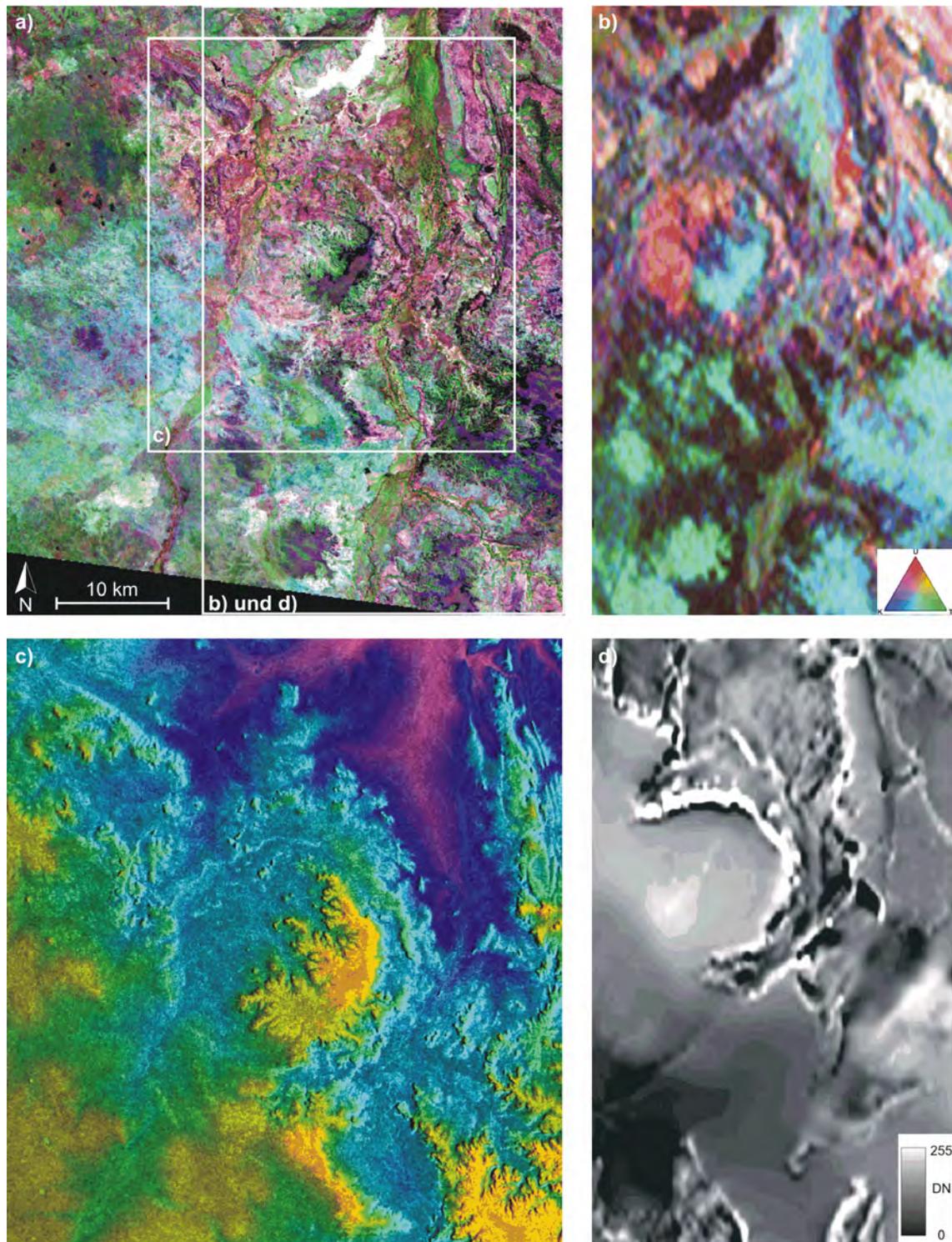


Abb. 7: Die Strangways-Struktur in Nord-Australien in unterschiedlichen Fernerkundungsdaten: (a) Landsat TM 543 (rgb) (b) Aeroradiometrie K, Th, U (rgb) (c) ERS-SAR in Kombination mit einem digitalem Höhenmodell und (d) Aeromagnetik mit niedriger (schwarz) bis hoher (hell) magnetischer Intensität.

Trotz Weiterentwicklungen hinsichtlich der räumlichen, spektralen und radiometrischen Auflösung heutiger Satellitensensoren und der Nutzung komplementärer Daten sind der fernkundlichen Untersuchung von Impakten weiterhin Grenzen gesetzt. Problematisch gestaltet sich vor allem die Identifikation von schockmetamorph veränderten Lithologien anhand ihrer spektralen Muster. Die Reflexionseigenschaften von stark geschockten Impaktlithologien wie allogenen Brekzien, Auswurfdecken und Impaktiten mit Schmelzanteil sollten sich aufgrund der fundamentalen kristallographischen Veränderungen oder durch ihre unterschiedliche Verwitterungsanfälligkeiten gegenüber dem weniger geschockten Targetmaterial unterscheiden. Untersuchungen an Sandsteinen des Meteor Crater durch GARVIN et al. (1992) zeigen, dass durch die Schockmetamorphose eine bei ungeschocktem Material distinktive Absorptionsbande bei 9.2 μm stark abgeschwächt wird. Obwohl Hyperspektralsensoren oder der ASTER-Sensor diesen Wellenlängenbereich aufzeichnen, fehlen bisher Beispiele einer erfolgreichen Anwendung. Ansätze, chemische Spuren des Impaktors wie Anreicherungen an Pt-Elementen in den Gesteinen festzustellen, scheitern bisher an den fehlenden technischen Möglichkeiten, diese Elemente mit Fernerkundungsmethoden nachzuweisen. Somit werden die Fernerkundungsanalyse unterstützende Geländearbeiten zur eindeutigen Identifikation und Analyse des strukturellen Aufbaus von Meteoritenkratern auch weiterhin eine zentrale Rolle in der Impaktforschung einnehmen.

5 Literaturverzeichnis

- ABELS, A., 2001: Integrated remote sensing of the Spider impact structure, Australia - potential effects of the morphostructural setting on cratering (abstract).- Lunar Planet. Sci. **32**, # 1408, Lunar and Planetary Institute, Houston, Texas, USA (CD-Rom).
- BISCHOFF, L., PRINZ, T., 1994: Der Araguinha-Krater in Brasilien. Das geologische Bild einer großen Impaktstruktur nach Geländebefunden und Satellitenbildanalyse.- Die Geowissenschaften, **12**: 354-360.
- BECQ-GIRAUDON, J.F., ROUZEAU, O., GOACHET, E., SOLAGES, S., 1992: Impact hyperveloce d'une meteorite geante a l'origine de la depression circulaire d'Aorounga au Tchad (Afrique).- Comptes Rendus de l'Academie des Sciences, Ser. 2, **315**: 83-88.
- DEUTSCH, A., BUHL, D., LANGENHORST, F., 1992: On the significance of crater ages: new ages for Dellen (Sweden) and Araguinha (Brazil).- Tectonophys. **216**: 205-218.
- FRENCH, B.M., 1998: Traces of Catastrophe. A Handbook of Shock-Metamorphic Effects in Terrestrial Meteorite Impact Structures.- 120 S., LPI Contribution 954; Houston. (Lunar Planet. Institute).
- FUDALI, R.F., 1973: Roter Kamm: Evidence for an impact origin.- Meteoritics **8**: 245-257.
- GARVIN, J.B., SCHNETZLER, C.C. GRIEVE, R.A.F., 1992: Characteristics of large impact structures as revealed by remote sensing studies.- Tectonophys. **216**: 45-62.
- GLCF, 2003: Global Land Cover Facility: <http://glcf.umiacs.umd.edu/index.shtml>
- GRIEVE, R.A.F., WOOD, C.A., GARVIN, J.B., MCLAUGHLIN, G., MCHONE, J.F., 1988: Astronaut's Guide to Terrestrial Impact Craters.- 89 S., LPI Technical Supports 88-03, Lunar and Planetary Institute, Houston, Texas, USA.
- GRIEVE, R.A.F., PILKINGTON, M., 1996: The signature of terrestrial impacts.- AGSO J. Austral. Geol. and Geophys., **16**: 399-420.
- HARMS, J.E., MILTON, D.J., FERGUSON, J., GILBERT, D.J., HARRIS, W.K., GOLEBY, B., 1980: Goat Paddock cryptoexplosion crater, Western Australia.- Nature **286**: 704-706.
- JACKSON, M.P.A., SCHULTZ-ELA, D.D., HUDSON, A., WATSON, A., PORTER, M.L., 1998: Structure and evolution of Upheaval Dome: A pitched-off salt-diapir.- Geol. Soc. Am. Bull. **116**: 1547-1573.
- KENKMANN, T., 1999: Folding within seconds.- Geology **30** (3): 231 - 234.

- KOEBERL, C., HARTUNG, J.B., KUNK, M.J., KLEIN, J., MATSUDA, J.I., NAGAO, K., REIMOLD, W.U., STORZER, D., 1993: The age of the Roter Kamm impact crater, Namibia: Constraints from ^{40}Ar - ^{39}Ar , K-Ar, Rb-Sr, fission track and ^{10}Be - ^{26}Al studies.- *Meteoritics* **28**: 204 - 212.
- KOEBERL, C., REIMOLD, W.U., VINCENT, P.M., BRANDT, D., 1998: Aorounga and Gweni Fada impact structures, Chad, central Africa: Petrology and geochemistry of target rocks (abstract).- *Lunar Planet Sci* **29**, # 1103, Lunar and Planetary Institute, Houston, Texas, USA (CD-Rom).
- KRIENS, B.J., SHOEMAKER, E.M., HERKENHOFF, K.E., 1999: Geology of the Upheaval Dome impact structure, southeast Utah.- *J. Geophys. Res.* **104**: 18867 - 18887.
- MELOSH, H. J. (1989): *Impact Cratering. A Geologic Process.*- 245 S.; New York, Oxford (Oxford University Press).
- MILTON, D. J.; BARLOW, B. C.; BRETT, ROBIN; BROWN, A. Y.; GLIKSON, A. Y.; MANWARING, E. A.; MOSS, F. J.; SEDMIK, E. C. E.; VAN SON, J.; YOUNG, G. A., 1972: Gosses Bluff Impact Structure, Australia.- *Science* **175**: 1199-1207
- MILTON, D.J., GLIKSON, A.Y., BRETT, R., 1996 a: Gosses Bluff - a latest Jurassic impact structure, central Australia. Part 1: geological structure, stratigraphy, and origin. - *AGSO J. Austral. Geol. Geophys.*, **16**: 453-486.
- MILTON, D.J., BARLOW, B.C., BROWN, A.R., MOSS, F.J., MANWARING, E.A., SEDMIK, E.C.E., YOUNG, G.A., VAN SON, J., 1996 b: Gosses Bluff - a latest Jurassic impact structure, central Australia. Part 2: seismic, magnetic, and gravity studies.- *AGSO J. Austral. Geol. Geophys.* **16**: 487-527.
- MORGAN, J.V., WARNER, M.R., 1999: Chicxulub: The third dimension of a multi-ring impact basin.- *Geology* **27**: 407-410.
- PRINZ, T., 1996: Multispectral remote sensing of the Gosses Bluff impact crater, central Australia by using Landsat-TM and ERS-1 data.- *J. Photogramm. Remote Sens.*, **51**: 137-149.
- REIMOLD, W.U., MILLER R. MCG., 1989: The Roter Kamm impact crater, SWA/Namibia.- *Pro. Lunar Planet Sci. Conf.*, **19**: 711-732.
- REIMOLD, W.U., KOEBERL, C., BISHOP, J., 1994: Roter Kamm impact crater: Geochemistry of basement rocks and breccias.- *Geochim. Cosmochim. Acta* **58**: 2689 - 2710.
- REIMOLD, W.U., KOEBERL, C., BRANDT, D., 1997: Suevite at the Roter Kamm impact crater, Namibia.- *Meteoritics and Planetary Science*, **32**: 431 - 437.
- ROLAND, N.W., 1976: Die Ringstruktur Aorounga (Borkou, Süd-Sahara).- *Geologisches Jahrbuch* **33**: 117-131.
- SHOEMAKER, E.M., SHOEMAKER, C.S., 1988: Impact Structures of Australia.- 19th Lunar and Planet. Sci. Conf. Abstracts: 1079-1080, Houston.
- SHOEMAKER, E.M., WEISSMAN, P.R., SHOEMAKER, C.S., 1994: The flux of periodic comets near Earth. In: Gehrels, T. (Ed.) Hazards due to comets and asteroids.- University of Arizona Press, Tucson, Arizona, S. 313 - 335.
- SHOEMAKER, E. M., SHOEMAKER, C.S., 1996: The Proterozoic impact record of Australia.- *AGSO J. Austral. Geol. Geophys.*, **16**: 379-398.
- THEILEN-WILLIGE, B. (1982) The Araguinha astrobleme/Central Brazil.- *Geol. Rd.* **71**: 318 - 327.
- WHITEHEAD, J., SPRAY, J. (2003): Earth Impact Database:
<http://www.unb.ca/passc/ImpactDatabase/>

Das geostrukurelle Inventar zwischen Arunta Block und Amadeus Basin (Zentralaustralien): Digitale Fernerkundungsanalysen und Geländebefunde im Kontaktbereich intrakratoner Blöcke

SILKE BUDE¹ & TORSTEN PRINZ²

Zusammenfassung: Im Rahmen einer detaillierten Neukartierung ausgewählter Testgebiete innerhalb des proterozoischen Arunta Blockes und des jüngeren, altpaläozoischen Amadeus Basins wurde die Geologie und Tektonik zweier benachbarter, unterschiedlicher intrakratoner Blöcke entlang ihrer gemeinsamen, kritischen Kontaktzone mittels Luftbildern, Landsat-TM, ASTER und ERS-1 Daten neu erfasst. Beide strukturellen Großräume zeichnen sich durch eigenständige lithologische Abfolgen und tektonische Deformationstypen aus. Ihre geologische Interpretation kann mittels moderner digitaler Fernerkundungsdaten, Geländemodelle und Geländebefunde über weite Teile ansonsten unzugänglicher Areale im Kontext einer gesamtheitlichen intrakratonen Genese erfolgen. Der tektonische Bau der unmittelbaren Kontaktzone beider Blöcke wird seit Jahren kontrovers diskutiert und reicht von hypothetischen weitreichenden Überschiebungsdecken (nappes) bis hin zu einfachen kleindimensionierten Störungen/Verschleppungen (thrusts). Die antreibende Kinematik ist nach wie vor unklar. Unsere Beobachtungen aus multispektraler und weiterverarbeitender Datenanalyse erlaubt die Differenzierung unterschiedlicher Gesteinseinheiten und ihres Deformationsstiles in jeweils repräsentativen Untersuchungsräumen sowie deren Interpolation auf benachbarte Gebiete. Zudem wurde auf der Basis einer topographische Karten und stereoskopischer ASTER-Satellitendaten ein digitales Höhenmodell der Region erstellt, welches den Zusammenhang zwischen morphologischer Gegebenheiten vor Ort und im Satellitenbild im Hinblick auf die Verbreitung von Lithologien und Störungszonen verdeutlicht. Das so erfasste geostrukurelle Inventar deutet auf ein komplexes tektonisches Spannungsfeld hin, indem zeitlich voneinander getrennte strukturelle Ereignisse für jeden einzelnen intrakratonen Block prägend waren und z.T. voneinander entkoppelt wirkten. Gemeinschaftlich anzutreffende Strukturen beschränken sich auf einen engen Kontaktsaum entlang beider Blöcke unter Bildung bruchhaft zerscherter Parametamorphite.

1 Einleitung

Die geologische Geschichte Australiens reicht mit seinen stabilen Kratonen und Blöcken bis etwa 4,15 Ga zurück und ist deshalb fast annähernd so alt wie die der Erde selbst. Belegt wird dieses hohe Alter durch Zirkone von Mt. Narryer A, W.A. (vgl. KRONER, 1981), welche sich in Sandsteinen befinden, die selbst das beachtliche Alter von 3,65 Ga besitzen und einst als fluviatile Sedimente auf einem älteren granitoiden Basement (Kraton) abgelagert wurden.

¹Diplom-Geol. Silke Bude, Geologisch-Paläontologisches Institut, WWU-Münster, Corrensstr. 24, 48149 Münster, e-mail: bude@uni-muenster.de

²Dr. Torsten Prinz, IVV Geowissenschaften, WWU-Münster, Robert-Koch-Str. 26-28, 48157 Münster, e-mail: prinz@uni-muenster.de

Dieses Wechselspiel aus meist kristallinen, sehr alten Kratonen und umlagernden nur wenige hundert Millionen Jahre jüngeren Gesteinen, die meist als flachmarine Sedimente oder z.T. als Vulkanite anzusprechen sind, ist typisch für den geologischen Bau des fünften Kontinentes. Heute weisen die jüngeren Gesteine oft einen (teil-) metamorphen Charakter auf und werden deshalb zu den sog. *metamorphic belts* gerechnet. Aufgrund der frühen plattentektonischen Isolierung Australiens in Verbindung mit weitgehender tektonischer Ruhe in jüngeren Epochen lassen sich diese alten Baueinheiten und ihre interne Verzahnung vor Ort aber auch in Fernerkundungsdaten besonders gut studieren. Viele dieser Kratone sind heute in West- und Zentralaustralien in nur schwer zugänglichen Gebieten aufgeschlossen, die sich darüber hinaus noch durch die extremen klimatischen Bedingungen des sog. *outback* auszeichnen. Der Einsatz moderner digitaler Fernerkundungsmöglichkeiten in Kombination mit stichprobenafter geologischer Geländeprüfung ist deshalb für ihre weitere Untersuchung sinnvoll. Im Folgenden wird der lithologisch-strukturelle Bau einer interkratonen Grenzregion zwischen dem proterozoischen Arunta Block im Norden (ca. 1 Ga) und dem altpaläozoischen Amadeus Basin im Süden (Kambrium bis z.T. Devon) als Bestandteile der *central cratons* in den nördlichen Territorien beleuchtet.

1.1 Geographischer Überblick

Das Untersuchungsgebiet befindet sich ca. 180 km WSW' von Alice Springs im Zentrum Australiens (etwa bei 23°49'S und 132°19'E). Es beinhaltet in seinem zentralen Teil die halbwüstenhafte Missionary Plain (Abb. 1). Im Norden wird die Region durch die E-W streichenden MacDonnell Ranges, im Süden durch die ebenfalls E-W streichenden Krichauff, Petermann, Gardiner sowie James-Ranges begrenzt. Inmitten der südlich gelegenen Faltengebirgslandschaft befindet sich das bemerkenswerte Palm Valley, in dessen geschützten Senken sich trotz wüstenhafter Umgebung die namensgebenden Baumfarne (Cykadeen) seit dem Tertiär endemisch überdauern haben. Die durchschnittliche Höhe über Meeresspiegel liegt zwischen 600 und 800m, die in Kammlagen noch um etwa 300m überragt wird. Im nördlichen Grenzgebiet steigen die Ausläufer der Missionary Plain langsam zu den MacDonnell Ranges an, welche im Gegensatz zu den südlich gelegenen Mittelgebirgszügen eine eher raue, zerklüftete Morphologie ausbilden. Innerhalb der Ebene selber befindet sich die ca. 23 km weite Meteoriteneinschlagsstruktur (Impaktkrater) Gosses Bluff, die morphologisch durch einen zentralen Kraterring von etwa 4,5km Durchmesser deutlich hervortritt (GLIKSON, 1969, PRINZ, 1996). Zentrale Vorfluter des Untersuchungsraumes sind die nur während der Regenzeit sporadisch wasserführenden Finke River, Undandita und Palmer Creek. Die einzige größere Ansiedlung von Menschen stellt die alte deutsch-lutherische Missionsstation Hermannsburg an der Ostgrenze des Untersuchungsraumes dar.

1.2 Geologischer Überblick

Aus regionalgeologischer Sicht umfasst der südliche Untersuchungsraum stark verfaltete, kambrische bis karbone, flachmarine bis kontinentale Sedimente, die innerhalb eines ehemals intrakratonen Saummeeres zwischen einem südlichen (Musgrave Block) und nördlichen Kraton (Arunta Block) abgelagert wurden. Ein Teil dieses ehemalige Meeresbeckens wird heute als Amadeus Basin bezeichnet, dessen Sedimentfüllung (meist Sandsteine) bis zu 8000m Mächtigkeit erlangen können (PREISS & FORBES, 1981). Seine strukturelle Nordgrenze bilden die E-W streichenden MacDonnell Ranges, in der eine tektonische Sutur zum jungproterozoischen Arunta Block verborgen ist (Abb. 2.). Typischerweise handelt es sich innerhalb des nördlichen Kratons um ehemals magmatische und sedimentäre Gesteine die heute als Metamorphite (Amphibolit und Granulit-Fazies, vgl. MATHUR & SHAW, 1982) zu Tage treten. Das Metamorphosealter liegt bei ca. 0,9 Ga und stellt gleichzeitig den Stabilisie-

rungszeitpunkt des nun kontinentalen Blockes dar. Nach TEYSSIER (1985) und LINDSAY & KORSCH (1991) lässt sich

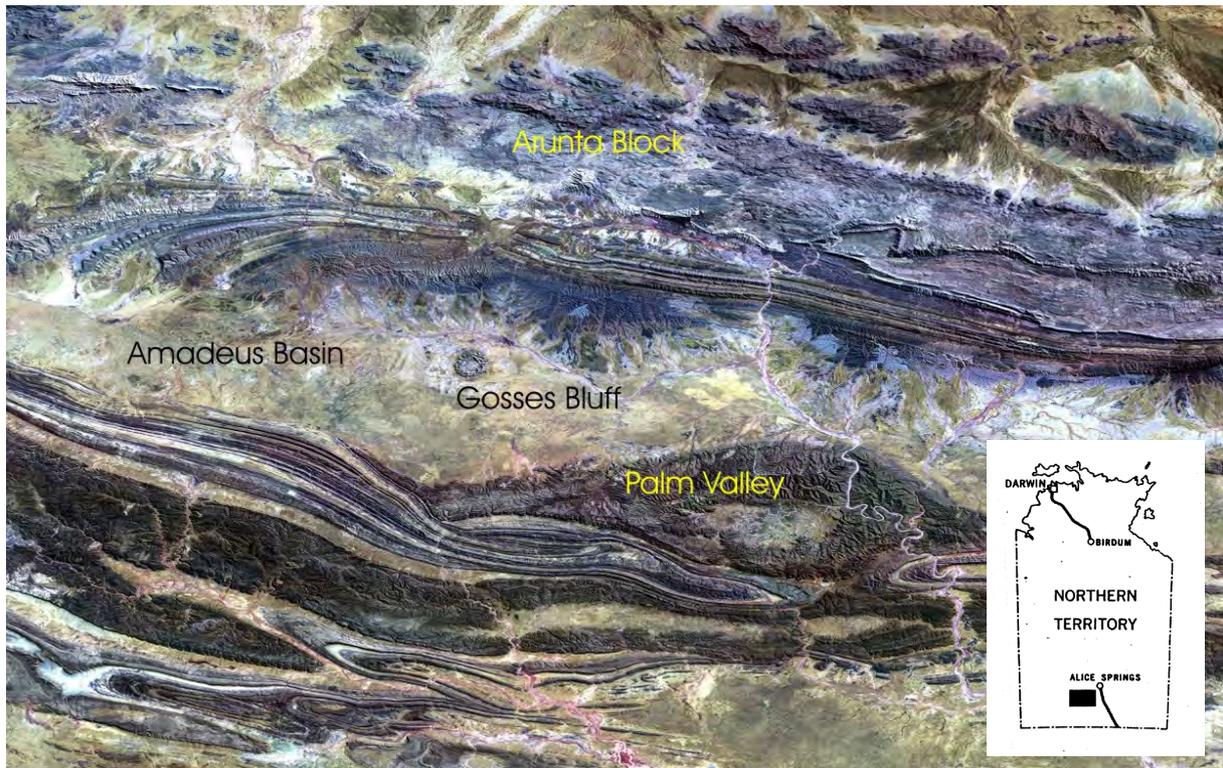


Abb. 1: Der Untersuchungsraum als Landsat TM IR-Falschfarbkomposite

das Amadeus Basin in zwei strukturelle Einzeltröge, die durch ein E-W streichendes Hochgebiet im Basement voneinander getrennt werden, gliedern:

- i) Im Süden die etwa 5km mächtigen jungproterozoischen Sedimentfolgen des Adelaideans, die durch die ca. 600 Ma alte *Petermann Tektogenese* an der Nordfront des sich südlich anschließenden Musgrave Blockes in große Überschiebungen und Falten gelegt wurden. Diskordanzen sind hier sehr häufig. Das ältere Grundgebirge fällt nach Süden hin ein und wird von mächtigen Molasseschüttungen bedeckt.
- ii) Im Norden wird das Grundgebirge von mächtigen paläozoischen Sequenzen (ca. 8km) ohne nennenswerte Winkeldiskordanz überlagert. Dieses E-W streichende nördliche Teilbecken ist das Bedeutendere von beiden Beckenzonen innerhalb des Amadeus Basin und besitzt eine Längserstreckung von fast 600km bzw. eine Breite von max. 150km. Das Einfallen des Grundgebirges ist hier nach Norden gerichtet, so dass im Hinblick auf i) eine Umkehrung der Lagerungsverhältnisse hinsichtlich der gleichen Basements stattfindet. Die kambrischen bis karbonen Sedimentfolgen sind während der *Alice Springs Tektogenese* (ca. 330-400 Ma) in enge Faltenzonen geworfen worden. Die Nordgrenze zum folgende Arunta Block wird durch zunehmend bruchhafte Deformation, syntektonische Molasseschüttungen und weitreichende Überschiebungen gekennzeichnet.

Die folgenden Untersuchungen beschränken sich auf den nördlich gelegenen Teiltrög und seiner strukturellen Grenze zum Arunta Block, da hier ein breit gefächertes tektonisches Inventar aufgeschlossen ist, welches in seiner Interaktion während der *Alice Springs Tektogenese* noch weitgehend unverstanden ist und viel spekulativen Raum lässt. Aufgrund

der großen räumlichen Ausdehnung ist die Einbeziehung von unterschiedlichen Fernerkundungsdaten unerlässlich.

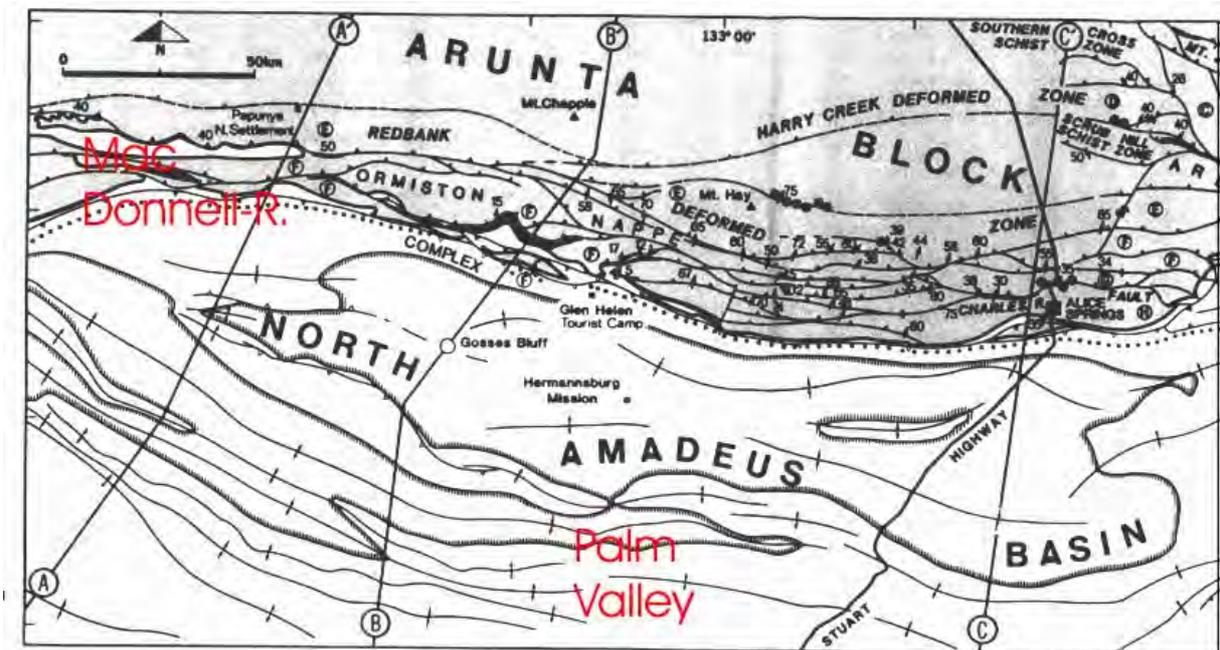


Abb. 2: Die intrakratonen tektonischen Grosseinheiten im Untersuchungsgebiet (modifiziert nach TEYSSIER, 1985)

2 Datengrundlage

Für die lithostrukturellen Untersuchungen standen folgende (Fernerkundungs-) Daten zur Verfügung (vgl. auch Abb. 3):

- Topographischen Karten 1: 100.000 bzw. 250.000
- DGM auf der Basis topographischer Karten (1: 100.000)
- S/W-Luftbilder 1: 25.000 und 1:80.000
- multispektrale Landsat TM Daten (28m/Pixel)
- ERS-1 Radardaten (10m/Pixel)
- multispektrale ASTER-Daten und Stereomodell (15m/Pixel)

Alle Datensätze wurde auf der Basis einer einheitlichen Geokodierung unter ERDAS Imagine und ArcGIS miteinander in Beziehungen gesetzt. Das aus den ASTER-Daten gewonnene Stereomodell bzw. das daraus generierte DGM erwies sich mit einer Gitterweite von ca. 100 Metern als zu grob, so dass ein aus den 1:100.000 topographischen Karten vektorisiertes DGM mit einer Gitterweite von ca. 30m herangezogen werden musste.

3 Datenverarbeitung

Nach den grundlegenden Bildverarbeitungsschritten (Streckung, Geokodierung etc.) wurden die Landsat-TM Daten zunächst auf ihren Korrelationsgrad innerhalb der einzelnen Kanäle untersucht. Es zeigte sich, dass innerhalb des VIS-Spektrums, aber auch des IR-Spektrums starke spektrale Korrelationen vorherrschen, aber über die Berechnung des OIF (PRINZ, 1996) dennoch eine geeignete Falschfarbkomposite aus den TM-Kanälen 3 (sichtbares Rot), 5 (mittleres IR) und 7 (mittleres IR) als Basis der multispektralen Interpretation erstellt werden

konnte. Diese TM-Kanäle sind meist weniger korreliert und weisen zusätzlich einen hohen Kontrastreichtum auf, so dass sie eine Vielzahl an lithologischen Details erkennen lassen.

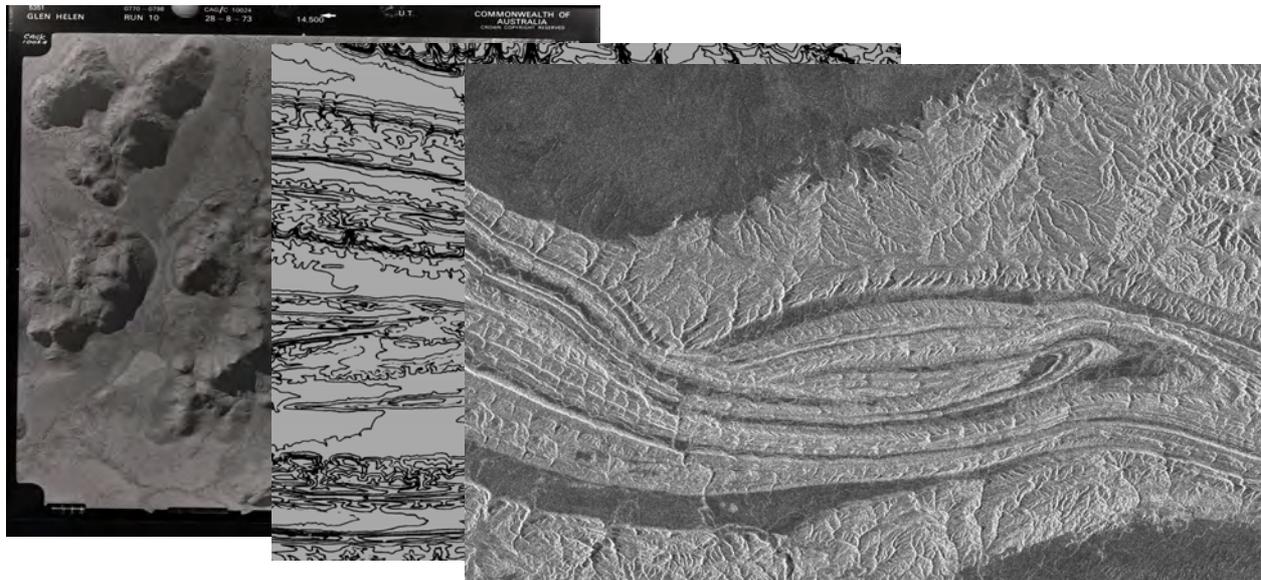


Abb. 3: Die unterschiedliche Datengrundlage am Beispiel von Luft-, Karten- und ERS- Bild (v.l.n.r.)

Das Bild ist somit durch einen hohen Informationsgehalt gekennzeichnet (KAPPAS, 1994). Darüber hinaus finden auch Kanal-Summationen, Ratios und Hauptkomponenten Anwendung, welche feinere Spektralunterschiede verstärken und in neuen Datensätzen rekombinieren. Beispielsweise bot sich eine Quotientenbildung aus Kanal 3 und 1 an, der allgemein zur Hervorhebung von Fe-Oxiden angewendet wird.; sie ist durch eine hohe Varianz gekennzeichnet. Auch die 1. Hauptkomponente zeigte hinsichtlich der unterschiedlichen Lithologien gute Differenzierungsmöglichkeiten und spiegelt die Gesamtalbedo aller beteiligten Kanäle wider. Die Rekombination der so einzeln optimierten Datensätze zu hybriden Falschfarbkompositen erlaubte die geologische Kartierung von ausgewählten Teilgebieten. Besonders geeignet waren RGB-Komposite, bestehend aus der 1.Hauptkomponente, dem Ratio 3/1 sowie dem Ratio 5/4 bzw. dem TM-Kanal 4 der Landsat-Szene (Abb. 4) . Weiterhin kann es in ariden Gebieten von Vorteil sein, die Farbkodierung der Reflexionswerte vom klassischen addierenden RGB-Farbsystem in das IHS-System (und zurück) zu transformieren, um die Sättigungskomponente zu strecken, somit oberflächliche Materialien deutlicher farblich unterscheiden zu können.

Um die geometrische Auflösung der Landsat-Szene zu verbessern, wurden die beiden Subszenen jeweils mit einem zuvor erstellten Mosaik aus Luftbildern verschnitten. Mögliche Lineationen und strukturelle Besonderheiten im Untersuchungsgebiet ließen sich besonders durch richtungsorientierte Filtermatrizen hervorheben, die an kontrastreichen Kanälen wie 3, 5 und 7 Anwendung fanden (*edge enhancement*, vgl. MAH, TAYLOR, LENNOX & BALIA, 1995). Mit Hilfe dieser Daten (Abb. 5) sowie unter Einbeziehung der Luftbilder gelang es, zahlreiche Lineationen zu kartieren und über Klüftrosen auszuwerten. Ihre morphologische Ausprägung wurde u.a. auf der Basis eines aus topographischer Karten im Maßstab 1:100.000 abgeleiteten Höhenmodells analysiert. Hier war insbesondere die Kombination mit den hochauflösenden Luftbildern aber auch mit den multispektral aufgearbeiteten Landsat-Subszenen wichtig. Mit dieser Methode (vgl. SGAVETTI, FERRARI, CHIARI, FANTOZZI & LONGHI, 1995) konnte zudem ein Härteprofil für ausgewählte Areale erstellt werden. Zusätzlich ermöglichte das Höhenmo-

dell ein besseres Verständnis des tektonischen Aufbaus, der insbesondere in den geokodierten ERS-1 SAR-Daten deutlich hervortrat.

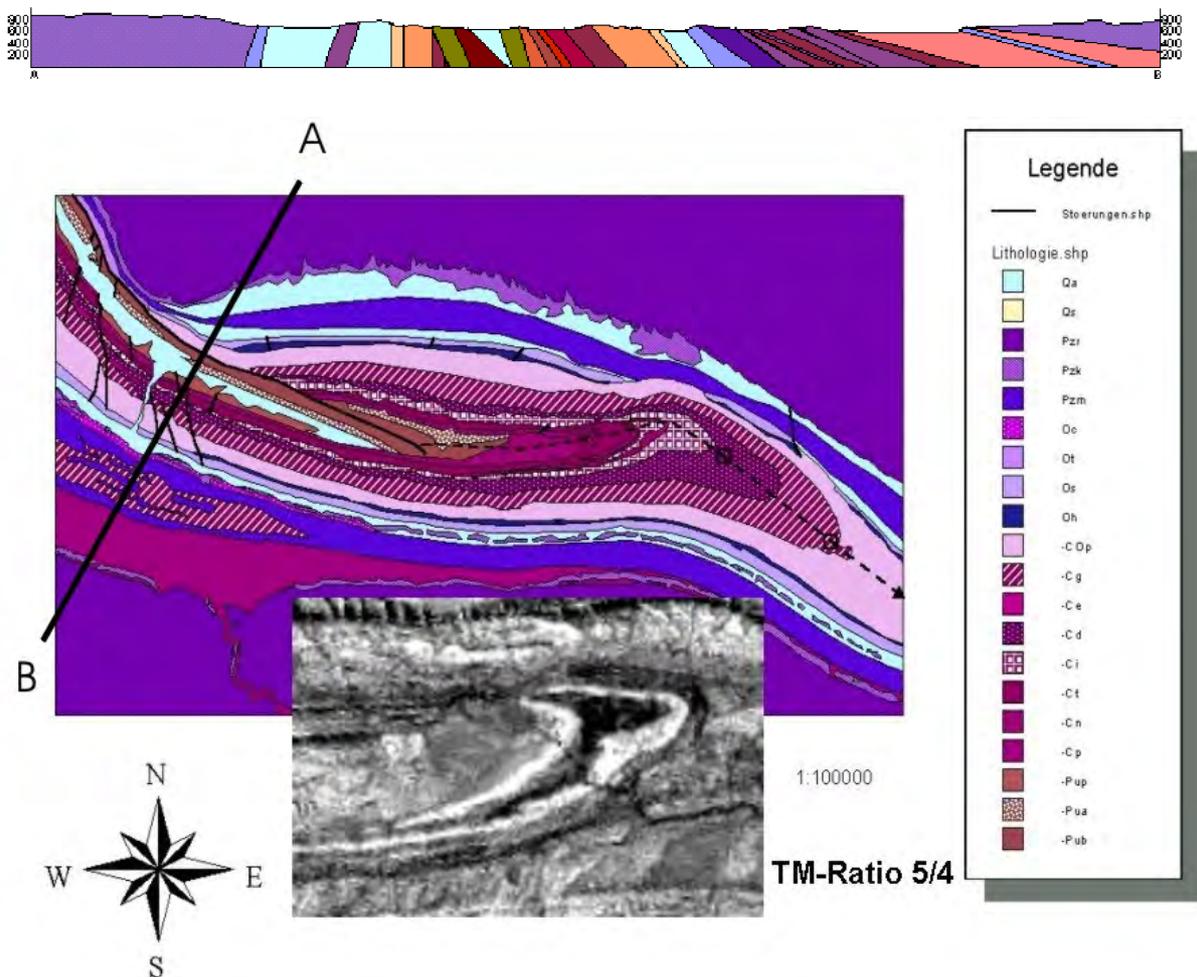


Abb. 4: Multispektral aufbereitete TM IR-Farbkomposite (357) einer Sattelstruktur SW' Palm Valley und die resultierende lithologische Karte/Profil

Neben der visuellen Interpretation wurde auch der Versuch einer teilüberwachten, multispektralen Klassifikation der TM-Daten unternommen, die jedoch stark von den kartierten Ergebnissen abwich. Als Grund für diese Abweichungen muss die starke Mischpixelbildung innerhalb der geometrisch schwachauflösenden Landsat-TM Daten gesehen werden. Eine zukünftige Einbindung höher auflösender Multispektraldaten (ASTER, Quickbird) erscheint deshalb sinnvoll und wird in einem Folgeprojekt bereits erprobt.

4 Lithostratigraphie und struktureller Bau

Der Arunta Block, der das Amadeus Basin im Norden begrenzt, ist durch die Redbank Thrust Zone in Central und Southern Province unterteilt (OBEE & WHITE, 1985). Eines der Untersuchungsgebiete liegt genau in diesem Bereich (*Glen Helen*). Die Gesteine der Central Province wurden während der *Strangways Orogeny* vor 1,76 – 1,75 Ga deformiert und metamorphisiert. Ein Großteil der Gesteine ist dem Narwietooma Metamorphic Complex zuzuschreiben (WARREN & SHAW, 1995), darunter geschichtete mafische bis felsische Magmatite und suprakrustale Gesteine, die lateral nach Norden verlaufen.

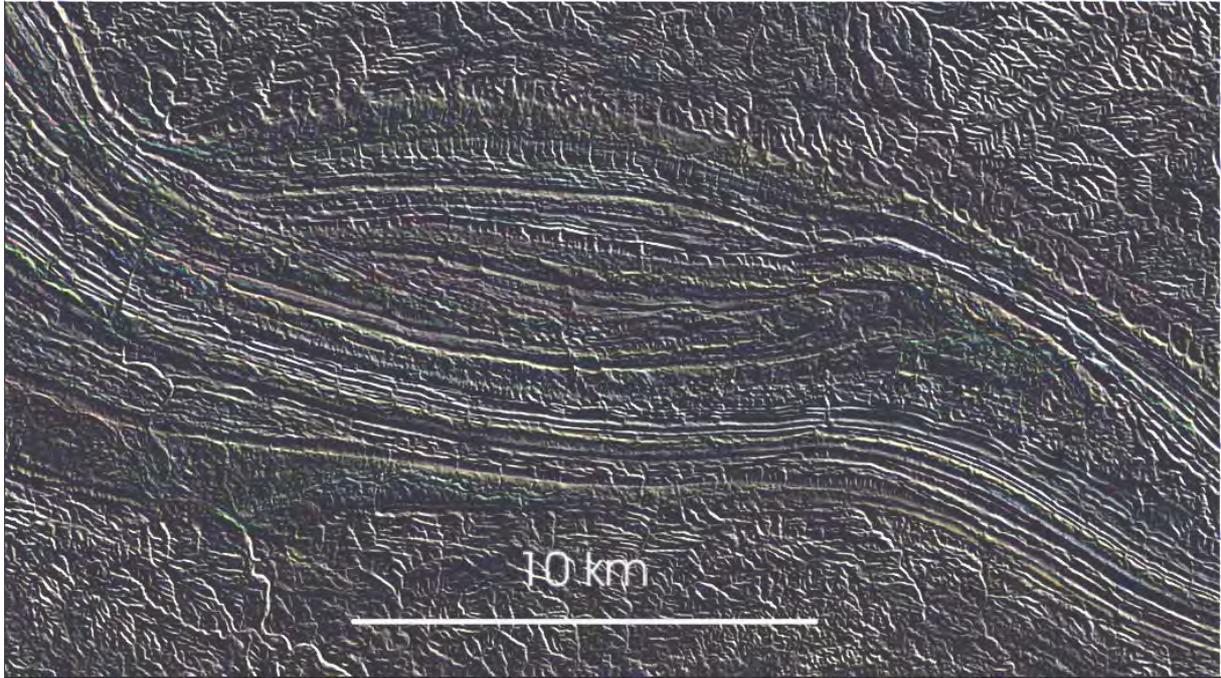


Abb. 5: Kantenverstärkte TM-Komposite IR-Farbkomposite (457) einer Sattelstruktur SW' Palm Valley mit Betonung NNW-SSE streichender Lineationen

Metamorphisch überprägter Granit tritt in rundlichen Formen zutage und kann im Nordwesten recht große, verdeckte Körper bilden (Abb. 6).

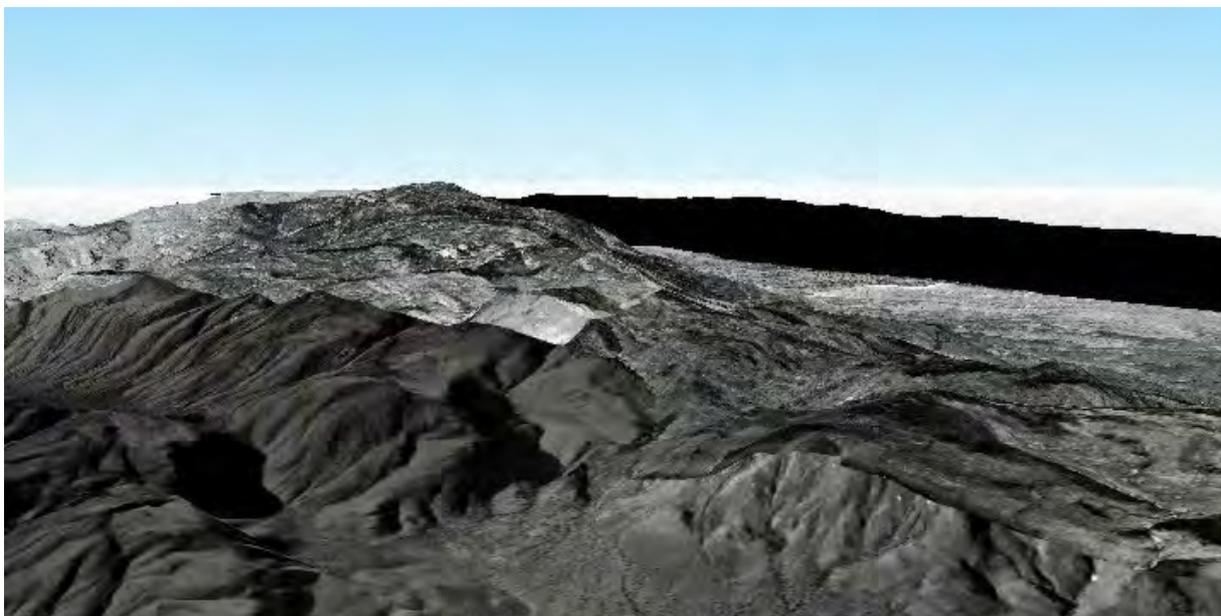


Abb. 6: Kombiniertes DGM/Luftbildmosaik der Redbank Thrust Zone (Blickrichtung SE, Mt. Zeil). Tektonische Zerscherungen zwischen rundlichen metamorphen Graniten (Bunghara Metamorphics, im Vordergrund) und den scharfkantigen Mt.Zeil-Gneissen (im Hintergrund), spröde, bruchhafte Lineationen sind deutlich zu erkennen

Die Redbank Thrust Zone tritt vor allem in Form von zwei größeren migmatitischen Gneiss-Körpern auf (GLIKSON, 1987), die beide durch Bruchschollen begrenzt sind. Im Wesentlichen bestehen sie aus Relikten von Metamorphiten, die aber auf Grund der Deformation häufig retrograd ausgeprägt sind.

Gesteine der Southern Province wurden in zwei Zyklen gebildet, die auf Extension zurückgehen, bei der es zu mafischen und felsischen Intrusionen, vulkanischer Aktivität und Ablagerung von Sedimenten kam. Die ältesten Gesteinseinheiten sind unter dem Madderns Yard Metamorphic Complex zusammengefasst; dazu gehören Migmatite sowie metamorph überprägt Granite nördlich der Chewings Range und die sogenannten Glen Helen Metamorphics. Auf dem Madderns Yard Metamorphic Complex lagert der Iwupataka Metamorphic Complex, der aus metamorph veränderten, aber nicht migmatisierten Sedimenten, Magmatiten und Graniten besteht. Sie treten an verschiedenen Stellen rund um die Chewings Range häufig in Form von Intrusionen auf. Desweiteren sind in der Southern Province Gesteine des Dashwood Gabbro Complexes anzutreffen, die in die Glen Helen Metamorphics südlich des Mount Zeil intrudieren. Nördlich der Chewings Range treten ferner Pegmatite auf, die mit Pegmatiten in der Central Province in Verbindung stehen (BLACK & SHAW, 1992, 1995). Dykes des Stuart Pass Dolerite sind die jüngsten Intrusionen in der Southern Province; sie finden sich auch in der Redbank Thrust Zone, nicht aber in der Central Province. Fast alle wichtigen (teil-)metamorphen Einheiten ließen sich in den kombinierten Fernerkundungsdaten voneinander differenzieren und in einer struktureologischen Karte zusammenführen (Abb. 7).

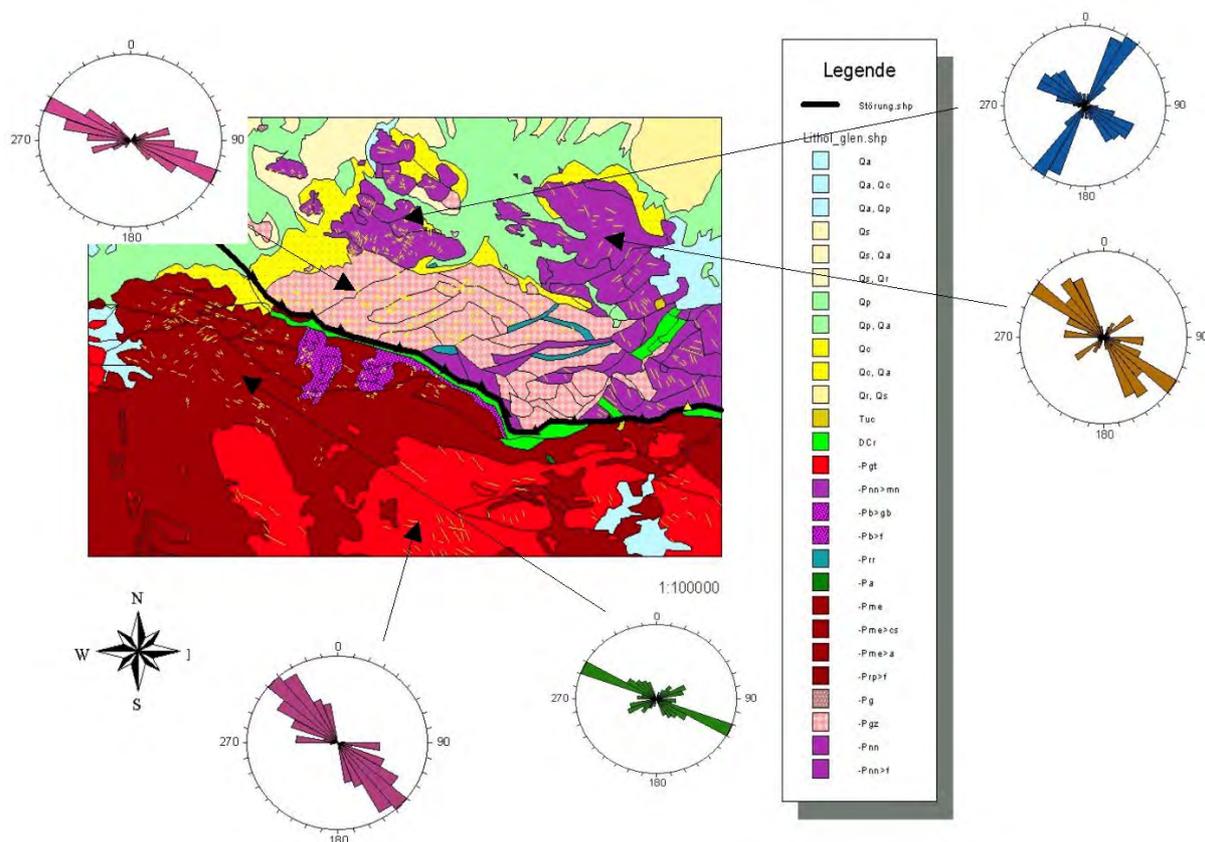


Abb. 7: Photogeologische Karte des Gebietes um die Redbank Thrust Zone, inklusive der relevanten struktureologischen Aufnahme von Lineationen/Störungen aus dem DGM. Deutlich zu sehen ist die Suture zwischen Central- und Southern Province

Das Amadeus Basin hingegen ist gekennzeichnet durch sedimentäre Ablagerungen, die durch Veränderungen des Meeresspiegels entstanden (COOK, 1968). Ein Großteil der Sedimente wurde im Missionary Plain Trough abgelagert, der zwei *subbasins* voneinander trennt. Die Basis des Amadeus Basin wird durch den Heavytree Quartzite gebildet, der direkt den erodierten Gesteinen des Arunta Blocks auflagert. Er besteht hauptsächlich aus Siltsteinen, Sandsteinen und Konglomeraten, die zum großen Teil fluviatilen Ursprungs sind. Darauf folgt die Bitter Springs Formation, die sich aus Karbonaten, Evaporiten und feinkörnigen klastischen

Sedimenten zusammensetzt. Die auflagernde Areyonga Formation ist Teil eines glacigenen Gürtels aus dem späten Proterozoikum, der quer durch Australien verläuft und aus Tilliten besteht (vgl. Abb. 4 und 5). Im Zuge der Petermann Ranges Orogeny wurde in den oben erwähnten subbasins die Pertaoorra Group abgelagert, deren Sedimente stark die jeweilige Ablagerungssituation proximal oder nicht-marin, distal bis marin widerspiegeln. So zählen zur Pertaoorra Group Sandsteine (KENNARD & LINDSAY, 1991; BRADSHAW, 1991a, b), Siltsteine, Karbonate, Salzstrukturen, Schiefer und einige stromatolitische Biostrome. Gegen Ende des Kambriums zog eine Veränderung von Ablagerungen in subbasins hin zu beckenweiter Ablagerung die Bildung der Larapinta Group nach sich, die Mächtigkeiten von bis zu 2000 m erreichte (GORTER, 1991). Sie beinhaltet Gesteine, die sowohl als Lager als auch als Quelle für Hydrokarbonate dienen: hauptsächlich sind dies Silt- und Sandsteine.

Im Zuge des Rodingan Movement wurde der Mereenie Sandstone, ein Quarzsandstein mit Mächtigkeiten von bis zu 1000 m abgelagert. Dieser Quarzsandstein gilt als wichtigster Wasseraquifer in der Region. Die Pertnjara Group bildet mit ihren nicht-marinen Ablagerungen den Abschluss der Sedimentation innerhalb des Amadeus Basin. Die Gesteine wurden zeitgleich mit der Hebung des Arunta Blocks mit Mächtigkeiten von bis zu 4000 m am erodierten Nordrand des Amadeus Basin abgelagert. JONES (1991) beschrieb sie als eine Serie von lakustrinen, verzweigten und meandrierenden fluvialen und alluvialen Fächerablagerungen, die im Verlauf der Alice Springs Orogeny entstanden.

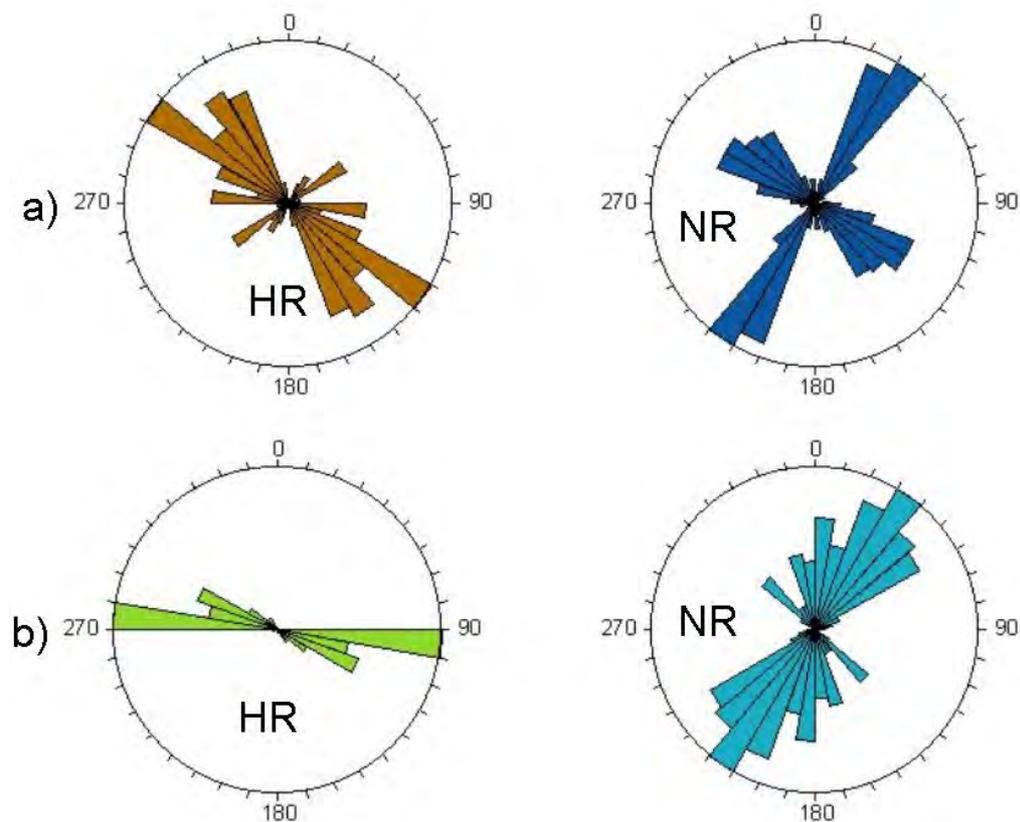


Abb. 8: Gegenüberstellung der Kluffrosen aus dem a) nördlichen metamorphen Arunta Block, nahe der Redbank Thrust Zone und b) des sedimentären Amadeus Basin nahe Palm Valley (HR= Hauptrichtungen; NR= Nebenrichtungen)

Die Kluffrosen, die aus den kartierten Lineamenten entstanden sind, verraten einiges über das Spannungsregime und die Ablagerungsverhältnisse: das südlichere der Untersuchungsgebiete, das sich innerhalb des Amadeus Basin befindet, weist nur wenige Lineamente auf. Die Hauptstreichrichtung verläuft ca. E-W bzw. ESE-WNW (90-100° zu 270-280°). Die Hauptdeforma-

tionskräfte wirkten also in N-S-Richtung. Auch die Hauptstörung, die durch einen Teil des südlichen Untersuchungsgebietes verläuft, legt diese Richtung mit einer leichten Verschiebung nach NE nahe. Das Vorhandensein einer weiteren deutlichen Lineationsrichtung zwischen 30-40° bzw. 210-220° könnte bedeuten, dass es nach der ersten Deformationsphase zu einer weiteren, diesmal von NW-SE wirkenden Kraft gekommen ist.

Im nördlichen Untersuchungsgebiet, an der Schwelle Amadeus Basin/Arunta Block, ergeben die Kluffrosen ein anderes Bild. Zunächst einmal sind Lineamente viel zahlreicher anzutreffen als im südlichen Gebiet; dies gibt schon einen Hinweis auf die gewaltigen Spannungsprozesse, die den Nordrand des Amadeus Basins aufgeworfen haben (DENHAM & ALEXANDER, 1991; STEWART ET AL., 1991, SHAW, 1991, OAKS ET AL., 1991). Zudem ist es natürlich auch ein Indiz auf die unterschiedlichen Gesteine: wird das südliche Gebiet von Sedimenten, in der Mehrzahl Sandsteinen aufgebaut, die offenbar duktiler gegenüber Druck reagieren, so besteht das nördliche Gebiet in der Hauptsache aus metamorph überprägten Magmatiten, die unter Spannung eher zu Zerschierung und Bruch neigen. Die Hauptkluftrichtung lässt sich hier eindeutig von 290-320° zu 110-140° festlegen. Senkrecht dazu tritt untergeordnet auch die Richtung 30-40° bzw. 210-220° auf. So müssen auch in diesem Fall zwei verschiedene Spannungsereignisse an der Verformung der abgelagerten Gesteine beteiligt gewesen sein: die Hauptkluftrichtung geht vermutlich auf die Alice Springs Orogeny zurück, die Mitte Devon bis Ende des Karbon sowohl die Southern Province des Arunta Blocks als auch das Amadeus Basin durch Hebung und Faltung prägte. Die untergeordnete Spannungsrichtung ist dann ein Überbleibsel der Strangways Orogeny, die dem größten Teil des Arunta Blocks seine Form gegeben hat. Die Redbank Thrust Zone, die das nördliche Gebiet durchschneidet, wurde während der Anmatjira Uplift Phase gebildet und vertiefte sich im Zuge der Alice Springs Orogeny. Sie hat sich wie ein Messer in den Arunta Block eingeschnitten und für eine Abscherung der Central Province gegenüber der Southern Province gesorgt.

5 Literaturverzeichnis

- BLACK, L.P. & SHAW, R.D., 1992: U-Pb Zircon Chronology of prograde Proterozoic Events in the Arunta Block, Central Australia. – *Australian Journal of Earth Sciences*, **39**: 153-171, Canberra.
- BRADSHAW, J., 1991a: The Tempe Formation: an early Middle Cambrian, open marine, clastic and carbonate sequence, central Amadeus Basin. – in KORSCH, R.J. & KENNARD, J.M. (Ed.) *Geological and geophysical studies in the Amadeus Basin, central Australia*, Bureau of Mineral Resources, Australia, *Bulletin* **236**: 245-252, Canberra
- BRADSHAW, J., 1991b: Description and depositional model of the Chandler Formation: a lower Cambrian evaporite and carbonate sequence, Amadeus Basin, central Australia. – in KORSCH, R.J. & KENNARD, J.M. (Ed.) *Geological and geophysical studies in the Amadeus Basin, central Australia*, Bureau of Mineral Resources, Australia, *Bulletin* **236**: 227-244, Canberra
- COOK, P.J. (ed.), 1968: 1:250.000 Geological Series – Explanatory Notes. Henbury, N.T. – Sheet SG/53-1. – Bureau of Mineral Resources, Geology and Geophysics, Canberra
- DENHAM, D. & ALEXANDER, L., 1991: The stress regime in the Amadeus Basin region. – in KORSCH, R.J. & KENNARD, J.M. (Ed.) *Geological and geophysical studies in the Amadeus Basin, central Australia*, Bureau of Mineral Resources, Australia, *Bulletin* **236**: 591-594, Canberra
- GLIKSON, A.Y., 1987: Regional structure and evolution of the Redbank-Mount Zeil thrust zone: a major libeament in the Arunta Inlier, central Australia. – *BMR Journal of Australian Geology & Geophysics*, **10**: 89-107, Canberra
- GLIKSON, A.Y., 1969: Geology of the outer zone of the Gosses Bluff cryptoexplosion structure. – *BMR Austr. Rep.*, **42**:1-30, Canberra.

- GORTER, J.D., 1991: Palaeogeography of Late Cambrian to Early Ordovician sediments in the Amadeus Basin, central Australia. – in KORSCH, R.J. & KENNARD, J.M. (Ed.) Geological and geophysical studies in the Amadeus Basin, central Australia, Bureau of Mineral Resources, Australia, Bulletin **236**: 253-275, Canberra
- JONES, B.G., 1991: Fluvial and Lacustrine Facies in the Middle to Late Devonian Pertnjara Group, Amadeus Basin, Northern Territory and their Relation to Tectonic Events and Climate. – in KORSCH, R.J. & KENNARD, J.M. (Ed.): Geological and Geophysical Studies in the Amadeus Basin, Central Australia, Bureau of Mineral Resources, Australia, Bulletin **236**: 333-47, Canberra.
- KAPPAS, M., 1994: Fernerkundung nah gebracht. Leitfaden für Geowissenschaftler. - Dümmler Verlag (Bonn).
- KENNARD, J.M. & LINDSAY, J.F., 1991: Sequence stratigraphy of the latest Proterozoic-Cambrian Pertaoorrtta Group, northern Amadeus Basin, central Australia. – in KORSCH, R.J. & KENNARD, J.M. (Ed.) Geological and geophysical studies in the Amadeus Basin, central Australia, Bureau of Mineral Resources, Australia, Bulletin **236**: 171-194, Canberra
- KRONER, A. (ed.), 1981: Precambrian Plate Tectonics. – Elsevier, Amsterdam.
- LINDSAY, J.F. & KORSCH, R.J., 1991: The evolution of the Amadeus Basin, central Australia. – in KORSCH, R.J. & KENNARD, J.M. (Ed.) Geological and geophysical studies in the Amadeus Basin, central Australia, Bureau of Mineral Resources, Australia, Bulletin **236**: 7-32, Canberra
- MAH, A., TAYLOR, G.R., LENNOX, P. & BALIA, L., 1995: Lineament Analysis of Landsat Thematic Mapper Images, Northern Territory, Australia. –Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, **61**: 761-773, Elsevier (Amsterdam).
- PREISS, W.V. & FORBES, B.G. 1981: Stratigraphy, correlation and sedimentary history of Adelaidean (Late Proterozoic) basins in Australia. – Precambrian Research, **15**: 255-304, Elsevier (Amsterdam).
- OAKS, JR., R.Q., DECKELMAN, J.A., CONRAD, K.T., HAMP, L.P., PHILLIPS, J.O. & STEWART, A.J., 1991: Sedimentation and tectonics in the northeastern and central Amadeus Basin, central Australia. – in KORSCH, R.J. & KENNARD, J.M. (Ed.) Geological and geophysical studies in the Amadeus Basin, central Australia, Bureau of Mineral Resources, Australia, Bulletin **236**: 73-90, Canberra
- OBEE, H.K. & WHITE, S., 1985: Faults and associated fault rocks of the Southern Arunta Block, Alice Springs, Australia. – Journal of Structural Geology, Vol. 7, No. **6**: 701-712, Pergamon (London)
- PRINZ, T. 1996: Multispektral remote sensing of the Gosses Bluff impact crater, central Australia (N.T.) by using Landsat-TM and ERS-1 data. – Photogrammetry and Remote Sensing, **51**: 137-149, Elsevier (Amsterdam).
- SGAVETTI, M., FERRARI, M.C., CHIARI, R., FANTOZZI, P.L. & LONGHI, I., 1995: Stratigraphic Correlation by integrating Photostratigraphy and Remote Sensing Multispectral Data: An Example from Jurassic-Eocene Strata, Northern Somalia. – AAPG, Vol. 79, **11**: 1571-1589, Tulsa.
- SHAW, R.D., 1991: The tectonic development of the Amadeus Basin, central Australia. – in KORSCH, R.J. & KENNARD, J.M. (Ed.) Geological and geophysical studies in the Amadeus Basin, central Australia, Bureau of Mineral Resources, Australia, Bulletin **236**: 429-461, Canberra
- STEWART, A.J., OAKS, JR., R.Q., DECKELMAN, J.A. & SHAW, R.D., 1991: “Mesothrust” versus “megathrust” interpretations of the structure of the northeastern Amadeus Basin, central Australia. – in KORSCH, R.J. & KENNARD, J.M. (Ed.) Geological and geophysical studies in the Amadeus Basin, central Australia, Bureau of Mineral Resources, Australia, Bulletin **236**: 361- 383, Canberra

- TEYSSIER, C., 1985: A crustal thrust system in an intracratonic tectonic environment. – Journal Structural Geology 7, 6: 689-700, Pergamon (London).
- WARREN, R.G. & SHAW, R.D., 1995: Explanatory Notes for geological Map Sheet Hermannsburg (SF 53-13). – NTGS, Darwin.

Auswertung von LANDSAT-7 ETM+ und ASTER-Daten zur Erfassung von Temperaturanomalien der Landoberfläche

MICHAEL SCHÄFER¹ & CHRISTIAN FISCHER²

Zusammenfassung: Aufgrund des Kyoto-Protokolls können Länder weltweit mit Emissionen und so genannten CO₂-Reduktionsanteilen handeln. Eine hohe Reduktion von CO₂-Emission verspricht die Eindämmung bzw. das Löschen von brennenden Kohleflözen. Es wurde untersucht, ob Daten der Sensoren LANDSAT-7 ETM+ und ASTER, die im Bereich des thermalen Infrarots die Wärmestrahlung der Erdoberfläche aufzeichnen, für eine Erfassung der durch Kohlebrände hervorgerufene Temperaturanomalien an der Tagesoberfläche genutzt werden können. Hierzu wurden zwei Verfahren entwickelt. In einem ersten Ansatz wurde unter Nutzung eines digitalen Geländehöhenmodells die natürliche Erwärmung der Erdoberfläche durch die Sonneneinstrahlung im Tagesverlauf abgeschätzt und untersucht, ob unter Berücksichtigung der reliefbedingten Einstrahlungsverhältnisse lokale Temperatur-anomalien an der Erdoberfläche erfasst werden können. In einem zweiten Ansatz wurde ein Zwei-Kanal-Verfahren nach Dozier zur Erfassung von Temperaturanomalien so erweitert, dass drei und mehr TIR-Kanäle bei der Auswertung genutzt werden können.

1 Hintergrund

Obwohl Kohlebrände auch natürliche Ursachen haben können, führen insbesondere wilder Abbau an der Tagesoberfläche oder untertägiger Abbau in Verbindung mit unkontrollierter Bewetterung zu einer Ausbreitung von brennenden Kohleflözen. Die meisten Kohlenfeuer sind auf spontane Entzündungen zurückzuführen, hervorgerufen entweder durch Ausgasungen der Kohle wie beispielsweise Methan oder durch exotherm ablaufende Oxidation bei einem Kontakt des Kohlenflözes mit Sauerstoff.

Die Nordprovinzen in China sind von dieser Problematik besonders betroffen. Allein in China verbrennen nach BÖKEMEIER (2002) jährlich circa 20 Millionen Tonnen Kohle. Die bis zu zehnfache Menge wird zudem durch die Brände für den Bergbau unbrauchbar. Zusammengekommen entspricht dieser Verlust in etwa einem Fünftel der chinesischen Jahresförderung von einer Milliarde Tonnen. Die chinesischen Kohlebrände verursachen dabei zwei bis drei Prozent des weltweiten durch fossile Brennstoffe erzeugten CO₂-Ausstoßes (OLIVIER, 2002; BÖKEMEIER, 2002). Hinzu kommen andere parallel entstehende Treibhausgase wie zum Beispiel Kohlenmonoxid (CO) und Methan (CH₄), sowie toxische Gase wie Schwefeldioxid (SO₂) und Stickoxide (NO_x). Nicht zu vernachlässigen sind auch die durch Kohlebrände entstehenden Landverluste und Gefährdungen für Gebäude und Infrastruktur durch Bodensenkungen und Spaltenbildungen.

Als Testgebiet für beispielhafte Auswertungen wurde die Gegend von Keerjian (88°15' E, 43°05' N; WGS 84) in der autonomen Provinz Xingjiang im Nordwesten der Volksrepublik China ausgewählt. Die nächstgelegene größere Stadt ist Urumqi. Sie gilt aufgrund der durch die Brände hervorgerufenen giftigen Gase und Aschen als eine der zehn weltweit am schlimmsten durch Luftverschmutzung betroffenen Städte (WINGFIELD-HAYES, 2000).

¹ Cand. geol. Michael Schäfer, Institut für Geologie und Paläontologie, Technische Universität Clausthal, Leibnizstr. 10, D-38678 Clausthal-Zellerfeld, e-mail: michael.schaefer@signale.de

² Dr.-Ing. Christian Fischer, Institut für Geotechnik und Markscheidewesen, Technische Universität Clausthal, Erzstr. 18, D-38678 Clausthal-Zellerfeld, e-mail: christian.fischer@tu-clausthal.de

2 Problemstellung

Fernerkundung bietet sich an, um aktuell und vergleichsweise genau Informationen über betroffene Gebiete erhalten zu können. Die Kenntnis über Lage und Flächenausbreitung vorhandener oder neu auftretender Brände ist eine wesentliche Voraussetzung für die Planung und Durchführung von Aktivitäten zur erfolgreichen Eindämmung oder umfassenden Löschung der brennenden Flöze. Dennoch ergeben sich oft Schwierigkeiten bei der Nutzung von Fernerkundungsdaten zur Erfassung von Kohlebränden. Als Hauptgründe können genannt werden:

- Kleine Ausmaße der eigentlichen Brandflächen. Die Größe der meisten Brandzonen beträgt an der Tagesoberfläche oft nur wenige Meter im Durchmesser (GIELISCH, mündl. Mitteilung, 2002).
- Beeinflussung der erfassbaren Brandtemperatur durch Tiefenlage des Kohlefeuers in Verbindung mit dem unterschiedlichen Wärmeverhaltens des Bodens und der Gesteine am Brandherd.
- Erwärmung des Erdbodens durch die Sonneneinstrahlung und weitere Modifikation der Einstrahlungsbedingungen durch das Relief.

Um die Vorteile moderner kommerziell verfügbarer Fernerkundungssensoren wie beispielsweise LANDSAT-7 ETM+ und ASTER, die im Bereich des thermalen Infrarots die Wärmestrahlung (Emission) der Erdoberfläche aufzeichnen, für eine Erfassung der durch Kohlebrände hervorgerufene Temperaturanomalien an der Tagesoberfläche nutzen zu können, wurden zwei Verfahren untersucht. Aufgrund der oftmals geringen räumlichen Ausdehnung offener brennender bzw. oberflächennah schwelender Kohlebrände, wird eine Auswertung der Fernerkundungsdaten auch im Subpixel-Bereich angestrebt.

3 Fernerkundungsdaten

Neben den hier aufgeführten Fernerkundungsdaten stand zusätzlich ein digitales Höhenmodell (DHM) zur Verfügung, welches den Bereich der ETM+-Szene und der verwendeten ASTER-Szenen abdeckt. Das DHM wurde interferometrisch aus SAR-Daten des European Remote Sensing (ERS) Satelliten der European Space Agency (ESA) berechnet und besitzt eine geometrische Auflösung von 25 Metern. Die Daten wurden georeferenziert und vom Deutschen Fernerkundungsdatenzentrum (DFD) des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) zur Verfügung gestellt. Das DHM bildet zudem die Grundlage für die Orthorektifizierung der LANDSAT-7-Szene.

3.1 ASTER

Der Fernerkundungssensor ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) befindet sich an Bord des Erdbeobachtungssatelliten Terra und besteht aus drei Sensoren. Der VNIR-Sensor (Visible and Near Infrared) besitzt drei Kanäle zwischen 0.5 und 0.9 μm bei einer geometrischen Auflösung von 15 Metern, der SWIR-Sensor (Short Wave Infrared) hat eine geometrische Auflösung von 30 Metern in sechs Spektralbereichen zwischen 1.6 μm und 2.43 μm (beides Pushbroom-Sensoren). Der TIR-Sensor (Thermal Infrared) in Whiskbroom-Bauweise besitzt fünf Kanäle zwischen 8 und 12 μm bei einer geometrischen Auflösung von 90 m. Eine Szene deckt eine Fläche von 60 zu 60 Kilometern ab. Die im Rahmen der Arbeit verwendeten Level-2-Produkte von ASTER zeigt Tabelle 1.

Tab. 1: Genutzte ASTER On-Demand Level-2-Produkte

Kurz-Bezeichn.	ASTER Produkt-Bezeichnung	physikalische Einheit	Atmosphärenkorrektur
AST_04	Strahlungs-Temperatur am Sensor	°C	Nein
AST_08	Kinetische Temperatur der Erdoberfläche	K	Ja
AST_09	Ausstrahlung der Erdoberfläche im VNIR/SWIR	$W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$	Ja
AST_09T	Emittierte Ausstrahlung der Erdoberfläche im TIR	$W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$	Ja

Bei der Generierung der Level-2-Produkte wird teilweise eine einfache Atmosphärenkorrektur durchgeführt. Die Verwendung des zusätzlich erhältlichen Level-2-Produkts AST_05 (mit fünf Emissivitäten der Erdoberfläche im TIR) erscheint problematisch, da der zugrunde liegende Algorithmus zur Trennung von Temperatur und Emissivität im Bereich von Kohlefeuern nicht fehlerfrei arbeitet (TETZLAFF, mündl. Mitteilung, 2003).

3.2 LANDSAT-7 ETM+

Der Whiskbroom-Sensor ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus) an Bord von LANDSAT-7 besitzt neben sechs multispektralen Kanälen zwischen 0.45 und 2.35 μm , bei einer geometrischen Auflösung von 30 m, einen thermalen Kanal (10.4 – 12.5 μm) mit einer Auflösung von 60 m und zusätzlich einen panchromatischen Kanal mit einer geometrischen Auflösung von 15 m. Eine Szene deckt dabei eine Fläche von ca. 185 zu 185 km ab. Für das Untersuchungsgebiet stand eine vollständige Szene vom 23. Aug. 1999 zur Verfügung (path 142, row 30), die vom DFD orthorektifiziert wurde.

4 Auswertungen

Die entwickelten Methoden beschränken sich auf die Nutzung des TIR-Bereiches des Elektromagnetischen Spektrums. Hierdurch werden Probleme der Überlagerung von emittierter Strahlung der Erdoberfläche mit der reflektierten Sonnenstrahlung im kurzwelligeren Spektralbereich unter 8 μm vermieden. Die derzeit für die Problematik der Sonnenreflektion (vor allem im Bereich unter 5 μm) bestehenden Lösungsvorschläge sind nach WOOSTER & KANEKO (2001) nicht befriedigend. Eine Ausweitung der hier entwickelten Methoden auf den MIR- bzw. SWIR-Bereich ist jedoch einfach möglich, insbesondere bei Auswertungen von Nachtszenen, die für diese Arbeit leider nicht zur Verfügung standen.

4.1 TRINSIM (Thermal heating Removal by Insolation Simulation)

Der Ansatz TRINSIM basiert auf der Simulierung der Sonneneinstrahlung im Tagesverlauf über einem digitalem Höhenmodell (DHM) der Geländeoberfläche. Darauf aufbauend wird die natürliche Erwärmung der Erdoberfläche von Sonnenaufgang (SR) bis zum Zeitpunkt der Satellitenbefliegung abgeschätzt. Die so gewonnenen Temperaturen werden mit den von Satelliten erfassten Temperaturen verglichen. Ziel ist es, die Einflüsse der Topographie auf die Erwärmung der Erdoberfläche zu ermitteln, um die Erfassung der durch Kohlebrände hervorgerufenen Temperaturanomalien zu ermöglichen.

Dieser Ansatz eignet sich insbesondere für Satellitensensoren, die nur in einem Wellenlängenbereich des thermalen Infrarots aufzeichnen.

Die Berechnung der eingestrahnten Energie (Globalstrahlung E_{global}) erfolgt durch die Bestimmung des Winkels zwischen den Normalenvektoren n aller Flächen des DHM und dem zeitabhängigen Vektor der Sonneneinstrahlung s (s. Abb. 1). Die Berechnung der Sonnenposition erfolgt nach IQBAL (1983) in Abhängigkeit von Uhrzeit, Datum und geographischer Position für eine beliebige Anzahl von Zeitschritten und eine frei wählbare Zeitspanne. Mit berücksichtigt werden optische Parameter zur Beschreibung von fünf Transmissivitäten der Atmosphäre für die direkte Sonnenstrahlung (E_{direkt}) und für die Einbeziehung der diffusen Himmelsstrahlung (E_{diffus}) durch Streuung und Mehrfachreflektionen nach BIRD & HULSTROM (1981), zusammengefasst von BAEHR & STEPHAN (1998). Ebenfalls berücksichtigt wird ein einfacher Ansatz zur Beschreibung der Strahlung der Umgebung (E_{umg}) nach IQBAL (1983). Die zur Atmosphärenkorrektur notwendigen Kenngrößen (Temperatur, Luftdruck, Sichtweite, Albedo, Höhe der Wasser- und Ozonsäule) können zum Teil aus Messdaten von lokalen Wetterstationen bezogen oder aus Tabellenwerken entnommen werden.

Globalstrahlung:

$$E_{global} = E_{direkt} \cdot \cos \angle(n,s) + E_{diffus} + E_{umg}$$

Einbezogene Atmosphären-Parameter:

- E_{direkt}
- Aerosol-Transmission
 - Rayleigh-Transmission
 - Absorption durch Wasserdampf
 - Absorption durch Ozon
 - Absorption durch sonstige Gase
- E_{diffus}
- Streuung durch Aerosole
 - Rayleigh-Streuung
 - Mehrfachreflektionen

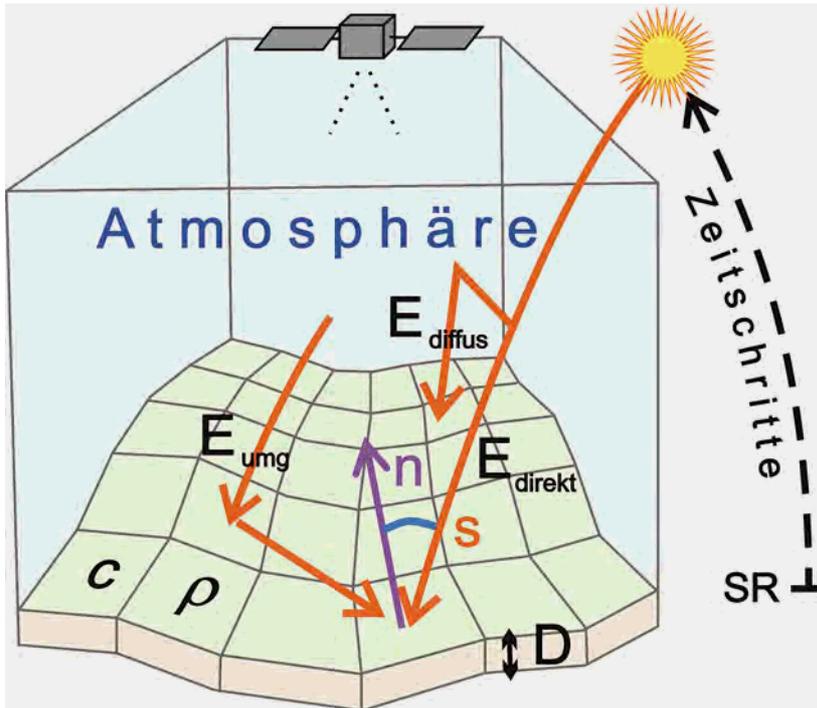


Abb. 1: Schematische Darstellung zur Ermittlung der Globalstrahlungsenergie und der resultierenden reliefbedingten Erwärmung der Tagesoberfläche

Die Ermittlung der simulierten Oberflächentemperaturen anhand der Energie der Globalstrahlung E_{Global} erfolgt nach Formel (1). Aufgrund fehlender Messwerte werden die physikalischen Parameter zur Beschreibung des Wärmeumsatzes des Erdbodens (Dichte ρ , spezifische Wärmekapazität c und die im Tagesverlauf durch Temperaturerhöhung beeinflusste Mächtigkeit D des Erdbodens) abgeschätzt. Die Berechnung der Temperaturerhöhung ΔT beginnt bei einem zuvor ermittelten höhenabhängigen Startwert (Tagesminimum-Temperatur zur Sonnenaufgangszeit) und werden für jeden Zeitschritt der Länge $\Delta Zeit$ für alle Flächen des DHM ausgeführt. Die Fläche A eines DHM-Pixels und die Masse M der sich erwärmenden Bodenvolumeneinheit (wobei $M = D \cdot A \cdot \rho$) gehen nicht in die Berechnung mit ein.

$$\Delta T = \frac{E_{Global} \cdot \Delta Zeit}{c \cdot \rho \cdot D} \quad [\text{K}] \quad (1)$$

Durch die Anwendung von TRINSIM können kleinräumig Lokalitäten erfasst werden, an denen sich im Satellitenbild lokal erhöhte Temperaturen zeigen. Sofern diese keine Beziehung zu topographischen Phänomenen aufweisen, deuten sie offensichtlich auf künstliche Temperaturanomalien hin. Vier Beispiele hierfür zeigt Abbildung 2. Links dargestellt (a) sind durch ETM+ Kanal 6 gemessene Temperaturen, rechts (b) durch Simulation gewonnene. Die durchgezogenen Kreise stellen potentielle Feuerflächen dar. Der gestrichelte Kreis beschreibt die Lage der Oase Keerjian, welche durch ihre niedrigere Temperatur im Satellitenbild bemerkbar ist, jedoch nicht in der Simulation erscheint.

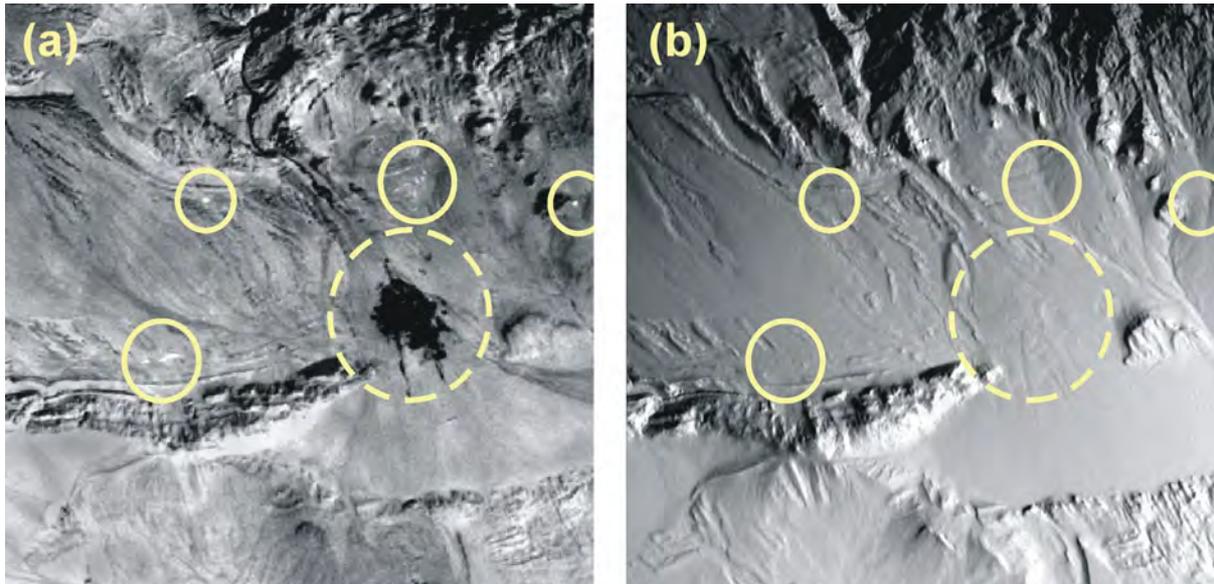


Abb. 2: Beispiel für das Ergebnis einer Auswertung mit TRINSIM

Die Methode TRINSIM liefert als Ergebnis Temperaturdifferenzen zwischen den vom Satelliten gemessenen und den simulierten Temperaturen. Eine direkte Beschreibung der Temperaturen der Brandstellen ist jedoch schwierig, da diese immer sehr viel kleiner als ein Pixel des Satellitenbildes im TIR sind. Für weitergehende Überlegungen zum Zusammenhang zwischen Feuergröße und Feuertemperatur bei der Verwendung eines einzelnen TIR-Kanals vgl. GENDEREN, V. & GUAN (1997).

Beim Vergleich der simulierten Temperaturen mit den aus den ETM+-Daten ermittelten Temperaturen zeigt sich, dass die von der Sonne beschienene Hänge generell zu warm, die von der Sonne abgewandten Hänge zu kalt berechnet werden. Es ist daher zu erwarten, dass Brandflächen mit vergleichsweise geringem Temperaturunterschied zur Umgebung nur eingeschränkt erfasst werden können. Eine Verbesserung des Verfahrens kann durch folgende Erweiterungen erreicht werden:

- Unterscheidung mehrerer Oberflächentypen, beispielsweise durch Nutzung geologischer und bodenkundlicher Informationen, sowie unterschiedlicher Land- und Vegetationsbedeckungsklassen, unter Verwendung der jeweils spezifischen, den Wärmeumsatz beeinflussender Parameter und Koeffizienten.
- Physikalische Beschreibung und Modellierung eines Wärmeausgleichs zwischen kalten und warmen Flächen, einer Wärmeabgabe an die Atmosphäre, und vor allem Berücksichtigung lokaler Windsysteme (TETZLAFF, mündl. Mitteilung, 2003).
- Berücksichtigung der Beschattung von DHM-Pixeln durch die umgebende Topographie (vgl. z. B. SCHAAB, 2000). Dies ist nur notwendig in stark reliefierten Gelände, wie z. B. im Norden von Abbildung 2, wo jedoch lokal keine Kohlebrände auftreten. TRINSIM berücksichtigt momentan lediglich die Selbstbeschattung von Pixeln.

4.2 TRISTAR (Tri-Spectral Temperature Anomaly Recognition)

In einem zweiten Ansatz wurde unter Nutzung von multispektralen Satellitendaten des Sensors ASTER, der in mehreren Wellenlängenbereichen des thermalen Infrarots Daten erfasst,

ein Ansatz nach DOZIER (1981) zur Erfassung von Temperaturanomalien angewendet und so erweitert, dass drei und mehr TIR-Kanäle bei der Auswertung genutzt werden können. Gleichzeitig erlaubt der Ansatz prinzipiell eine Erfassung von Temperaturunterschieden im Subpixel-Bereich.

Die Methode nach Dozier verwendet die Strahlungswerte L_1 und L_2 von zwei Spektralkanälen (mit den mittleren Wellenlängen λ_1 und λ_2) in einem System zweier Gleichungen (vgl. Formel 2). Gesucht sind die drei unbekannt Parameter Feuertemperatur T_F , Hintergrundtemperatur T_{Bg} und relative Feuergröße p (Prozentualer Anteil der Feuerfläche an der Pixelfläche).

$$\begin{aligned} L_1 &= p \cdot L(\lambda_1, T_F) + (1 - p) \cdot L(\lambda_1, T_{Bg}) \\ L_2 &= p \cdot L(\lambda_2, T_F) + (1 - p) \cdot L(\lambda_2, T_{Bg}) \end{aligned} \quad (2)$$

Für $L(\lambda, T)$ ist Formel (3) auf Grundlage des Strahlungsgesetzes nach Planck einzusetzen (mit den Planckschen Strahlungskonstanten C_1 und C_2):

$$L(\lambda, T) = \frac{C_1}{\lambda^5 \cdot \exp\left(\frac{C_2}{\lambda \cdot T} - 1\right)} \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m}} \right] \quad (3)$$

Abbildung 3 zeigt links (a) Kurvenverläufe von Formel (3) über der Wellenlänge λ für verschiedene Temperaturen ($T = 300, 400, 500, 600, 700$ K). Das Maximum der Ausstrahlung verschiebt sich bei steigender Temperatur nach dem Verschiebungsgesetz von Wien in Richtung kleinerer Wellenlängen (siehe gepunktete Linie in Abb. 3a). Der rechte Teil von Abbildung 3 (b) stellt anhand Formel (2) die Überlagerung der Ausstrahlung zweier Strahlungsquellen ($T_F = 700$ K, $T_{Bg} = 300$ K) nach Dozier bei verschiedenen Flächengrößen p dar. Bei $p = 100\%$ (ganze Fläche strahlt mit Temperatur T_F) und $p = 0\%$ (kein Feuer, ganze Fläche hat Temperatur T_{Bg}) ergeben sich die gleichen Kurvenverläufe wie in Abbildung 3 (a). Bei einem gleichzeitigen Auftreten von Feuer- und Hintergrundstrahlung innerhalb eines Pixels ergibt sich jedoch ein abweichender Kurvenverlauf (b). Die gepunktete Linie der maximalen Ausstrahlung ist hier im Vergleich zu (a) deutlich in Richtung kleinerer Wellenlängen verschoben. Dieses Phänomen nutzt die Dozier-Methode zur Gewinnung der drei gesuchten Parameter aus. Prinzipiell ist es zur Erhöhung der Genauigkeit vorteilhaft, wenn die genutzten Spektralkanäle über einen weiten Bereich des elektromagnetischen Spektrums verteilt sind.

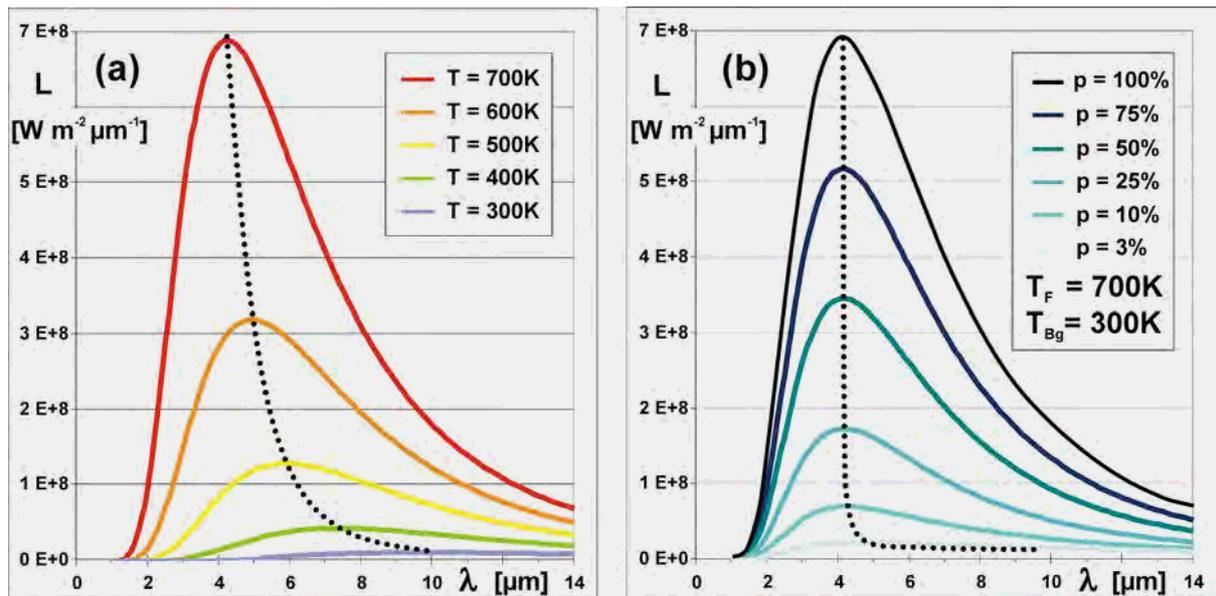


Abb. 3: Theoretischer Hintergrund von TRISTAR

Das Dozier-Gleichungssystem ist analytisch nicht lösbar. Die Lösung erfolgt daher meistens auf graphischen Weg (vgl. z. B. MATSON & DOZIER, 1981), was eine rechnergestützte Auswertung ganzer Satellitenszenen unmöglich macht. Des Weiteren wird zur Lösung des Gleichungssystems oft die Hintergrundtemperatur T_{Bg} aus den Werten benachbarter Pixel abgeschätzt. Ein Problem hierbei ist, dass in den Nachbarpixeln ebenfalls Feuer auftreten können, wodurch das Ergebnis verfälscht werden kann.

Aus diesen Gründen wurde ein iteratives Rechenverfahren entwickelt, welches die gesuchten Werte für jeden Pixel näherungsweise bestimmt. Dieser Ansatz ermöglicht, drei und mehr Kanäle bei der Auswertung gleichzeitig zu nutzen. Hierdurch ist die eindeutige Bestimmung aller drei Parameter T_F , p und T_{Bg} möglich.

Zur gleichzeitigen Darstellung der drei resultierenden Parameter in einer Abbildung wurden verschiedene Methoden zur Berechnung der Energiefreisetzung E_F (in Watt) eines Feuers untersucht. Die Energiefreisetzung beschreibt die Gesamt-Ausstrahlung einer Brandfläche über alle Wellenlängen. Die "Bi-spectral technique" nach OERTEL et al. (2002) liefert gute Resultate (vgl. Formel 4). Die Methode wird auch in Verbindung mit dem Feuerfernerkundungs-Satelliten BIRD (Bi-spectral InfraRed Detection) der DLR genutzt. Sie basiert auf dem Strahlungsgesetz von Stefan und Boltzmann (mit der Stefan-Boltzmann-Konstante σ) in Abhängigkeit der Größe der Feuerfläche A_F (in m^2).

$$E_F = \sigma \cdot (T_F^4 - T_{Bg}^4) \cdot A_F \quad [\text{W}] \quad (4)$$

Abbildung 4 zeigt die Arbeitsweise der TRISTAR-Methode. Dargestellt ist jeweils die Feuertemperatur T_F über p für drei Spektralkanäle (durchgezogene Linien) und für zwei unterschiedliche Hintergrundtemperaturen T_{Bg} (a, b). In einem ersten Iterationsschritt wird die Hintergrundtemperatur variiert, und daraufhin in einer zweiten Iterationsschleife durch Verändern von p der optimale Schnittpunkt zwischen den drei Kurven bestimmt. Im rechten Bild ist der Schnittpunkt für die vorgegebene T_{Bg} noch nicht optimal, ersichtlich durch die Ermitt-

lung der Standardabweichung (STABW, gepunktete Kurve). Im Fall links (a) wurde mit dem richtigen Wert für T_{Bg} der optimale Schnittpunkt erreicht, die STABW hat hier ihr Minimum.

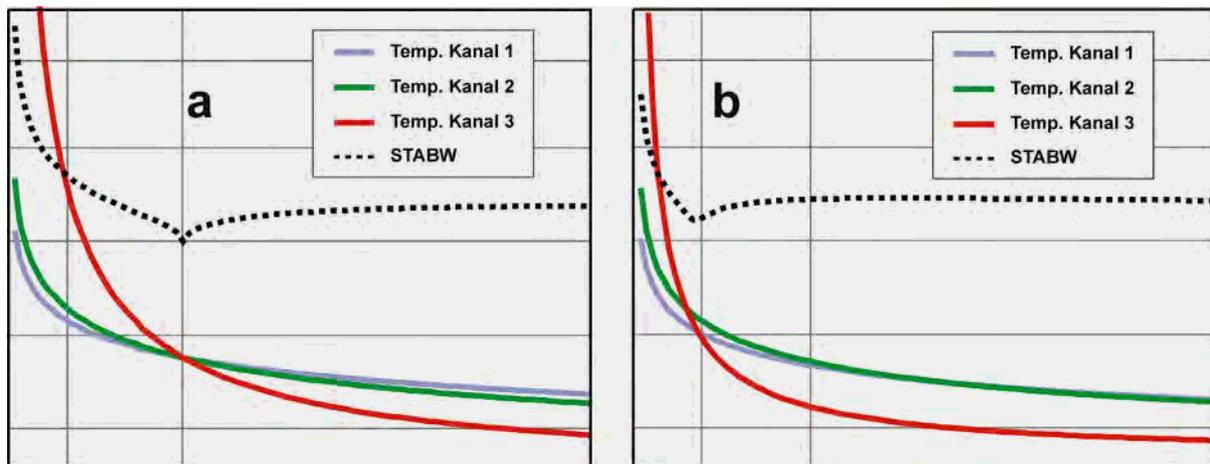


Abb. 4: Darstellung der Arbeitsweise von TRISTAR

Die Auswertung der Ergebnisse zeigt, dass die Methode fehlerfrei arbeitet. Zwecks einer Verbesserung der TRISTAR-Methode sind jedoch folgende Erweiterungen denkbar:

- Kalibrierung der ASTER-Daten anhand von "Look-Up"-Tabellen, um dadurch eine Verbesserung der Ausgangsparameter für die Berechnung zu erreichen.
- Klassifizierung unterschiedlicher Oberflächentypen um detaillierte Informationen über spektrale Emissivitätsunterschiede der Erdoberfläche im TIR-Bereich zu erhalten. Dadurch können die Lösungen des Dozier-Gleichungssystems verbessert werden.

Die Methode arbeitet bei Verwendung der TIR-Kanäle von ASTER aufgrund der geringen Temperaturen von Kohlebränden oftmals an der Grenze der Genauigkeit des Sensors. Wünschenswert wäre die Mit-Einbeziehung von Kanälen im MIR-Bereich, da eine Spreizung der verwendeten Kanäle über mehrere atmosphärische Fenster eine eindeutigere Lösung des Dozier-Gleichungssystems ermöglichen würde. Zudem sind Feuer im MIR-Bereich aufgrund des Wienschen Verschiebungsgesetzes aussagekräftiger als im TIR. Dies würde jedoch die Verwendung von Nacht-Szenen oder die Möglichkeit der genauen Ermittlung des Anteils der Sonnenreflektion erfordern, vgl. den Anfang von Abschnitt 4.

5 Schlussfolgerungen

Es konnte gezeigt werden, dass eine Erfassung von thermalen Anomalien der Landoberfläche, hier hervorgerufen durch brennende Kohleflöze, möglich ist. Obwohl nur jeweils ein Bilddatensatz der beiden Sensoren zur Verfügung stand, konnten plausible Ergebnisse erreicht werden. Auf der Grundlage der bisherigen Untersuchungen wird eine Erweiterung der Verfahren angestrebt. Signifikante Verbesserungen der Ergebnisse, insbesondere beim Verfahren TRISTAR, sind bei einer Auswertung von Nachtaufnahmen zu erwarten, da dann auch die Kanäle des SWIR (MIR) in die Auswertung einbezogen werden könnten. Neben der hier gezeigten Anwendung besitzen die vorgestellten Verfahren ein hohes Potential, um auch für andere Fragestellungen, beispielsweise für die Erfassung von Waldbränden und deren Veränderungen, genutzt werden zu können.

6 Danksagung

Die Autoren danken Hr. Dipl.-Geophys. Lutz Petrat und Hr. Dipl.-Geol. Ulrich Ziegler (Deutsche Montan Technologie GmbH, Essen) für die Bereitstellung von Referenzdaten aus dem Untersuchungsgebiet im Rahmen dieser Diplomarbeit.

Besonderer Dank gilt Hr. Dr. Stefan Voigt und seiner "Kohlefeuer"-Arbeitsgruppe beim DFD des DLR für den fachlich anregenden Informationsaustausch, sowie für die Bereitstellung der ETM+-Daten und des DHM.

7 Literaturverzeichnis

- BAEHR, H. D. & STEPHAN, K., 1998: Wärme- und Stoffübertragung. - 3. Aufl., 686 S., Springer, Berlin.
- BIRD, R. E. & HULSTROM, R. L., 1981: A Simplified Clear Sky Model for Direct and Diffuse Insolation on Horizontal Surfaces. - US SERI Tech. Report TR-642-761, 38 S. - <http://rredc.nrel.gov/solar/pubs/PDFs/TR-642-761.pdf>
- BÖKEMEIER, R., 2002: Höllenfahrt durch China. Unterirdische Kohlenfeuer. - Geo. Das neue Bild der Erde, **9**: 100-124.
- DOZIER, J., 1981: A Method for Satellite Identification of Surface Temperature Fields of Subpixel Resolution. - Remote Sensing of Environment, **11**: 221-229.
- GENDEREN, J. L. VAN & GUAN, HAIYAN, 1997: Environmental Monitoring of spontaneous combustion in the north China Coalfields. Final Report to European Commission. - 244 S., ITC, Enschede.
- GIELISCH, H., 2002: Deutsche Montan Technologie GmbH, Mines & More Division, Essen, mündl. Mitteilung.
- IQBAL, M., 1983: An Introduction to Solar Radiation. - 101 S., Academic Press, New York.
- MATSON, M. & DOZIER, J., 1981: Identification of subresolution high temperature sources using a thermal IR sensor. - Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, **47**: 1311-1318.
- OERTEL, D., BRIESS, K., LORENZ, E., SKRBEK, W. & ZHUKOV, B. (2002): Fire Remote Sensing by the Small Satellite on Bi-spectral Infrared Detection (BIRD). - Photogrammetrie Fernerkundung Geoinformation, **5**: 341-350, Schweizerbart, Stuttgart.
- OLIVIER, S. (2002): Feux de charbon la Chine brûle-t-elle? - Science & Vie, **12**: 104-108.
- SCHAAB, G. (2000): Modellierung und Visualisierung der räumlichen und zeitlichen Variabilität der Einstrahlungsstärke mittels eines Geo-Informationssystems. Dissert. - 187 S., TU Dresden.
- TETZLAFF, A., 2003: Deutsches Fernerkundungsdatenzentrum (DFD), DLR, Abt. Umwelt und Geoinformation, mündl. Mitteilung.
- WINGFIELD-HAYES, R., 2000: China battles coal fires. - BBC News Online, 3. August 2000. - <http://news.bbc.co.uk/2/hi/asia-pacific/864588.stm>
- WOOSTER, M. J. & KANEKO, T., 2001: Testing the accuracy of solar-reflected radiation corrections applied during satellite shortwave infrared thermal analysis of active volcanoes. - Journal of Geophysical Research, **106** (B7): 13381-13393.

Visuelle Interpretation vs. digitale Klassifizierung: Kontextuelle Methoden in den Geowissenschaften

NORBERT OTT ¹

Zusammenfassung: Der Einsatz von Geoinformationssystemen und digitalen Bildverarbeitungstechniken in den Geowissenschaften ermöglicht die Integration verschiedener thematischer Daten und Informationen. Die Verknüpfung von digitalen Fernerkundungsdaten des Erdbeobachtungssatelliten Landsat mit geophysikalischen Potentialfelddaten der Gravimetrie und Aeromagnetik sowie die Einbindung der Geologie und Strukturgeologie können nach dem Vorbild des Photointerpretationsschlüssels für ein weites Spektrum an Fragestellungen eingesetzt werden. Ein ganz entscheidender Vorteil ist die mögliche Korrelation von spektralen Oberflächendaten der Satellitensensoren mit Tiefeninformationen der geophysikalischen Potentialfelddaten. Dies soll exemplarisch am Beispiel der Hamaret-Intrusion in den Red Sea Hills des Sudan gezeigt werden.

1. Einleitung

Die visuelle Interpretation von Luft- und Satellitenbildern ist die klassische Arbeitsweise des Fernerkunders. Daneben bietet die digitale Bildverarbeitung mit den Methoden der überwachten Klassifizierung und GIS-basierten Analysen weitere Werkzeuge für die synoptische Interpretation geowissenschaftlicher Daten. Erster Schritt zur Verknüpfung und Modellierung nicht redundanter Daten ist der Aufbau einer Geo-Datenbasis, in welcher Daten unterschiedlicher Disziplinen der Geowissenschaften integriert und strukturiert werden müssen.

In vielen vergleichenden Untersuchungen zur digitalen Modellierung und Bildverarbeitung sind die Testgebiete räumlich klein gewählt und die Anzahl der Themen respektive der Klassen gering. Das vereinfacht zum einen die methodische Umsetzung, erschwert zum anderen die Beurteilung der Ergebnisse. Bei Untersuchungen im regionalen Maßstab mit komplexen Inhalten und einem breiten Spektrum an Fragestellungen werden neue methodische Ansätze für den operationellen Einsatz getestet. Das gesamte Arbeitsgebiet in den Red Sea Hills im Sudan hat eine Größe von 160 x 330 km. Das entspricht einer Fläche von 50.000 km². Das vorgestellte Gebiet der Hamaret-Intrusion als Ausschnitt des Gesamtdatensatzes besitzt eine Blockgröße von 30 x 40 km.

Durch die Kombination digitaler Klassifizierungsmethoden nach den Prinzipien der Mustererkennung mit den Ergebnissen visueller geologischer und strukturgeologischer Interpretatio-

¹ Dr. Norbert Ott, Institut für Geologische Wissenschaften, Freie Universität Berlin, Malteserstr. 74-100, D-12249 Berlin, e-mail: nott@geophysik.fu-berlin.de

nen können die jeweiligen Vorteile beider Ansätze in die weiteren Untersuchungen einfließen. Ein ganz entscheidender Vorteil ist die mögliche Korrelation von spektralen Oberflächendaten der Satellitensensoren mit Tiefeninformationen der geophysikalischen Potentialfelddaten. Durch die Korrelation geologischer Gesteinseinheiten mit positiven gravimetrischen Residuen konnte der untersuchte Hamaret-Intrusivkomplex, der bislang als rein granitische Intrusion galt, als Intrusion mit bimodalem Gesteinscharakter mit Gabbros im zentralen Bereich und randlichen Graniten beschrieben werden. Dies bestätigt sowohl die Ergebnisse einer vorausgegangenen überwachten digitalen Klassifizierung von Fernerkundungsdaten, als auch die Interpretation von gravimetrischen Anomalien mit einem positiven Schwerehoch von 20 mGal für diese Intrusion.

2. Geologischer Überblick der Red Sea Hills - Sudan

Die Red Sea Hills sind Teil des präkambrischen Arabisch-Nubischen Schildes in Nordostafrika. Sie erstrecken sich von Ägypten über den Sudan bis nach Eritrea und verlaufen entlang des Roten Meeres. Das Arbeitsgebiet liegt in den Red Sea Hills südlich der Hafenstadt Port Sudan und erstreckt sich bis an die Grenze zu Eritrea.

Die tektonische Evolution der Red Sea Hills im Bereich des Gebeit- und Haya-Terranes kann besonders gut an der panafrikanischen (1100-450 Ma) Entwicklungsgeschichte der Nakasib-Sutur und der Oko-Scherzone erläutert werden. Nach ABDELSALAM & STERN (1993) werden sechs Entwicklungsstadien beschrieben, die einem Wilson-Zyklus entsprechen. Durch die Öffnung des Roten Meers im Oligozän vor 34 Ma wurden die präkambrisch angelegten Störungssysteme reaktiviert und stellen heute Blockgrenzen innerhalb der Terranes dar.

Die metamorphen Gesteinsassoziationen der Greenschist-Assemblage (VAIL, 1979; ALMOND, 1983) beinhalten zum großen Teil Vulkanite der Kalkalkali-Familie mit eingeschalteten Metasedimenten. In diese vulkano-sedimentären Serien sind eine große Anzahl von granitischen Gesteinen, Diorite und Gabbros unterschiedlichen Alters intrudiert. Ophiolitische Sequenzen liegen mehr oder weniger vollständig vor und sind bedeutende Indikatoren für Suturen und Reste ozeanischer Kruste.

Die magmatischen Ereignisse stehen im engen Zusammenhang mit der tektonischen Entwicklung. Die Intrusionen werden nach EMBLETON ET AL. (1983) und KLEMENIC & POOL (1988) mehreren Phasen zugeordnet. Mit einem Alter von 815-724 Ma intrudierten die als Batholithische Komplexe bezeichneten syn- bis spätektonischen Granite, die petrographisch Granodiorite bis Tonalite darstellen. Die nächste Phase wird durch die, als Jüngere Granite bezeichneten, posttektonischen Kalkalkali-Intrusionen mit Altersangaben von 715-515 Ma charakterisiert. Diese zwei magmatischen Phasen sollen entlang der Kontinentalränder während der Subduktion intrudiert sein. Neben diesen Phasen werden undeformierte anorogene Alkali-Intrusionen mit Altersangaben von 200 bis 30 Ma beschrieben. Durch Dehnungstektonik im Oligozän kam es zu basischem Vulkanismus in Depressionen und Grabenstrukturen. Diese zum Teil submarinen Vulkanite sind die jüngsten magmatischen Ereignisse in den Red Sea Hills.

Die Regionalmetamorphose erfolgte während der panafrikanischen tektono-thermalen Episode. Die verschiedenen Metamorphosegrade der präkambrischen Gesteine von höherer Amphibolitfazies mit Gneisen und Migmatiten bis niedriger Grünschieferfazies mit schwach metamorphen Konglomeraten und Vulkaniten bilden nach Meinung vieler Autoren lediglich verschiedene Stockwerke des kristallinen Basements (ALMOND ET AL., 1983).

3. Datenbasis und GIS

Der Einsatz von Geoinformationssystemen und digitalen Bildverarbeitungstechniken in den Geowissenschaften ermöglicht die Integration nicht redundanter thematischer Daten und Informationen. Die Verknüpfung von Fernerkundungsdaten des Erdbeobachtungssatelliten Landsat mit geophysikalischen Potentialfelddaten der Gravimetrie und Aeromagnetik, sowie die Einbindung der Geologie und Strukturgeologie, können nach dem Vorbild des Photointerpretationsschlüssels für ein weites Spektrum an Fragestellungen eingesetzt werden.

Grundlage der Datenbasis sind multispektrale Satellitenbilddaten des Thematic Mapper von Landsat, die flächendeckend zur Verfügung stehen. In den Küstenebenen des Roten Meeres waren keine wolkenfreien TM-Daten verfügbar, aus diesem Grund mussten ältere MSS-Daten des Landsat-3 integriert werden. Die einzelnen Satellitenbildszenen wurden radiometrisch und geometrisch korrigiert und zu einem Bildmosaik zusammengesetzt. Aus den Originaldaten wurden eine Reihe von Bildtransformationen, Filteroperationen und arithmetische Funktionen berechnet, die für verschiedene Fragestellungen eingesetzt werden. Diese Mosaik sind die Grundlage für die durchgeführten visuellen Interpretationen der Geologie und Strukturgeologie, deren Ergebnisse in digitaler Form in die Datenbasis eingingen. Die Ergebnisse der überwachten digitalen Klassifizierungen der Geologie wurden als zusätzliche Dateneben integriert.

Neben den Fernerkundungsdaten und den daraus abgeleiteten Daten wurden geophysikalische Karten der Geological Research Authority Sudan (GRAS) mit Einschränkungen zur Verfügung gestellt. Im Rahmen eines Explorationsprojektes wurden gravimetrische Karten der Bougueranomalie, der Residualanomalie und der Freiluftanomalie erstellt. Zusätzlich standen Residualanomalien aeromagnetischer Daten zur Verfügung (TECHNOEXPORT, 1974a; 1974b), die vollständig digitalisiert wurden.

Für die Georeferenzierung aller Datenebenen im GIS standen topographische Karten bereit, aus denen zusätzlich die Höhenlinien digitalisiert wurden, um Geländemodelle und perspektivische Modelle berechnen zu können. Daneben liegen weitere Karten und Daten vor, auf die hier nicht eingegangen werden soll.

Das Regionale Geoinformationssystem Red Sea Hills - Sudan umfasst über 500 Dateien und 65 Karten mit einem Datenvolumen von 4,6 Gbyte. Dies macht eine stringente Strukturierung der GIS-Architektur und aller Daten nötig (Bartelme, 1995).

4. Kontextuelle Methoden

Der Vorteil einer integrierten GIS-Datenmodellierung lässt sich exemplarisch an der Hamaret-Intrusion nahe der Ortschaft Derudeb zeigen. Diese Intrusion mit einem Durchmesser von 20 km galt als rein granitsche Intrusion, wie in den geologischen Karten des BRGM von 1974 angegeben (Abb. 1). Granitische Gesteine sind in dunkelgrauen Farben dargestellt, Metavulkanite und Syenite in Hellgrau.

Das optimierte Farbkompositenbild von Landsat-TM weist für den Bereich der Intrusion anomal dunkelblaue Farben auf, die nicht mit spektralen Signaturen granitischer Gesteine korrelieren. Bei der visuellen Interpretation des optimierten Farbkompositenbildes, hier als Grautonbild dargestellt (Abb. 2), wurden diese anomalen Signaturen, die für mafische und ultramafische Gesteine typisch sind, für eine Reihe weiterer Intrusivkörper festgestellt und stellen eine rein granitische Gesteinszusammensetzung in Frage.

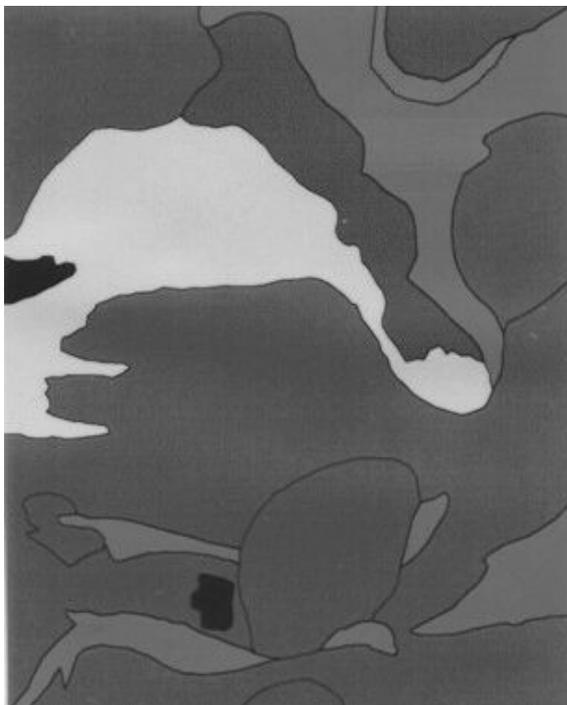


Abb. 1: Geologische Karte des BRGM im Bereich des Jebel Hamaret (Blockgröße: 30x40 km)

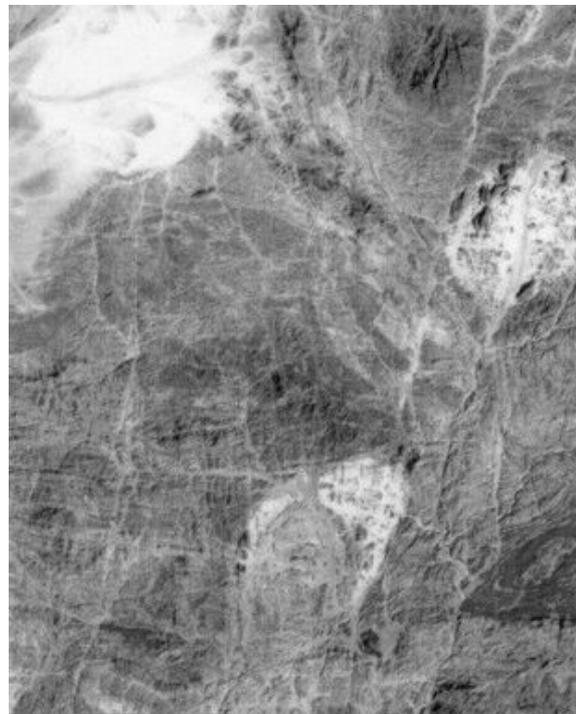


Abb. 2: Einkanaliges Grautonbild von Landsat-TM (Original in 7,4,1 in RGB) des Hamaret-Komplexes (Ausschnitt: 30x40 km)

Die im GIS aufbereiteten geophysikalischen Schweredaten stellen eine zusätzliche Daten- und Informationsquelle dar. Insbesondere die gravimetrischen Residualanomalien geben die Dichteverteilung in der oberen Kruste wieder und können für Aussagen über Störkörper sowie deren Form und Lage herangezogen werden. Ein Schwerehoch von 20 mGal ($200 \mu\text{m/s}^2$) für den zentralen Bereich der Hamaret-Intrusion (Abb. 3) deutet in den gravimetrischen Residuen auf mafische Gesteine mit hoher Dichte hin.

Das Ergebnis der visuellen Interpretation dient gleichzeitig als rechnerische Grundlage für die

Fragmentierung des Satellitenbildmosaiks. Bei der Fragmentierung werden räumliche Trennungen vorgenommen, um die Klassifizierungsgenauigkeiten zu erhöhen. In erster Linie dienen kontextuelle Informationen der Stratifikation komplexer Inhalte. Das wichtigste Kriterium ist die Beschreibung der Variationen von Objekten (HUTCHINSON, 1982). Abhängigkeiten zwischen Vegetation und Höhe, Böden und Geologie, Textur und Geologie und andere Informationen werden so eingebunden.

Auf Grundlage der visuellen Interpretation wird die Lithologie in verschiedene Gesteinsgruppen wie den quartären Lockersedimenten und Festgesteinen getrennt. Die Festgesteine, werden in Magmatite, Metavulkanite, Metasedimente und Vulkano-sedimentären Serien unterteilt und über die räumlichen Masken im GIS selektiert. Das Bildmosaik wird rechnerisch über die räumlichen Masken in Bildfragmente zerlegt. Die einzelnen Bildfragmente werden separat klassifiziert und abschließend im GIS rekombiniert.

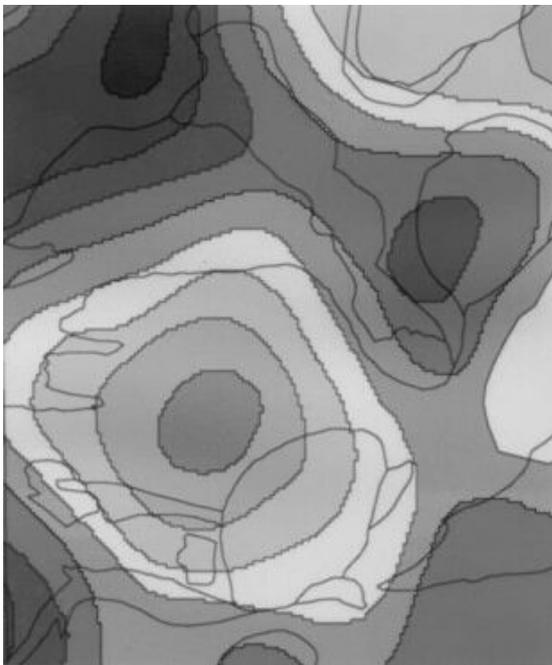


Abb. 3: Residualschwerehoch von 20 mGal im Zentrum der Hamaret-Intrusion mit überlagerten geologischen Grenzen (Blockgröße: 30x40 km)



Abb. 4: Ergebnis einer überwachten digitalen Klassifizierung der Geologie des Jébal Hamaret (Blockgröße: 30x40 km)

Durch Vergleiche der Bildstatistiken für ausgewählte Testgebiete bei der digitalen überwachten Klassifizierung der Geologie wird die Hamaret-Intrusion als Intrusion mit bimodalem Gesteinscharakter klassifiziert. Der Kern der Intrusion wird gabbroiden Gesteinen zugewiesen, die randlichen Bereiche den granitische Gesteinseinheiten (Abb. 4). Die Klassifizierungsgenauigkeiten (Produzentenrisiko -*producer accuracy*) werden für die Gesteinsklasse Granit-Diorit mit 88 % und für die Gesteinsklasse Gabbro mit 45 % angegeben. Die Kontingenz-Matrix weist für die magmatischen Gesteine eine Genauigkeit von 67 % aus.

Aufgrund der regionalen Größe des Arbeitsgebietes und der großen Klassenanzahl von 28

Klassen ist dies nicht nur eine hohe statistische Zuverlässigkeit, die Fragmentierung ermöglicht erst eine komplexe geologische Klassifizierung.

5. Zusammenfassung und Ausblick

In der vorgestellten Untersuchung konnten durch die Anwendung des Ebenenprinzips im GIS die Informationsebenen quasi auf das System Erde übertragen werden. Die Satellitenbilddaten stellen mit der Erdoberfläche die oberste Ebene dar, denen die geophysikalischen Potentialfelder für Strukturen des Untergrundes unterlagert sind. Die Verbindung zwischen diesen beiden Ebenen stellen die visuellen Interpretationen der Geologie und des Bruch- und Störungsmusters dar. Zusätzlich wurde eine überwachte Klassifizierung der Satellitenbilddaten in einer integrierten GIS- und Bildverarbeitungsumgebung durchgeführt, um über berechnete Klassifizierungsgenauigkeiten Aussagen über Zuverlässigkeiten der Interpretationsergebnisse und deren Korrelation mit geophysikalischen Störkörpern treffen zu können. Dieser erstmalig getestete Ansatz führte zu einer quantitativen Beurteilung der Ergebnisse durch Berechnung des Produzentenrisikos der Kontingenz-Matrizen, welches mit bis zu 90 % sehr gute Werte aufweist und in diesem Ansatz eine hohe statistische Zuverlässigkeit sieht (OTT, 2001).

Dieser methodische Ansatz, der in den Red Sea Hills des Sudan erfolgreich getestet wurde und eine Reihe neuer Erkenntnisse brachte, soll in den Zentralen Anden Chiles zum Einsatz kommen, um lithologische, strukturgeologische und lagerstättenkundliche Fragen zu untersuchen und geowissenschaftliche Kausalitäten zu erkennen.

Die zugrunde liegende Datenbasis umfasst flächendeckend Satellitenbilddaten von Landsat-TM und Landsat-ETM. Daneben liegen kompilierte Datensätze der Bouguer- und Residualschwere vor, sowie Daten der Magnetik und Aeromagnetik, die über Kooperationsverträge mit chilenischen Partnern eingebunden werden können. Die Potentialfelddaten werden rechnerisch aufbereitet und modelliert. Mit Methoden wie der Euler Dekonvolution, FFT und Berechnung von Krümmungsparametern sollen geophysikalische Anomalientrends akzentuiert werden. Erste Untersuchungen zeigen eine hohe Korrelation von gravimetrischen Anomalientrends und geologischen Strukturen (OTT ET AL., 2002)

Die kombinierte visuelle Interpretation unter Einsatz digitaler Techniken sind wichtige Voraussetzungen, um komplexe Fragen zum geologisch-tektonischen Bau der Anden sowie Beziehungen zur Genese von Rohstofflagerstätten zu beantworten. Ziel dieser Untersuchungen ist es, mögliche Korrelationen zwischen geophysikalischen Anomalien im Untergrund und geologischen Strukturen und Lagerstätten an der Oberfläche zu untersuchen.

6. Literatur

ABDELSALAM, M. G. & STERN, R. J. (1993): Timing of events along the Nakasib suture and the Oko shear zone, Sudan. - In: THORWEIHE, U. & SCHANDELMEIER, H. (eds.): Geoscientific Research in Northeast Africa. - p. 99 - 103, Rotterdam (Balkema).

ALMOND, D. C. (1983): The concepts of "Pan-African Episode" and "Mozambique Belt" in relation to the geology of East and North-East Africa. - Bull. Fac. Earth Sci., King Ab-

- dulaziz Univ. Jeddah, **6**, p. 71 - 87, Oxford.
- ALMOND, D. C., AHMED, F. & DAWOUD, A. S. (1983): Tectonic, metamorphic and magmatic styles in the northern Red Sea Hills of Sudan. - Bull. Fac. Earth Sci., King Abdulaziz Univ. Jeddah, **6**, p. 450 - 458, Oxford.
- BARTELME, N. (1995): Geoinformatik: Modelle, Strukturen, Funktionen. - 420 S., Berlin (Springer).
- EMBLETON, J. C. B., HUGHES, D. J., KLEMENIC, P. M., POOLE, S. & VAIL, J. R. (1983): A new approach to the stratigraphie and tectonic evolution of the Red Sea Hills, Sudan. - Bull. Fac. Earth Sci., King Abdulaziz Univ. Jeddah, **6**, p. 101 - 112, Oxford.
- HUTCHINSON, C. F. (1982): Techniques for combining Landsat and ancillary data for digital classification improvement. - Photogramm. Eng. remote sens., **48**, 1, p. 123 -130, Falls Church, VA.
- KLEMENIC, P. M. & POOLE, S. (1988): The geology and geochemistry of Upper Proterozoic granitoids from the Red Sea Hills, Sudan. - J. Geol. Soc. London, **145**, p. 635 - 643, London.
- OTT, N. (2001): GIS-Modellierung und Klassifizierung von geophysikalischen, geologischen und Fernerkundungs-Daten aus den südlichen Red Sea Hills (Sudan). - Berliner geowiss. Abh. (D), **15**, 131 S., Berlin.
- OTT, N., GÖTZE, H.-J, SCHMIDT, S., BURGER, H.& ALTEN, M. (2002): The Meta Geo-information System facilitates use of complex data related to Andes. - AGU, EOS, Vol. **83**, No. 34, 20. August 2002 (http://www.agu.org/eos_elec/020081e.html).
- TECHNOEXPORT (1974a): Final report. Complex geophysical studies of the Red Sea Hills area carried out in 1970-71. - Vol. **3**, 50 pp., Moskau (unpubl.).
- TECHNOEXPORT (1974b): Final report. Complex geophysical studies of the Red Sea Hills area carried out in 1970-71. - Vol. **8**, Maps, Moskau (unpubl.).
- VAIL, J. R. (1979): Outline of the geology and mineralization of the Nubian E of the Nile valley, Sudan. - Inst. Appl. Geol., Bull. **3**, 1, p. 97 - 107, Jeddah.

Geogefahren im Klostertal, Vorarlberg/Österreich - Analyse komplexer geologischer Gefährdung mit Mitteln der Fernerkundung

NADINE MAIBAUM¹, MATHIAS RÖHRING¹ & DIETRICH HELMCKE¹

Zusammenfassung: Durch die zunehmende Verdichtung des alpinen Lebens- und Wirtschaftsraums gewinnt die Analyse von Quellen geologischer Naturgefahren zunehmend an Bedeutung, wobei besonders Massenbewegungen von Interesse sind. Das Klostertal ist einerseits besonders durch Massenbewegungen, vor allem durch Muren, betroffen, andererseits verlaufen durch das Klostertal wichtige Fernverbindungen. Von daher treffen hier Gefährdung und Schadenpotential in besonderem Ausmaß zusammen. Im folgenden werden laufende Arbeiten vorgestellt, bei denen es gelingt, mit Feldarbeiten und der Auswertung von Fernerkundungsdaten die eigentliche, geologische Ursache eines ausgeprägten Murengbietes aufzuklären.

1. Problematik

Das Klostertal im Südosten Vorarlbergs/Österreich zwischen dem Oberrheintal und dem Arlberg nimmt in Bezug auf Massenbewegungen (Berg- bzw. Felsstürze und Muren) und den damit verbundenen "Naturgefahren" einen besonderen Stellenwert ein. Aufgrund des Bevölkerungszuwachses, des Wirtschaftswachstums, des zunehmenden Fremdenverkehrs und der alpinen Morphologie werden immer mehr Siedlungen, Betriebsstätten und Verkehrsträger in dem, durch Erosion gefährdeten, Talbereich angelegt. Die (versicherte) Wertdichte und das Schadenpotential steigen in diesem Bereich erheblich an. Im Klostertal liegt aufgrund seiner Lage und der damit verbundenen wichtigen Bedeutung für die Ost-West-Verkehrsverbindung eine sehr dichte und hochwertige Infrastruktur (Arlbergbahn, Schnellstraße (S16), Arlbergstraße) mit einem entsprechend hohen Schadenpotential vor.

Das Schadenpotential umfasst direkte und indirekte Schäden. Als direkte Schäden werden Schäden bezeichnet, die Personen, Gebäude, Infrastruktur und Sachgegenstände direkt betreffen. Indirekte Schäden sind unter anderem wirtschaftliche Schäden wie Infrastrukturausfälle bzw. -einbußen, Ernteauffälle und Imageeinbußen im Fremdenverkehr, Abnahme der Lebensqualität für die Bevölkerung und Kosten für Versicherungen.

Im Gegensatz zum Schadenpotential bleibt die Ereignishäufigkeit hingegen mehr oder weniger gleich. Es wird jedoch eine leichte rezente Zunahme der Ereignisse durch anthropogene und klimatische Einflüsse vermutet (siehe Abb. 1).

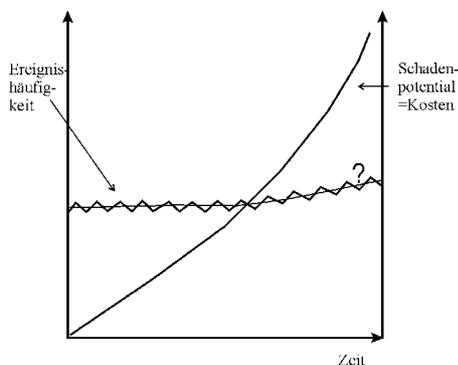


Abb. 1: Schadenpotential und Ereignishäufigkeit gegen die Zeit.

2. Massenbewegungen

Massenbewegungen besitzen im Allgemeinen zwei Mechanismen. Zum einen kommt es zu trockenen und \pm spontanen Bewegungen, wobei Gesteinsmaterial in Form von Berg- bzw. Felsstürzen in die gefährdeten Bereiche verlagert wird. Zum anderen wird bereits abgelagertes Lockermaterial, meist aus vorausgegangenen Berg- bzw. Felsstürzen oder Moränenmaterial, durch eine nasse Bewegung in Form einer Mure abtransportiert. Ursachen für Massenbewegungen sind neben Klima (Starkregenereignisse, Frost, Schneeschmelze, etc.) und anthropogenen Einflüssen vor allem Geologie und Morphologie. Eine wichtige Rolle spielen hierbei die Lagerungsverhältnisse der Schichten, felsmechanische Parameter, Hangneigung, Hangexposition und Höhenlage (z.B. Baumgrenze) des zu bearbeitenden Gebietes. Unter felsmechanischen Parametern werden die Ausbildung von Trennflächen (Störungen etc.), tektonische Beanspruchung, Verwitterungsverhalten und Festigkeit der Gesteine zusammengefasst.

3. Kloostertal

Das Kloostertal stellt ein sehr enges und steiles Tal dar, das parallel zum Alpenhauptkamm verläuft und sich mit einer Länge von etwa 30 Kilometern in Ost-West-Richtung vom Arlberg bis kurz vor Bludenz zieht (siehe Abb. 2).

Geologisch bildet das obere Kloostertal die Trennlinie zwischen dem Kristallin (Zentralalpine Verwall-Gebirgsgruppe = Oberostalpinen Kristallin) und den Nördliche Kalkalpen (Oberostalpine Decken), die aus Gesteinen der Trias bis zur Kreide aufgebaut sind. Diese geologische Trennlinie folgt einer Störungzone, die vom Stanzertal im Osten über den Arlberg bis in den Rätikon reicht. Bei Dalaas verlässt diese das Kloostertal, quert sie den Kristbergsattel und zieht südlich der Davenna-Gruppe in das Rellstal (Vandans) bis in den Rätikon.

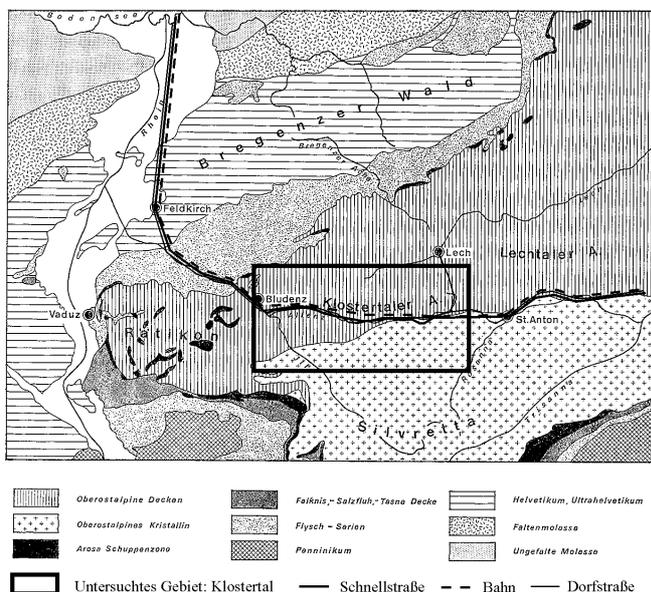


Abb. 2: Geologische Übersichtskarte des bearbeiteten Gebietes (nach HELMCKE, 1974)

Die nördliche Talflanke des Kloostertals besitzt aufgrund der Wechsellagerung unterschiedlich kompetenter Schichten der Kalkalpen (Karbonate, Sandsteine, Tonschiefer, Rauhwacken und Gipse) und der eiszeitlichen Überprägung ein sehr stark ausgeprägtes, stufiges und übersteiltes Relief und wird von zahlreichen Tobeln zerfurcht. Das vorliegende Hochgebirgsklima

fördert eine schnelle Erosion und stellt reichlich Niederschläge zum Abtransport des Verwitterungsmaterials zur Verfügung, was zu einer hohen Aktivität der geomorphologischen Prozesse führt. Dieses ist auch der Grund für die zahlreich auftretenden Massenbewegungen auf der nördlichen Talseite.

4. Geologische Ursachen

Begünstigt wird die Ablösung des Gesteinsmaterials durch \pm EW streichende Trennflächen. An diesen geht die Zugfestigkeit des Gesteinskörpers gegen 0, was bedeutet, dass sich das Gestein aus dem Verbund löst, sobald an der Basis das Widerlager erodiert wird. Somit stellen die Gesteine hangab den einzigen Halt dar, bis diese z.B. durch die Vorflut erodiert werden. Dieses geschieht im Bereich Braz. Dort weicht der Hang erosiv bis auf eine NW-SE streichende Trennfläche (Abb. 3, A) zurück, um dann entlang dieser nach NW, beziehungsweise SE den Hangabtrag fortzusetzen (Abb. 3, B). So entsteht eine kastenförmige Talausbuchtung. Ist der Hang bis auf die Trennfläche freigelegt, stabilisiert sich dieser in Form von nur noch kleineren Abbrüchen. Mit der Erkenntnis dieses Prozesses anhand von Fernerkundungsdaten ist eine langfristige Voraussage über die weitere Gefährdungsentwicklung möglich.

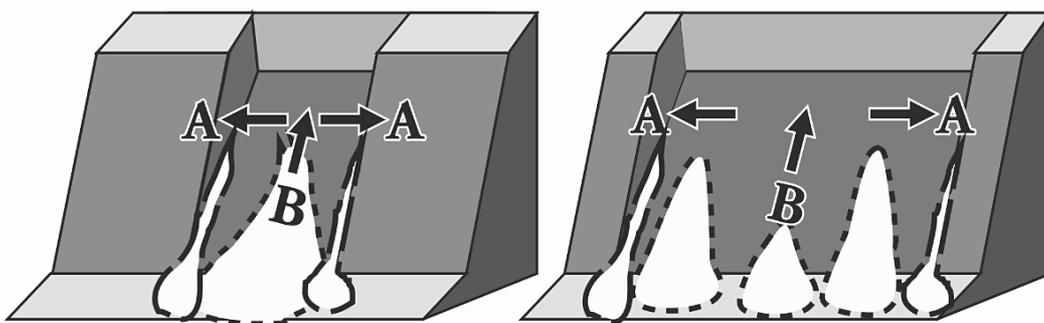


Abb. 3: Entwicklung der Erosion bei Braz; Digitales Höhenmodell (DHM) (BUNDESAMT FÜR EICH- UND VERMESSUNGSWESEN, 2001).

Besonders im Bereich des Hauptdolomits (obere Trias) führt eine starke Verwitterung des Gesteins zu einer erhöhten Berg- bzw. Felssturzaktivität. Es kommt zur Ausbildung großer Hangschuttreißen, deren Lockermaterial bei Starkregenereignissen bzw. bei einer erhöhten Schneeschmelze in Form von Muren mobilisiert und so in die Gefahrenzonen verlagert werden kann. Der Hauptdolomit stellt unter bestimmten Vorraussetzungen sehr schnell große Mengen an Material zur Verfügung, wenn er in ein hangerosives Umfeld gelangt. Der Dolomit, der sich bei tektonischer Beanspruchung, unter Abwesenheit von Fluiden, kaum duktil verformen lässt, wurde aufgrund früherer Deformationen stark zerbrochen und kataklasiert. Dieser Kataklastit besitzt eine stark herabgesetzte Zug- und Druckfestigkeit, weshalb diese Gesteine ausgeprägte Hangschuttmassen ausbilden können, wenn sie der rezenten Erosion ausgesetzt werden.

Gebiete unterhalb des Muschelkalks (untere Trias) und der Arlberg-Schichten (Karbonate der mittleren Trias), die morphologisch oft fast senkrechte Wände ausbilden, sind hingegen meist direkt von Berg- bzw. Felsstürzen betroffen und gefährdet.

Es werden ingenieurtechnische und forsttechnische Methoden angewandt, um eine Erosion zu mindern oder um die Schadwirkung von Muren zu reduzieren. Dabei fließen bisher vor allem Erfahrungswerte ein, die auf Schadenanalysen früherer Ereignisse beruhen. Bisher nicht in Erscheinung getretene Gefahren werden hierbei allerdings nicht berücksichtigt.

5. Fernerkundungs-Methoden

Diese zu analysieren setzt eine intensive geologische Erkundung mit allen Mitteln der Feldgeologie (Kartierung, Gefügeanalyse, Fernerkundung etc.) voraus. Für die Auswertung bestimmter, potentiell gefährdeter Bereiche des Klostertals werden Luftbilder, Orthofotos, Satellitenbilder und DHM genutzt. Luftbilder und Orthofotos geben kleinräumige und detailliertere Informationen über Geologie, Morphologie, historische Ereignisse und das Ausmaß der historischen Ereignisse. Satellitenbilder und DHM geben hingegen Auskunft über großräumige Strukturen. Aus diesen können folgende Informationen gewonnen werden:

- Luftbild und Orthofotos: Trennflächen (Störungen, Abrisskanten etc.), relative Lagerungsverhältnisse der Schichten, teilweise Lage und Ausmaß des Lockermaterials, Größe der Einzugsgebiete, relative Hangneigung, Hangexposition, Kulturflächenverbreitung, Baumgrenze, Ausmaß historischer Ereignisse (alte Schwemmfächer etc.)
- Satellitenbilder: Trennflächen, Größe der Einzugsgebiete, Kulturflächenverbreitung, Ausmaß großer historischer Ereignisse
- DHM: Trennflächen, Größe der Einzugsgebiete, Ausmaß großer historischer Ereignisse, Hangexposition

Die Fernerkundung stellt somit eine wichtige Ergänzung zur Geländearbeit dar. Auf diesem Weg können sehr effizient potentielle Gefährdungszonen für Siedlungen und Infrastruktur ausgewiesen und Maßnahmen zum Schutz der Bevölkerung, Kulturflächen und Infrastruktur getroffen werden.

6. Zusammenfassung

Trotz zahlreich auftretender Massenbewegungen im alpinen Raum werden diese erst dann zu "Naturgefahren", wenn der Mensch davon betroffen ist und Schäden eintreten. Schutzmaßnahmen und genauere Untersuchungen werden meist erst dann ergriffen bzw. durchgeführt, wenn sich bereits Naturgefahren ereignet haben. Es wäre jedoch sinnvoller, Gebiete, die noch nicht besiedelt sind aber aufgrund des zunehmenden Siedlungsdrucks in die

Talregionen vermutlich in Zukunft besiedelt werden, vorsorglich zu untersuchen und vorzeitig potentielle Gefahrenbereiche bzw. Meidungsgebiete auszuzeichnen. Die dafür notwendigen Untersuchungen bestehen aus intensiven Geländebegehungen und einer ausführlichen Ausarbeitung und Interpretation von Fernerkundungsdaten, besonders in Bezug auf Luftbilder und Orthofotos. Zusätzlich dienen Satellitenbilder, DHM und alte geologische Karten als Informationsquellen. Hieraus ergeben sich Informationen über Geologie, Morphologie, Ausmaß bzw. Größe und Verlauf eines historischen Ereignisses. Teilweise können sogar quantitative Aussagen über mögliche Ereignisse und Abschätzungen über das mögliche Schadenausmaß getroffen werden. Im Bereich von Braz ist es gelungen, die eigentliche Ursache und Erosionsraumgeometrie mittels Fernerkundungsdaten zu ermitteln, was bisher in diesem Bereich nicht so genau bekannt war. Damit können auch langfristige Gefährdungsprognosen getroffen werden.

Literaturverzeichnis

- HELMCKE, D. (1974): Geologie der südlichen Klostertaler Alpen: Erläuterungen zur geologischen Karte der südlichen Klostertaler Alpen 1:25000.-Geol. et Paläont., **8**, S. 131-147.
- BUNDESAMT FÜR EICH- UND VERMESSUNGSWESEN (2001): Digitale Daten für Österreich.- Software: Austrian Map, Wien.

Geo-Referenzierung der Daten vom Mikrosatelliten BIRD

MICHAEL CONRADT¹, T. P. SRINIVASAN², OLAF SAKOWSKI³

Zusammenfassung: Der experimentelle Mikrosatellit BIRD (Bi-spectral Infrared Detection) ist mit drei Zeilenscannern für den nahen, mittleren und thermalen Infrarotbereich zur wissenschaftlichen Feuerfernerkundung ausgestattet. Neben der Entwicklung und Demonstration von neuen Technologien ist das Hauptziel der Mission die Klassifizierung von Hochtemperaturereignissen mit Hilfe der Bi-Spektral-Methode. Dafür ist eine subpixel-genaue Co-Registrierung der Bilddaten Hauptvoraussetzung. Ein weiteres Ziel ist die Erzeugung von thematischen Karten, wofür eine Geo-Referenzierung der Bildszenen erforderlich ist. Der Satellit BIRD ist mit einem GPS-basierten Navigationssystem sowie einem Attitude Control System mit Laserkreisel und zwei Sternsensoren ausgestattet. Anhand der Onboard gemessenen Lagedaten kann das Flugverhalten des Satelliten rekonstruiert werden, wodurch eine automatisierte direkte Geo-Referenzierung möglich wird. Die Validierung der Ergebnisse wird mittels Passpunkten indirekt vorgenommen. Dieser Beitrag soll einen Überblick über die Verfahrensweise der direkten Geo-Referenzierung bei BIRD geben.

1 Der Mikrosatellit BIRD

1.1 Allgemeines zur Mission BIRD

Feuer üben einen großen Einfluss auf das Ökosystem der Erde aus, der jedoch aufgrund unzureichender Messdaten noch ungenügend erforscht ist. Mit der DLR-Mikrosatellitenmission BIRD (Bi-spectral Infrared Detection) wird erstmals eine neue Generation von Infrarotsensoren in Kombination mit einer modifizierten WAOSS-Kamera (Weitwinkel-Stereo-Kamera für die Mars-96-Mission) im Weltraum erprobt, die auf Feuerfernerkundung zugeschnitten ist.

BIRD wurde am 22. Oktober 2001 erfolgreich als sekundäre Nutzlast von 95 kg mit der indischen Rakete Polar Satellite Launch Vehicle (PSLV-C3) in einen kreisförmigen sonnensynchronen Orbit von 572 km Höhe gestartet. Er liefert seitdem Bilddaten von Hochtemperaturereignissen (HTE), wie Vegetationsfeuern, Vulkanausbrüchen, Kohleflöz- und Torfbränden. Die mit BIRD erzielten Ergebnisse werden ihren Eingang in zukünftige operationelle Systeme zur Feuerfernerkundung der Erde finden, wie sie derzeit in der europäischen Raumfahrtagentur ESA diskutiert werden.

1.2 BIRD-Hauptnutzlast und Missionsziele

BIRD ist mit drei Pushbroom-Zeilenscannern für den nahen, mittleren und thermalen Infrarotbereich ausgestattet worden, die Bilddaten von HTE liefern (siehe Tab. 1 und Abb. 1). Mit Hilfe der Bi-Spektral-Methode (DOZIER, 1981) ist es nicht nur möglich Feuer zu detektieren, sondern auch qualitative Aussagen über die Feuertemperatur und -fläche sowie über die freigesetzte Energie zu treffen. Dabei können Feuer, die flächenmäßig kleiner als ein Bodenpixel sind, erkannt und nach der Bi-Spektral-Methode werden. So wurde ein Testfeuer von 4 m² Größe eindeutig detektiert und verifiziert.

¹Dipl. Ing. Michael Conradt, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Rutherfordstraße 2, 12489 Berlin, e-mail: Michael.Conradt@dlr.de

²T.P. Srinivasan, Space Applications Centre, ISRO, Ahmedabad – 380 015, India

³Dipl. Ing. Olaf Sakowski, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Rutherfordstraße 2,

Tab. 1: Technische Parameter der BIRD Nutzlast (BRIß 2001)

	WAOSS-B	MWIR	LWIR
Wellenlänge	600-670nm 840-900nm	3.4-4.2µm	8.5-9.3µm
Brennweite	21.65mm	46.39mm	46.39 mm
Öffnungswinkel	50°	18.8°	18.8°
Sensor	3 CCD- Zeilen	CdHgTe-Arrays	CdHgTe-Arrays
Sensorkühlung	passiv, 20°C	Stirling, 90K	Stirling, 80K
Pixelgröße	7µmx7µm	30µmx30µm	30µmx30µm
Pixelanzahl	2880	2x512 gestaggert	2x512 gestaggert
Wertebereich	11bit	14bit	14bit
Bodenpixelgröße	185m	370m	370m
Schwadbreite	533km	190km	190km

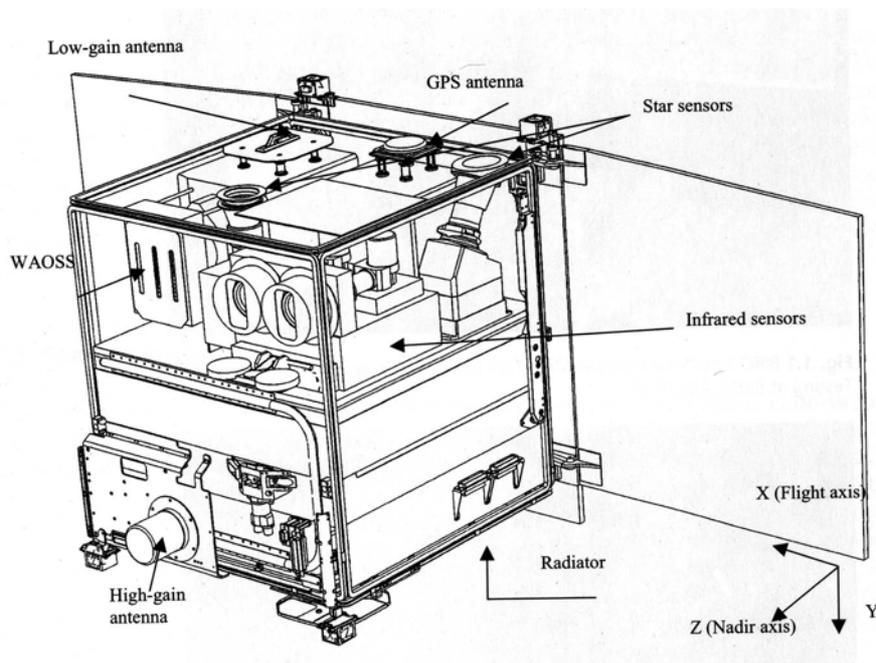


Abb. 1: Flugkonfiguration der Nutzlast des Mikrosatelliten BIRD (GILL 2002)

Für die Bispektral-Methode ist es notwendig, eine Pixel-Co-Registrierung zwischen den einzelnen Kamerabildern im Subpixelbereich durchzuführen. Dafür werden die Messwerte der geometrischen Laborkalibration (SCHUSTER 2000) von BIRD benutzt, bei der die Bildsensoren relativ zur WAOSS-Kamera eingemessen wurden (siehe Abb. 2).

Ein weiteres wichtiges Missionsziel ist neben der Detektion auch die Lokalisation von HTE in einem gebräuchlichen geodätischen Kartenkoordinatensystem, wie z.B. UTM (Universal Transversal Mercator Projection). Dies wird durch eine direkte Geo-Referenzierung der Bild-

daten von BIRD erreicht, bei der zu jedem Bildpixel der korrespondierende Ort in der Karte berechnet wird. Dazu sind Onboard-Messungen der Lagedaten des Satelliten notwendig, um die absolute Orientierung des Satellitenkoordinatensystems gegenüber einem erdfesten Referenzsystem zu berechnen.

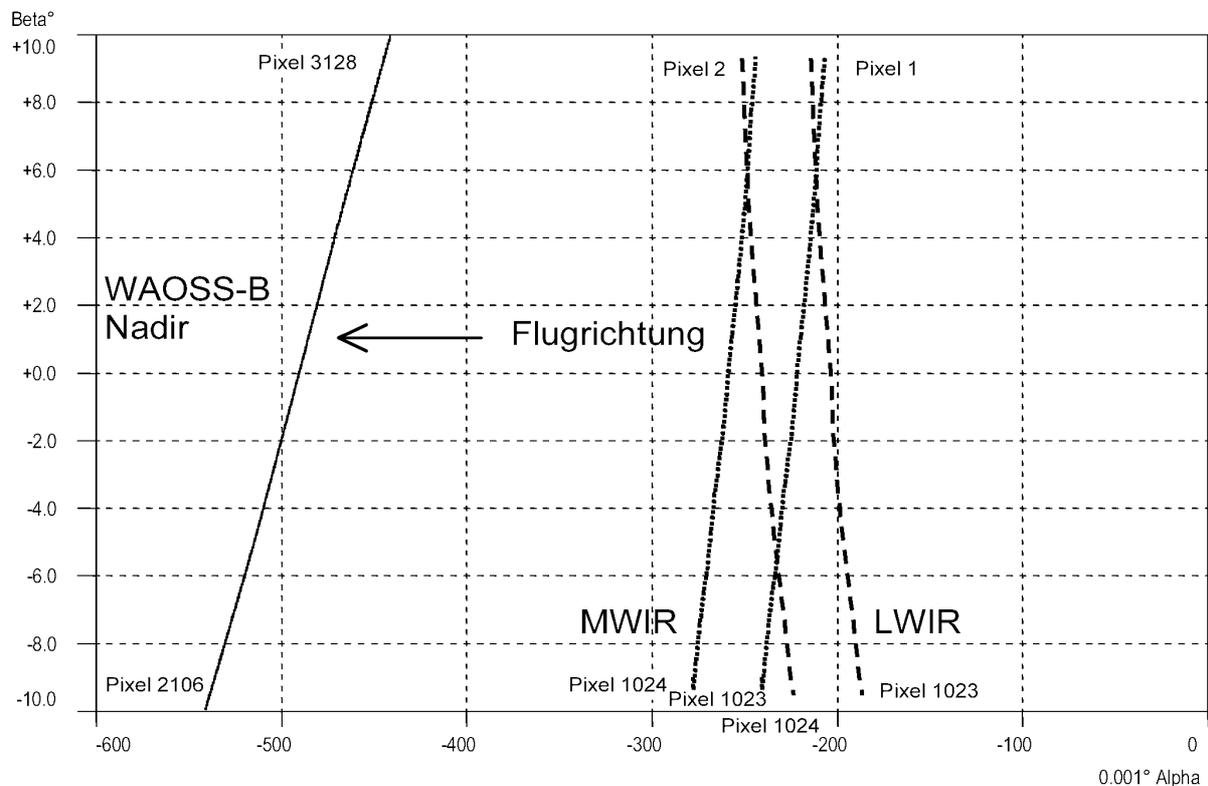


Abb. 2: Lage der Sensorzeilen im Objektraum aus Labor-Kalibrationsmessungen ermittelt

2. Erfassung und Aufbereitung der Lagedaten

2.1 Das Onboard Navigations- und Lagekontrollsystem

Der Mikrosatellit BIRD ist mit einem GPS-gestützten autonomen Navigationssystem ONS (Onboard Navigation System) ausgestattet, das eine Echtzeit-Bestimmung der Satellitenposition im WGS 84 (World Geodetic System 1984) und eine Prädiktion der Satellitenbahn ermöglicht. Das ONS übergibt dem Bordrechner den Positionsvektor und ermöglicht zusätzlich eine Zeitsynchronisation mit der GPS-Zeit. Die Standardabweichung der Positionsdaten beträgt $\pm 5\text{m}$ bei aktuell verfügbaren GPS-Messungen und dynamischer Filterung. Bei der Flugbahnvorausberechnung mittels sogenannten Twoline-Elementen (GILL 2002) liegt die Genauigkeit bei $\pm 100\text{m}$ innerhalb von 2 Stunden.

Als Referenzsystem für die Geo-Referenzierung wird das WGS 84 als erdfestes Koordinatensystem verwendet. Neben dem Positionsvektor ist auch die Bestimmung der Orientierung des Satelliten im WGS 84 notwendig. Die dafür notwendigen Messwerte liefert das Lagekontrollsystem ACS (Attitude Control System), das mit zwei unabhängigen Sternsensoren und einer Inertialen Messeinheit IMU (Inertial Measurement Unit) mit einem dreiachsigen Laserkreisel ausgestattet ist. Als Aktoren für die Lageregelung sind im Satelliten vier Präzisi-

onsdrallräder angebracht, die eine Drei-Achsen-Stabilisierung gewährleisten und zur Drehung des Satelliten benötigt werden.

Die Sternsensoren liefern als Messwerte die Orientierung ihres eigenen Koordinatensystems gegenüber dem ICRF (International Celestial Reference Frame) in Form von Quaternionen, die inhaltlich mit Rotationsmatrizen gleichzusetzen sind. Das ICRF ist definiert über den mittleren Äquator und den mittleren Frühlingspunkt zur Epoche J2000 und ist am Fixsternhimmel dieser Epoche orientiert. Die Orientierungsmessgenauigkeit der Sternsensoren wird besser als auf 10 Bogensekunden angegeben. Aufgrund von Sichtfeldabdeckungen durch die Erde oder wegen der Blendung durch Sonnenstrahlung oder deren Reflexionen an der Erde kann der Fall eintreten, dass die Sensoren keine kontinuierlichen Daten liefern. Die resultierenden Datenlücken können mit den relativen Orientierungsdaten der Laserkreismessungen ausgefüllt werden (siehe Abb. 3). Diese liegen auch in Form von Quaternionen vor, die einem Rauschanteil von kleiner als 72 Bogensekunden und einer Drift von 1° pro Stunde unterliegen. Die Drift und der Offset zu den Sternsensor-Quaternionen können für den Zeitraum der Parallelmessungen der Sternsensoren und der Laserkreisel berechnet und als Korrekturwert an die ACS-Quaternionen angebracht werden.

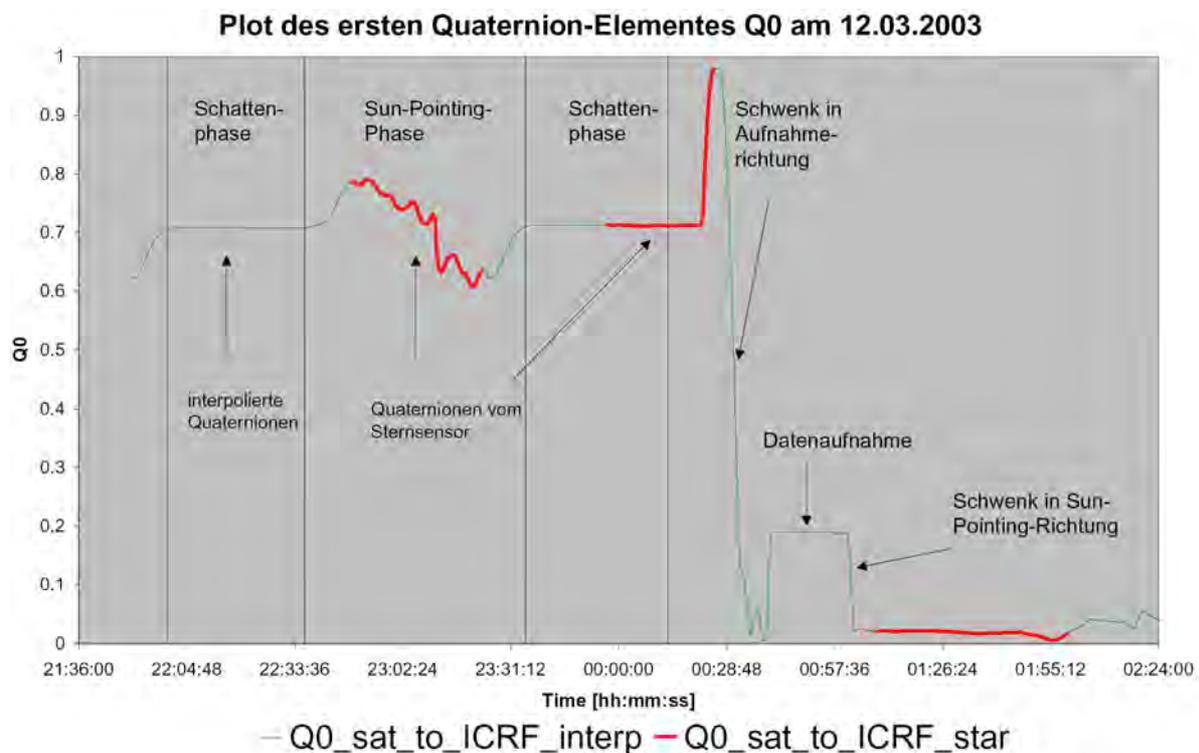


Abb. 3: Erstes Element der Satelliten-Quaternionen mit interpolierten Bereichen

2.2 Transformation der Orientierungsdaten in das WGS 84

Der Übergang der Orientierung vom raumfesten Bezugssystem ICRF in das erdfeste WGS 84 findet über zusammengesetzte Rotationstransformationen statt, die für die entsprechenden Zeitpunkte berechnet werden. Dabei werden die Präzession, die Nutation und die Rotationschwankungen der Rotationsachse der Erde berücksichtigt sowie die Polbewegung gegenüber dem WGS 84 und der Stundenwinkel der des Greenwich Meridians. Die notwendigen Rotationsparameter werden vom IERS (International Earth Rotation Service) zur Verfügung ge-

stellt. Über die Tageszeit im UT1 (Universal Time 1, SEEBER 1989) Zeitsystem wird der Stundenwinkel der Erde berechnet und somit ihre Eigenrotation berücksichtigt. Dazu ist es notwendig, die zu den Messwerten angegebene UTC (Coordinated Universal Time) über die Rotationsparameter der Erde ins UT1 Zeitsystem umzurechnen.

Die Quaternionen $Q_{\text{Starnsensor}}^{\text{ICRF}}$ vom Sternsensor geben die Transformation vom Koordinatensystem des Sternsensors in das ICRF an. Um dessen Orientierung im WGS 84 zu erhalten, sind die Sternsensor-Quaternionen links zu multiplizieren mit der Quaternion $Q_{\text{ICRF}}^{\text{WGS84}}(t)$, die die Transformation vom ICRF in das WGS84 darstellt und die Rotationseffekte der Erde berücksichtigt. Die Quaternion $Q_{\text{ICRF}}^{\text{WGS84}}(t)$ ist eine zusammengesetzte zeitabhängige Transformation über verschiedene Koordinatensysteme, die in SRINIVASAN 2003 ausführlicher beschrieben sind. Da das Referenzsystem der Kamera-Kalibrationsmessungen das WAOSS Kamera-Koordinatensystem ist, wird die Transformation $Q_{\text{WAOSS}}^{\text{Starnsensor}}$, welche die Ausrichtung dieser Kamera zum Sternsensor angibt, durch Multiplikation von rechts an die Sternsensor-Quaternion angebracht. Das Ergebnis ist die Orientierung des Kamerakoordinatensystems der WAOSS Kamera bezüglich des WGS 84 und stellt somit die Transformation zwischen beiden Systemen dar.

$$Q_{\text{WAOSS } t}^{\text{WGS84}} = Q_{\text{ICRF}}^{\text{WGS84}}(t) \cdot Q_{\text{Starnsensor } t}^{\text{ICRF}} \cdot Q_{\text{WAOSS}}^{\text{Starnsensor}} \quad (1)$$

2.3 Interpolation der Lagedaten für jede Bildzeile

Nach der erfolgten Transformation der Lagedaten in das Bezugssystem WGS 84 ist es notwendig, eine Interpolation der im 2-Sekunden-Abstand vorliegenden Daten für die Zeitpunkte der Aufnahmen der einzelnen Bildzeilen durchzuführen. Die Startzeit wird der Struktur der Bilddaten entnommen und wird für jede nachfolgende Zeile jeweils um die Sampling-Zeit der Kamera erhöht. Für die Orientierungsdaten wird eine lineare Interpolation benutzt, und die Positionsdaten werden auf einem Ellipsenbogen interpoliert. Als Ergebnis entsteht der komplette Lagedatensatz für eine Bildszene.

3 Die direkte Geo-Referenzierung

3.1 Berechnung der Bodenpixel-Koordinaten

Bei der Geo-Referenzierung wird für jedes Sensorpixel einer Bildzeile mit Hilfe der Lage- und Kalibrationsdaten ein Blickstrahl berechnet, für den ein Schnittpunkt mit der Erdoberfläche bestimmt wird. Die Schnittpunktberechnung erfolgt mit einem Raytracing-Algorithmus. Dabei kann die Oberfläche durch ein Referenzellipsoid sowie einem damit verknüpften digitalen Geländemodell (DGM) beschrieben werden. Die Schnittpunktkoordinaten werden im WGS 84 als kartesische Koordinaten berechnet und in das jeweilige Karten-Koordinatensystem transformiert. Sie können in einer Schnittpunktdatei gespeichert werden, die dazu benutzt wird, um sich zum Rohbild die entsprechenden Bodenpixelkoordinaten anzeigen zu lassen oder um Rechenzeit bei der Erstellung verschiedener Karten der selben Szene zu sparen. Zur Zeit sind die Transformationen in ellipsoidische Polarkoordinaten, UTM und Polykone Koordinaten implementiert. Die Projektionsart hängt vom Bezugssystemen der jeweils benutzten Referenzkarte ab.

3.2 Geo-Kodierung der Bilddaten

Nach erfolgter Geo-Referenzierung können Rasterkarten durch Geo-Kodierung der Rohbilder erzeugt werden. Die in Kartenkoordinaten vorliegenden Schnittpunkte werden dazu mit ihren dazugehörigen Messwerten, das können Grauwerte oder Temperaturen sein, in eine Rasterkarte eingetragen. Deren Abmessungen werden aus der Bodenpixelgröße der Sensoren und den Kartenkoordinaten der Eckpunkte der Bildszene ermittelt. Das Ergebnis ist ein Rasterbild, welches das geo-referenzierte Rohbild oder einen Ausschnitt dessen enthält und in dem sich für jedes Pixel die Kartenkoordinaten aus den Bildkoordinaten über einen gegebenen Offset und Maßstab berechnen lassen. So entsteht zu jedem Bildkanal einer Szene eine Rasterkarte.

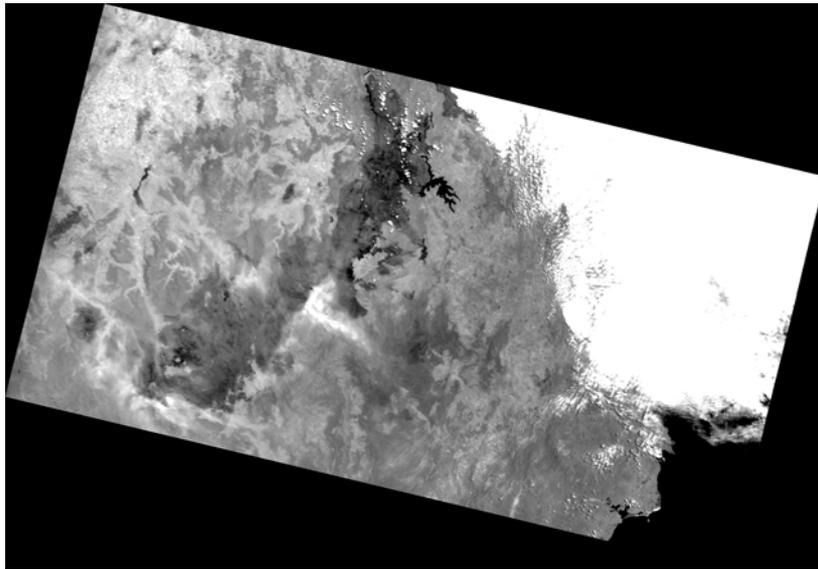


Abb. 4: Geokodierte Teilszene WAOSS-B Nadir vom 28.01.2003 über der Ostküste Australiens

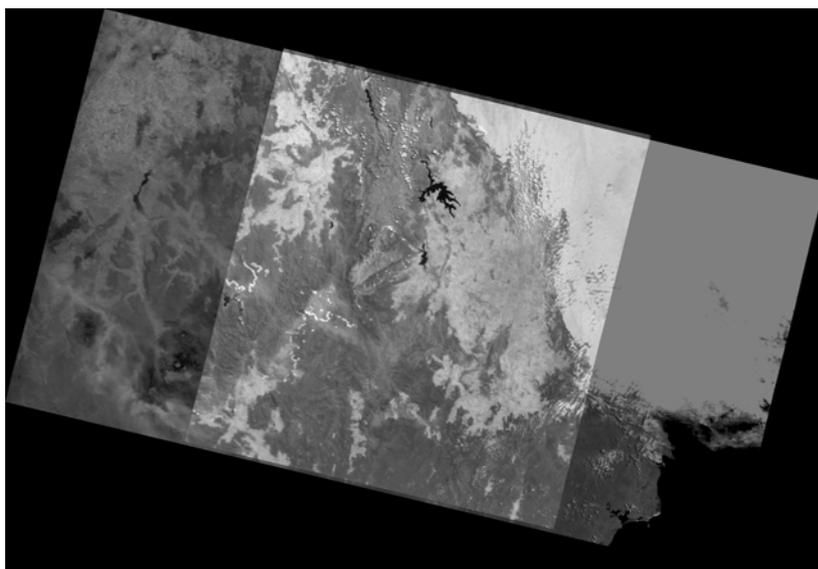


Abb. 5: Co-registrierte Geokodierte Teilszene WAOSS-B Nadir und MWIR vom 28.01.2003

3.3 Pixel-Co-Registrierung der Scannerdaten

Werden die Bilddaten der drei Kameras in ein identisches Kartenraster geo-kodiert, können sie in verschiedenen Bildebenen übereinandergelegt werden. Mit geeigneten Kalibrationsdaten kann so im Geo-Referenzierungsprozess eine Pixel-Co-Registrierung erzeugt werden. Sie ist dann erreicht, wenn alle übereinanderliegenden Bildabschnitte dieselben Objekte zeigen. Damit werden ideale Voraussetzungen für eine nachfolgende Analyse mit der Bi-Spektral-Methode geschaffen. Es hat sich gezeigt, dass sich die Messungen der Laborkalibration von den realen Kameraausrichtungen effektiv um ein bis zwei Pixelgrößen unterscheiden. Die Ursachen liegen wahrscheinlich an den physischen Belastungen des Satelliten beim Start und thermischen Effekten. Mit manuellen oder automatischen Bildzuordnungsverfahren können die Kalibrationsdaten angepasst werden.

3.3 Validierung der Lagedaten und deren Verbesserung

Die Validierung der Direkten Geo-Referenzierung erfolgt durch die Bestimmung von Passpunkten mit Hilfe geeigneten Kartenmaterials. Es werden dabei identische Objekte sowohl im Rohbild als auch in der topographischen Karte bestimmt und deren Koordinaten aus der Geo-Referenzierung mit den Soll-Koordinaten verglichen. Dabei sind Abweichungen gegenüber der Karte bis zu 25 km beobachtet worden. Ziel ist es, eine absolute Ortsanbindung der Bilddaten auf eine Genauigkeit von 500 m und besser zu erreichen. Dafür wurde ein Verfahren entwickelt, um die Lagedaten unter der Verwendung der Methode der kleinsten Quadrate zu verbessern. Die Verbesserung wird durch Anbringen einer weiteren konstanten Rotations-Transformation auf den gesamten Lagedatensatz erzielt. Dafür ist es notwendig, mindestens einen Passpunkt, besser aber zwei bis fünf Pass- sowie weitere Kontrollpunkte, zu definieren. Die Genauigkeitssteigerung hängt dabei im wesentlichen von der Qualität der Passpunktdefinition ab und kann eine Standardabweichung von kleiner als $\pm 200\text{m}$ erreichen.

Eine weitere praktizierte Methode zur Validierung besteht in der indirekten Geo-Referenzierung der Bilddaten. Dabei wird die Aufnahmegeometrie eines Zeilenscanners mit einer Bündelblockausgleichung anhand von Passpunkten rekonstruiert. Die Minimalanforderungen werden mit mindestens 6 definierten Passpunkten erfüllt, optimale Ergebnisse erzielt man aber erst mit mehr als 10 Punkten. Diese Methode ermöglicht eine Ortsanbindung der Bilddaten auf eine Genauigkeit von $\pm 130\text{m}$ Standardabweichung, ohne auf direkt gemessene Lagedaten zurückgreifen zu müssen und bietet somit eine unabhängige Kontrollmöglichkeit. Die so erzeugten indirekt geo-kodierten Rasterdaten lassen sich mit automatischen Bildzuordnungsalgorithmen auf Widersprüche zu den aus der direkten Geo-Referenzierung entstandenen Karten untersuchen (SAKOWSKI, O. 2003).

4 Zusammenfassung und Aussichten

Die Genauigkeit der automatisierten direkten Geo-Referenzierung kann im Bereich bis zu einigen Kilometern liegen und ist damit um ein Vielfaches von der erforderlichen Genauigkeit von 500 m entfernt. Mit der indirekten Methode der Bündelblockausgleichung können unabhängige hochgenaue Vergleichsdatensätze geschaffen werden, mit denen sich die direkte Geo-Referenzierung qualitativ bewerten lässt. Ziel ist es, durch statistische Auswertungen

zahlreicher Datensätze grobe, systematische und zufällige Fehler zu erfassen und zu klassifizieren. Dabei ist es wichtig, die Fehlerursachen zu bestimmen und Methoden zu entwickeln, um Fehlereinflüsse korrigieren zu können.

In Erweiterung der ursprünglichen Aufgabenstellung ist zu prüfen, ob das Konzept des Einsatzes eines sogenannten Template-Matching-Algorithmus bei der automatisierten Geo-Referenzierung sinnvoll wäre, um eine Genauigkeitssteigerung zu erreichen. Dabei könnten in direkt geo-kodierten Rasterdaten Passpunkte anhand von Bildausschnitten vorhergehender Szenen, den sogenannten Templates, bestimmt werden. Mit diesen Passpunkten könnte eine weitere automatische Verbesserung der geo-kodierten Rasterdaten durch affine Transformationen erfolgen.

5 Literaturverzeichnis

- BRIEß, K. 2001: BIRD Spacecraft Description Vol 1., General Spacecraft Description, Technische Dokumentation des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V., Berlin.
- DOZIER, J. 1981: A method for satellite identification of surface temperature fields of Sub-pixel Resolution. Remote Sensing of Environment Vol. 11: 221-229
- FRICTH, D., STALLMANN, D. 2000: Rigorous photogrammetric processing of high resolution satellite imagery, In ISPRS. Vol. XXXIII, part B1, commission I, pp. 313-321, ISPRS Congress, Amsterdam.
- GILL, E., MONTENBRUCK, O. 2002: The Onboard Navigation System for the BIRD Small Satellite, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Oberpfaffenhofen.
- MONTENBRUCK, O. 2000: Quaternion Representation of BIRD Orientation and Reference System Transformation, Forschungsbericht des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V., Oberpfaffenhofen.
- SAKOWSKI, O. 2003: , Vergleich direkter und indirekter Methoden zur Georeferenzierung von Satellitenbildern, Diplomarbeit an der Fachhochschule Oldenburg, Ostfriesland und Wilhelmshaven, Fachbereich Bauwesen und Geoinformation.
- SCHUSTER, R., HUNDERTMARK, D. 2000: BIRD Payload Kalibration, Dok. Nr. SP-BIRD-4600-WP/005, Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V., Berlin.
- SEEBER, G 1989: Satellitengeodäsie: Grundlagen, Methoden u. Anwendungen, de Gruyter, Berlin; New York,.
- SRINIVASAN, T. P., CONRADT, M. 2003: Technical Report on Geo-referencing of data from BIRD satellite and in-flight performance evaluation, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Berlin.

Parallelisierung und Automatisierung bei der Verarbeitung von 3-Zeilen-Scannerdaten

FRANK SCHOLTEN¹, KLAUS GWINNER²

Abstract: Digital Sensors are the ideal prerequisite for photogrammetric purposes within automated digital processing lines. They complete the digital process chain from data acquisition up to the generation of high-quality georeferenced image and 3D-data products. Especially the continuous stripwise ground coverage provided by multiple-line scanners combined with simultaneous DGPS/INS orientation data acquisition offer the possibility of efficient parallel processing. In contrast to traditional processing using highly-specialized photogrammetric workstations, image data of multiple-line scanners, as there are the HRSC-AX (High Resolution Stereo Camera – Airborne Extended) and the ADS40 (Airborne Digital Sensor), can be processed on standard PC-Cluster installations. Without any operator interaction but controlled by a central server using UNIX-C shell based photogrammetric procedures the PC clients work simultaneously on stripwise operations (e.g. image matching, orthoimage generation) while the server uses the clients products for merging of final project-wide Digital Surface Models and orthoimage mosaics. With an optimal utilization of a standard Linux-PC-Cluster of 50 CPUs a production capacity for 20 cm multispectral orthoimage mosaics and 1m-raster Digital Surface Models of up to 1000 square kilometers per week can be achieved.

1 Einleitung

Digitale Sensoren bieten ideale Voraussetzungen für die Verarbeitung innerhalb weitestgehend automatisierter digitaler Prozessketten von der Bildaufnahme bis hin zur Generierung der Endprodukte. Im Gegensatz zu klassischen Bildblöcken einzelner zentralperspektivischer Aufnahmen eröffnet die Befliegung eines Projektgebietes in homogenen kontinuierlichen Bildstreifen mit Zeilen-Scannern wie der HRSC-AX (High Resolution Stereo Camera – Airborne Extended, WEWEL et al., 1998, SCHOLTEN et al., 2002) und der ADS40 (Airborne Digital Sensor, FRICKER & TEMPELMANN, 2002), unterstützt durch direkte Georeferenzierung mit Hilfe von DGPS/INS-Verfahren, zusätzliche Möglichkeiten einer effizienten Prozessparallelisierung.

Darüber hinaus stellen Mehrzeilen-Scanner mit bis zu 5 panchromatischen Stereozeilen und 4 Farbzeilen im sichtbaren Spektrum sowie im nahen Infrarot eine einzigartige Datenquelle für eine weitere, durch permanente Redundanzen gestützte qualitätsorientierte Automatisierung dar.

¹ Dipl.-Ing. Frank Scholten, Tel.: 030-67055-326, E-mail: Frank.Scholten@dlr.de

² M.A. Klaus Gwinner, Tel.: 030-67055-310, E-mail: Klaus.Gwinner@dlr.de
DLR, Institut für Planetenforschung, Rutherfordstr. 2, D-12489 Berlin

2 Digitaler Datenfluss

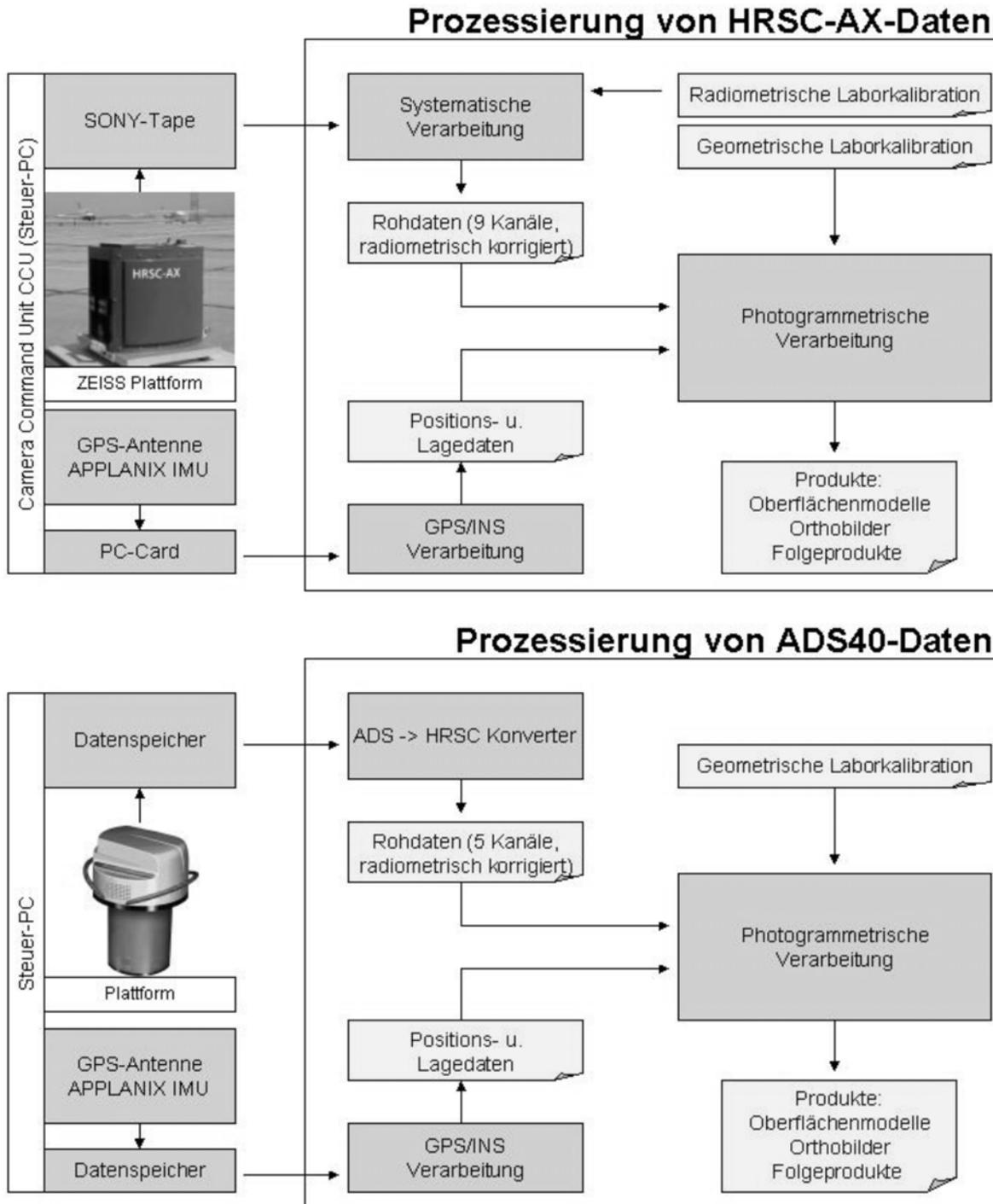


Abb. 1: Datenaufnahme und -verarbeitung von Mehrzeilen-Scanner-Daten(HRSC-AX und ADS40)

Abbildung 1 zeigt den vollständig digitalen Datenfluss von der Bilddatenaufnahme bis zum Prozessierungs-System zur Generierung der Daten-Produkte, wie es am DLR-Institut für Planetenforschung in Berlin-Adlershof in den vergangenen Jahren für die Verwendung von Daten der HRSC-Kameras entwickelt und erfolgreich eingesetzt wurde.

Das Verarbeitungssystem ist so angelegt, dass es sowohl auf Daten der verschiedenen HRSC-Varianten (HRSC-A, HRSC-AX, HRSC-AXW), auch auf Daten anderer Mehrzeilen-Sensoren angewendet werden kann. Es wurden z.B. bereits Daten der ADS40, die dem DLR von LH Systems zur Verfügung gestellt wurden, erfolgreich mit diesem System verarbeitet. Die Unterschiede in der Verarbeitungsvariante für ADS40-Daten liegen lediglich darin, dass zunächst statt einer HRSC-spezifischen systematischen Verarbeitung eine Konvertierung der ADS40-Daten in ein HRSC-kompatibles Format erfolgt. Die daraus resultierenden Rohdaten werden mit exakt den gleichen Prozeduren wie bei der Verarbeitung von HRSC-Daten unter Verwendung der jeweiligen geometrischen Kalibrationsdaten (Innere Orientierung) sowie der parallel zur Bilddatenaufnahme aufgezeichneten DGPS/INS-Daten (Äußere Orientierung) in die gewünschten Produkte überführt.

3 Automatisierung der Verarbeitungsschritte

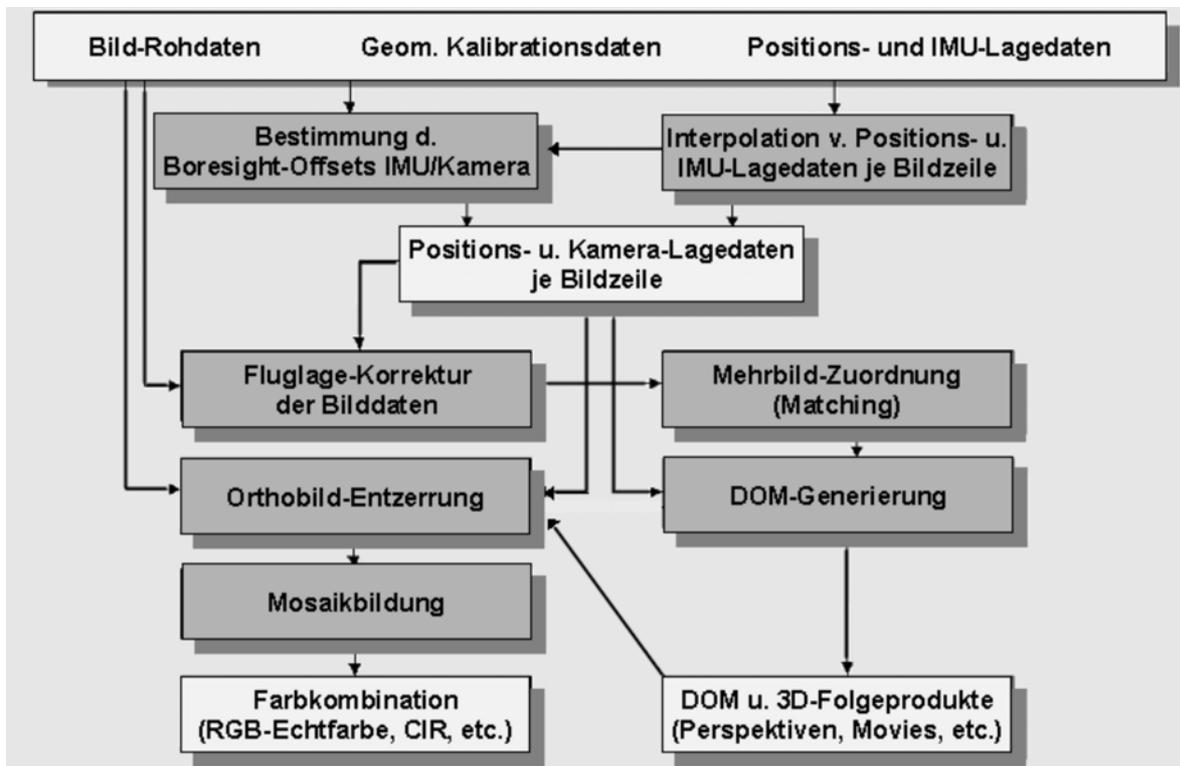


Abb. 2: Automatisierte Verarbeitungskette

Das hohe Maß an Automatisierungspotenzial bei der Verarbeitung von Mehrzeilen-Scannerdaten ergibt sich aus der einfach zu beschreibenden Sensorgeometrie (die Position jedes CCD-Elements in einer nominalen Fokalebene ist durch Kalibrationsmessungen mit hoher Genauigkeit bekannt), der Kombination mit einer direkten Messung der äußeren Orientierung sowie aus der hohen Datenredundanz, insbesondere durch die permanente Mehrfach-Stereoabdeckung. Die Ausnutzung der Redundanzen führt zu einer Minimierung der Notwendigkeit manueller Interaktionen durch den Operator Mensch und macht eine Verarbeitung mit integrierten Prozeduren, z.B. auf einer UNIX-basierten Rechnerarchitektur, möglich.

Abbildung 2 zeigt die für die Verarbeitung am DLR entwickelte und verwendete

Prozessierungskette. Die für die Bestimmung der Bore sight-Offsets zwischen Kamera und Inertialer Messeinheit (IMU) benötigten Bildkoordinaten der Stereokanäle können sowohl manuell als auch automatisch bestimmt werden. Alle anderen Verarbeitungsschritte können generell vollautomatisch ablaufen.

4 Effizienzsteigerung durch Parallisierung

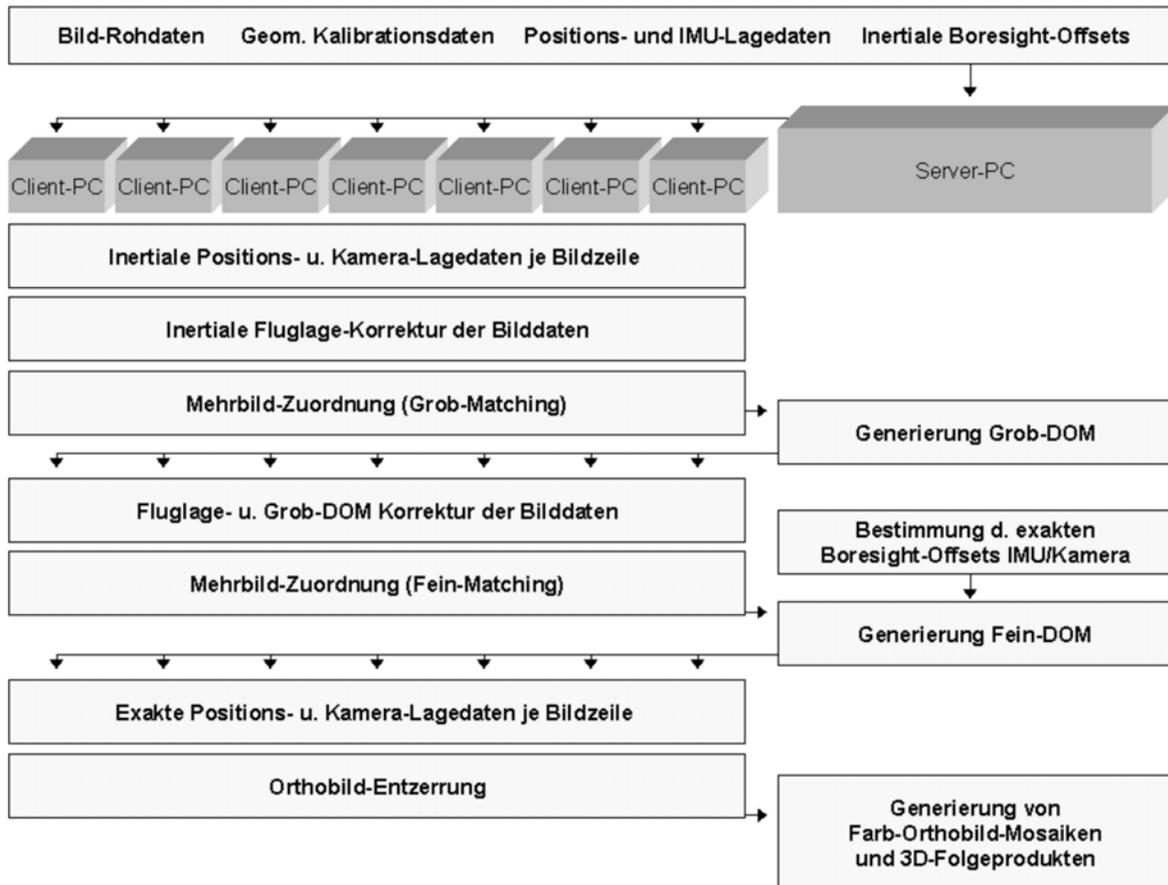


Abb. 3: Parallelierte Verarbeitung auf einem Linux-PC-Cluster

Die Effizienz der zuvor beschriebenen Verarbeitungsprozedur wird noch erheblich gesteigert, wenn, wie in Abbildung 3 aufgezeigt, anders als bei der klassischen Verarbeitung von zentralperspektivischen Luftbildern auf einzelnen photogrammetrischen Workstations, mit einem Linux-PC-Cluster aus mehreren Standard-PCs und einem Server eine Parallelisierung der Einzelschritte erfolgt.

Am DLR wurde in den vergangenen Jahren ein solches Cluster aus 24 Doppel-CPU-PCs und 2 PC-Servern aufgebaut. Während die Server für die Steuerung eines Projekts dienen und alle projektweiten Aufgaben (z.B. Generierung des Digitalen Oberflächenmodells (DOM)- und Mosaikbildung) übernehmen, können die Arbeitsschritte, die für die einzelnen Flugstreifen unabhängig voneinander erfolgen, gleichzeitig auf den einzelnen Client-PCs ablaufen. Der gesamte Prozessablauf, d.h. das Verteilen und Starten der einzelnen Rechenprozesse erfolgt dabei selbstinitiiert durch das Protokollieren der zuvor erfolgten Schritte. Ein solcher Protokollvermerk veranlasst automatisch den Start des jeweilig nachfolgenden Schrittes mit

Hilfe permanent abfragender Client-Prozesse auf der Basis einer festgelegten Dateienomenklatur. Die Definition eines Gesamtprojekts erfolgt mit Hilfe einer einfachen Steuerdatei, die projektspezifische Parameter enthält (z.B. Definition der Produktauflösung). Der Projektablauf erfolgt in einer Standardprozedur in Form eines UNIX-Shell-Skripts, das auf der Basis der in der Steuerdatei definierten Daten sowohl Server-Prozesse startet, als auch Initialisierungen von Client-Prozessen vornimmt.

5 Zahlen zur Produktivität

Der hohe Automatisierungsgrad sowie die Parallelisierung der Arbeitsschritte im Rahmen des beschriebenen Verarbeitungssystems des DLR führt zu einer hohen Leistungsfähigkeit des experimentellen Gesamtsystems.

In Tabelle 1 sind photogrammetrische Verarbeitungszeiten zu entnehmen, die sich bei Vorliegen aller Ausgangsdaten einer idealen Standardbefliegung mit entgegengerichtet geflogenen Flugstreifen von bis zu 20 km Länge ergeben. Die Anzahl der Flugstreifen ist, solange nicht größer als die Anzahl der verfügbaren Client-PCs, aufgrund der streifenweise Parallelisierung für die Bearbeitungsdauer von geringer Relevanz, da sie sich zeitlich lediglich auf die flugstreifenübergreifenden Arbeitsschritte (DOM-Interpolation, Mosaikbildung) auswirkt.

Tab. 1: Leistungswerte eines Linux-PC-Clusters mit 24 Doppel-CPU-PCs und 2 PC-Servern bei Vorliegen aller Ausgangsdaten einer Standardbefliegung

Vorliegen des Grob-DOMs (5 m-Raster)	Nach 1 Tag
Vorliegen des Fein-DOMs (1 m-Raster)	Nach ca. 5 Tagen
Vorliegen der Farb-Orthobild-Mosaik (20 cm / Pixel)	Nach ca. 7-8 Tagen

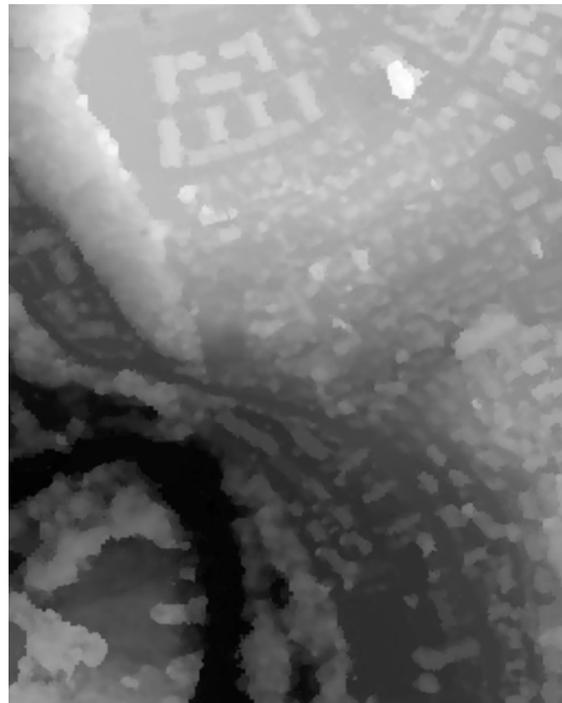
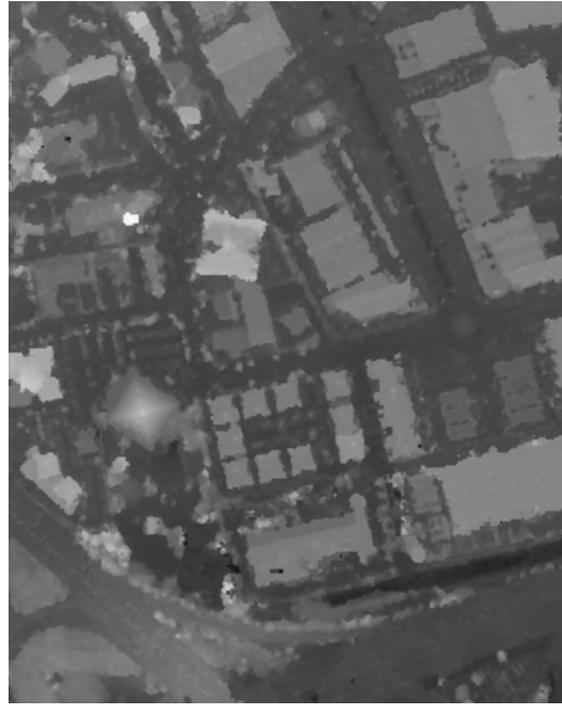


Abb. 4: Beispielhafte Ausschnitte aus Orthobildmosaiken und Digitale Oberflächenmodellen
oben: ADS40, Nîmes (Frankreich), Flughöhe ca. 800 m, Bodenauflösung 8 cm
unten: HRSC-AX, Bern (Schweiz), Flughöhe ca. 4000 m, Bodenauflösung 18 cm

Bei optimaler, d.h. voller Auslastung des zuvor beschriebenen Systems, z.B. durch Daten einer Befliegung mit folgenden Parametern:

Kamera:	HRSC-AX bzw. ADS40	Projektfläche:	1000 km ²
Anzahl d. Flugstreifen:	48	Länge d. Flugstreifen:	20 km
Flughöhe:	4500 bzw. 2000 m	Bodenauflösung:	20 cm/Pixel
Schwadbreite:	2400 m	Querüberlappung:	50 %

können so im Idealfall bis zu 1000 km² hochwertige Produkte (siehe Abb. 4) pro Woche generiert werden. Selbst unter Berücksichtigung von anfallenden Zeiten für die systematische Vorverarbeitung der Daten und der DGPS/INS-Vorverarbeitung, die nur wenige Tage erfordern, sowie für Datenkontrollen und Datenhandling (die reine Produktdatenmenge für alle 20cm/Pixel Farbkombinationen in RGB-Echtfarbe, Falschfarben-CIR, Schwarzweiss und Schwarzweiss-Infrarot sowie 1m-Raster-DOM beträgt ohne Zwischenprodukte für 1000 km² immerhin ca. 200 GByte) können immer noch sehr kurze Gesamtbearbeitungszeiten erzielt werden.

6 Zusammenfassung und Fazit

Digitale Sensoren mit hohen geometrischen und radiometrischen Auflösungen werden künftig vermehrt eingesetzt werden. Die damit einhergehende immense Steigerung der anfallenden Datenmengen bei gleichzeitiger Forderung nach schnelleren Ergebnissen lässt traditionelle Verarbeitungsprozesse zunehmend an ihre Grenzen stoßen. Digitale Mehrzeilensensoren erfordern zwar spezielle Verarbeitungsalgorithmen, ermöglichen aber gleichzeitig umfassende Automatisierungs- und Parallelisierungsmaßnahmen. Durch eine Verlagerung der Prozessierung von kostenintensiven photogrammetrischen Workstations auf einen Verbund aus Standard-PCs kann somit eine erhebliche Kosten- und Zeiteffizienzsteigerung erzielt werden. Am DLR-Institut für Planetenforschung in Berlin-Adlershof ist in den vergangenen Jahren für die photogrammetrische Verarbeitung von HRSC-Daten ein solches Prozedurensystem für Linux-PC-Cluster entwickelt und erfolgreich eingesetzt worden. Die Integration von Daten anderer Mehrzeilen-Scanner ist darin möglich und am Beispiel von ADS40-Daten ohne weitere Anpassungen des Systems bereits erfolgreich getestet worden. Die beschriebenen Entwicklungen zeigen beispielhaft einen Weg zu neuen Prozessierungsstrategien auf.

Literatur

- FRICKER, P. & TEMPELMANN, U. (2002); Kontinuierliche Bildstreifen – Ein wehmühtiger Abschied von perspektivischen Einzelbildern. Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung, Berlin, Band 11, S. 33-37.
- SCHOLTEN, F. et. al. (2002); Angewandte Digitale Photogrammetrie mit der HRSC. - Photogrammetrie - Fernerkundung - Geoinformation, 5, E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, S. 317-332.

WEWEL, F. et. al. (1998); Digitale Luftbildaufnahme mit der HRSC - Ein Schritt in die Zukunft der Photogrammetrie. - Photogrammetrie - Fernerkundung - Geoinformation, 6, E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, S. 337-348.

Auswertung von QuickBird und IKONOS-Aufnahmen

KARSTEN JACOBSEN¹

Abstract: The very high resolution space images from QuickBird and IKONOS are now in a competition to aerial images and can be used for the generation of orthoimages starting with a scale 1:5000. SpaceImagine has not published the sensor model of the IKONOS camera, instead of this they are distributing rational polynomial functions expressing the relation between the Geo-image and the ground coordinates. This has only to be improved in maximum by an affinity transformation using ground control. In few cases this was not the optimal solution and it was necessary to adjust also the view direction of the satellite in a program reconstructing the imaging geometry. DigitalGlobe is distributing with the Basic Imagery also images corresponding to level 1A data. They can be handled with standard programs for handling satellite line scanner images.

The generation of digital elevation models with images from the same orbit is not causing any problems, but the combination of images with changed shadows and changed vegetation may be quite difficult. Such images can be used for automatic image matching only after strong filtering and still may have problems in forest areas. The radiometric quality of the high resolution space images is usually better like corresponding aerial images.

1 Einführung

Die sehr hoch auflösenden Weltraumaufnahmen von QuickBird und IKONOS stehen in Konkurrenz zu der Anwendung von Luftbildern für die Karten- und Orthophotomaßstäbe ab 1 : 5000. Die hierfür erforderliche Auswertegenauigkeit kann erreicht werden, wenn die geometrischen Grundlagen genauer betrachtet werden. SpaceImaging liefert für IKONOS-Aufnahmen das geometrische Modell in Form von rationalen Funktionen aus, die mit Hilfe von Passpunkten nur noch verschoben und skaliert werden sollen. Die Untersuchung mehrerer IKONOS-Orientierungen hat gezeigt, dass die rationalen Funktionen zu den gleichen Ergebnissen führen wie ein geometrisches Modell, das auf den ebenfalls mitgeteilten Blickrichtungen basiert. In einzelnen Fällen führt Auswertung mit rationalen Funktionen nicht zu zufrieden stellenden Ergebnissen, sondern es sollte die geometrische Rekonstruktion mit einer zusätzlichen Ausgleichung der Blickrichtung verwendet werden. DigitalGlobe liefert die QuickBird-Bilder auch als level 1A-Daten entsprechend der Geometrie von SPOT-Bildern aus. Damit ist die Bildorientierung mit den normalen Programmen zur Auswertung von Satellitenzeilenscanneraufnahmen möglich.

Die Erstellung digitaler Höhenmodelle aus Aufnahmen vom selben Orbit bereitet keine Schwierigkeiten. Anders sieht es mit der Kombination von Szenen deutlich unterschiedlichen Aufnahmezeitpunktes aus. Wenn sich die Vegetation und/oder die Beleuchtungsverhältnisse geändert haben, kann die automatische Bildzuordnung problematisch werden. Erst eine starke Filterung der Aufnahmen mit entsprechendem Informationsverlust führt zu einem einigermaßen akzeptablen Höhenmodell. Dieses ist ausreichend für die Generierung von Orthophotos.

¹ Dr. Karsten Jacobsen, Universität Hannover, Institut für Photogrammetrie und Geoinformation, Nienburger Str. 1, D-30167 Hannover, jacobsen@ipi.uni-hannover.de

2 Bilddaten von IKONOS und Quickbird

Die mit den Satelliten QuickBird und IKONOS aufgenommenen Bilder haben die gleichen radiometrischen Eigenschaften da die Kameras beider von Kodak hergestellt wurden. Ursprünglich war auch die gleiche Pixelgröße auf dem Boden vorgesehen. Wegen geänderter Restriktionen der USA darf die Auflösung heute besser sein als ursprünglich festgelegt, weswegen DigitalGlobe die Flughöhe von QuickBird von ursprünglich vorgesehenen 680km auf 450km reduzierte. Damit erzielt QuickBird bei einem Nadirblick im panchromatischen Band eine Bodenpixelgröße von 61cm gegenüber 82cm bei IKONOS. In der QuickBird-Kamera sind 6 CCD's eingebaut, die nach geometrischer Korrektur als eine geometrisch fehlerfreie CCD-Zeile mit 27 552 Pixeln ausgegeben werden, womit im Nadir eine Streifenbreite von 16,8km erzielt wird. DigitalGlobe vertreibt die radiometrisch und geometrisch verbesserten Originaldaten als Basic Imagery, die einem level 1A von SPOT entsprechen. Das geometrische Modell ist offen gelegt und zusammen mit den Bilddaten werden auch die Satellitenephemeriden und die Aufnahmewinkel ausgeliefert. Als nächst höheres Produkt werden die Standard Imagery vertrieben, die basierend auf der direkten Sensororientierung eine Projektion auf das GTOPO30-Höhenmodell darstellen. Die mittels GPS, einem Inertialsystem und Sternkameras bestimmte Sensororientierung liefert wie bei IKONOS ohne Passpunkte eine Objektpunktgenauigkeit von $SX=SY=12m$ und teilweise auch besser, wenn die Objekthöhen bekannt sind. Das GTOPO30-Höhenmodell ist frei im Internet verfügbar (<http://edcdaac.usgs.gov/gtopo30>), die Höhengenaugigkeit ist uneinheitlich, die Höhen sind bis zu einer Breite von 60° mit einem Abstand von $30''$ vorhanden, entsprechend etwas weniger als 1km. Dagegen liefert SpaceImaging nicht die level 1A Bilddaten aus, sondern als am wenigsten aufbereitetes Produkt die CARTERRA Geo-Daten, die einer Projektion auf eine Ebene konstanter Höhe entsprechen. Unabhängig vom Nadirwinkel, der die Pixelgröße auf dem Boden beeinflusst, werden die Geo-Daten mit 11004 Pixeln auf 1m Pixelgröße resampled ausgeliefert. Die IKONOS-Daten haben somit eine deutlich kleinere Streifenbreite als die von QuickBird.

Beide Firmen bieten auch höherwertige Produkte bis hin zum Orthophoto an. Wegen der sehr erheblichen Preisunterschiede werden diese höherwertigen Produkte selten bestellt und die Nutzer übernehmen die geometrische Verarbeitung selbst.

3 Geometrische Auswertung von IKONOS-Geo-Bildern

Die Bildorientierung der IKONOS-Geo-Bilder ist mittels der von SpaceImaging vertriebenen rationalen Funktionen möglich, die den Zusammenhang zwischen den Bildpositionen in den Geo-Bildern und den Objektkoordinaten in Form von geographischen Koordinaten beschreiben.

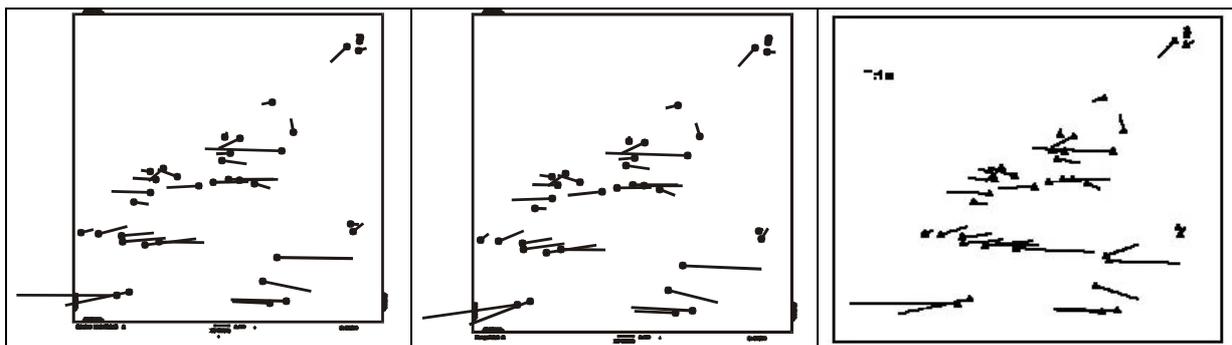
$$x_{ij} = \frac{P_{i1}(X,Y,Z)_j}{P_{i2}(X,Y,Z)_j} \quad y_{ij} = \frac{P_{i3}(X,Y,Z)_j}{P_{i4}(X,Y,Z)_j} \quad \text{Formel 1: rationale Funktionen}$$

Die Polynome $i1$ bis $i4$ sind in der Regel kubisch. Formel 2: kubische Polynome

$$P_{i1}(X,Y,Z)_j = a_1 + a_2 \cdot Y + a_3 \cdot X + a_4 \cdot Z + a_5 \cdot Y \cdot X + a_6 \cdot Y \cdot Z + a_7 \cdot X \cdot Z + a_8 \cdot Y^2 + a_9 \cdot X^2 + a_{10} \cdot Z^2 + a_{11} \cdot X \cdot Y \cdot Z + a_{12} \cdot Y^3 + a_{13} \cdot Y \cdot X^2 + a_{14} \cdot Y \cdot Z^2 + a_{15} \cdot Y^2 \cdot X + a_{16} \cdot X^3 + a_{17} \cdot X \cdot Z^2 + a_{18} \cdot Y^2 \cdot Z + a_{19} \cdot X^2 \cdot Z + a_{20} \cdot Z^3$$

Somit kann mit 80 Parametern der Zusammenhang zwischen Bild- und Objektpositionen beschrieben werden (GRODECKI 2001). Die rationalen Funktionen werden von SpaceImaging mittels des nicht publizierten Sensormodells und der Sensororientierung berechnet; nach einer Verbesserung durch eine Affintransformation basierend auf Passpunkten wird der geometrische Zusammenhang ausreichend genau rekonstruiert. Durch die Polynomlösung treten nur vernachlässigbare Fehler der Objektkoordinaten im Millimeterbereich auf. Die rationalen Funktionen haben den Vorteil, dass sie beliebige Sensorgeometrien beschreiben können und somit den Datentransfer zu photogrammetrischen Arbeitsstationen vereinfachen. In einem kommerziellen Softwareprodukt werden die rationalen Funktionen nur mit Hilfe von Passpunkten berechnet („terrain dependent solution“). Diese Lösung sollte nicht verwendet werden da sie zu erheblichen Extrapolationsfehlern außerhalb des durch die Passpunkte beschriebenen Volumens führen kann, viele Passpunkte erfordert und fehlerhafte Passpunkte nur sehr schwer aufgedeckt werden können.

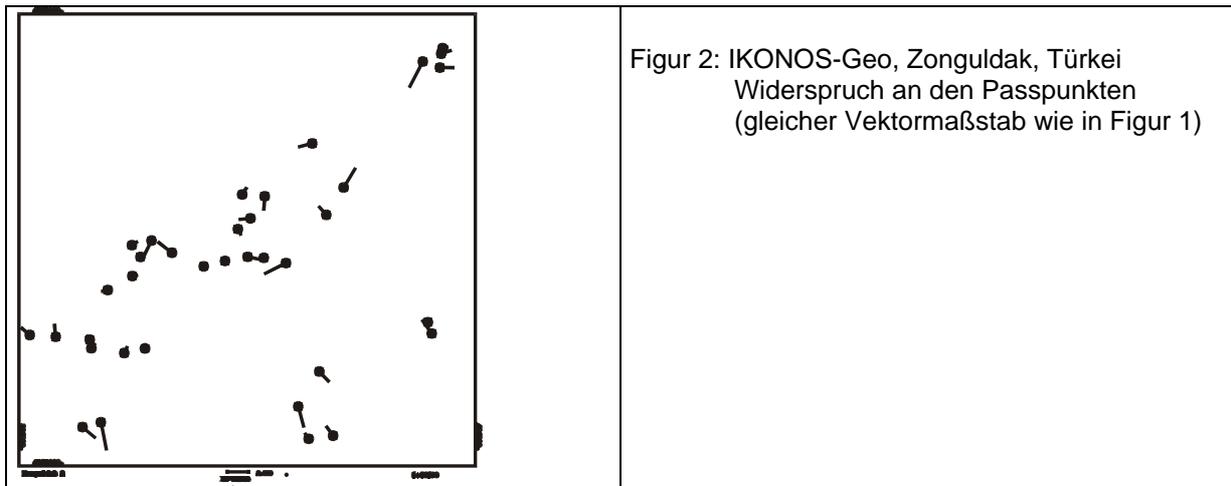
Als weitere Methode bietet sich die Rekonstruktion der Aufnahmegeometrie an. Für die Szenenmitte ist die Blickrichtung zum Satelliten mittels der „nominal collection azimuth and elevation“ gegeben. Zusammen mit den publizierten Satellitenbahndaten kann das zu jedem Pixel gehörende Projektionszentrum und damit die individuelle Aufnahmeorientierung rekonstruiert werden. Auch diese Methode benötigt Passpunkte für den exakten Lagebezug.



Figur 1: IKONOS-Geo, Zonguldak, Türkei, Widerspruch an den Passpunkten
 Programm CORIKON Programm RAPORI PCI, sensor modelling

Figur 1 zeigt die Ergebnisse der Orientierung einer IKONOS Geo-Aufnahme im Bereich von Zonguldak mit dem Hannoverschen Programm CORIKON, das die Sensorgeometrie rekonstruiert und dem Hannoverschen Programm RAPORI, das die rationalen Polynomkoeffizienten von SpaceImaging benutzt, sowie das entsprechende PCI „sensor modelling“. Die Ergebnisse sind praktisch identisch aber nicht zufriedenstellend. In der X-Richtung betragen die Quadratmittel der Widersprüche an den Passpunkten etwa 5,3m und in der Y-Richtung etwa 1m. Die Widersprüche in der X-Richtung sind für eine Pixelgröße von 1m nicht zufrieden stellend. Die X-Richtung deckt sich etwa mit der Aufnahmeorientierung, womit ein Fehler der Aufnahmeorientierung nahe liegt. Eine Ausgleichung mit dem Programm CORIKON, bei dem auch die horizontale und vertikale Aufnahmeorientierung mit ausgeglichen wurde, führte zu den erwarteten Ergebnissen (Figur 2). Das Azimut der Aufnahmeorientierung wurde durch die Ausgleichung um 10,5° verbessert. Ähnliche Probleme gab es auch mit einem zweiten IKONOS-Geo-Bild in der gleichen Gegend und einem Bild in Saudi Arabien. Wegen der Unsicherheit, ob eine Verbesserung der Aufnahmeorientierung erforderlich ist, sollten von vornherein die horizontale und die vertikale Aufnahmeorientierung als Unbekannte eingefügt werden. Das Hannoversche Programm überprüft die Signifikanz der einzelnen Unbekannten. Es hat sich gezeigt, das nicht signifikante Unbekannte aus der

Berechnung ausgeschlossen werden sollten. Besonders trifft dieses für die Aufnahme­richtung zu, wenn die Passpunkte keine ausreichenden Höhenunterschiede aufweisen.



Im Bereich Williamstown, NJ, traten dagegen keinerlei Probleme mit der Orientierung der IKONOS-Geo-Aufnahme auf, hier konnte mit einer einfachen Verschiebung fast die gleiche Genauigkeit erreicht werden wie mit einer Ausgleichung mit 8 Unbekannten. Wenn die 8 Unbekannten um die nicht signifikanten 3 Unbekannten reduziert werden (Tabelle 1, Zeile 2) werden fast die gleichen Genauigkeiten wie mit allen Unbekannten erzielt. Aber bereits eine einfache Verschiebung auf die Passpunkte führt fast zum gleichen Ergebnis. Das höhere Niveau der Widersprüche ist auf die beschränkte Genauigkeit der Passpunkt­koordinaten zurück zu führen, die aus Orthofotos des USGS digitalisiert wurden.

Tabelle 1: Ergebnisse der Orientierung einer IKONOS-Geo-Aufnahme in Williamstown –
Quadratmittel der Widersprüche an den 33 Passpunkten

	SX	SY	sigma 0
8 Unbekannte	1.45 m	0.97 m	1,47 m
5 Unbekannte	1.47 m	0.99 m	1,47 m
Affintransformation	1.51 m	1.00 m	1,47 m
Verschiebung, 2 Unbek.	1.57 m	1.14 m	1,50 m

4 Orientierung von QuickBird Basic Imagery

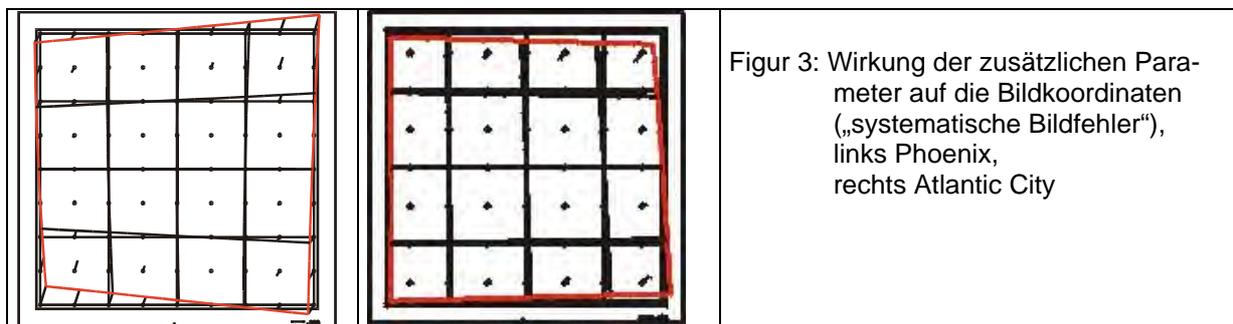
QuickBird Basic Imagery sind nur um die Sensorkalibrierung verbessert, sie entsprechen einer geometrisch fehlerfreien CCD-Zeile mit 27552 Pixeln. Diese level 1A-Daten können wie normale Satellitenzeilenscanneraufnahmen von SPOT, MOMS, IRS oder ASTER ausgewertet werden. Es ist nur zu berücksichtigen, dass wie auch bei SPOT 5 ein sogenanntes „yaw-control“ vorhanden ist, das die Aufnahme­richtung kontinuierlich dreht, um die Auswirkung der Erdrotation auszugleichen und Szenen generiert, deren Begrenzungen parallel zum Koordinatensystem sind. Zusammen mit den Bildern werden auch Ephemeriden und die detaillierte Aufnahme­richtungsinformationen mit ausgeliefert. Das Hannoversche Programm BLASPO ist allerdings in der Lage die Orientierung auch ohne diese Zusatzinformation zu bestimmen da die Änderung der Aufnahme­richtung ausreichend genau linear ist.

Die erzielten Genauigkeiten der Orientierung von QuickBird-Aufnahmen sind in Relation zu der Pixelgröße von 62cm nicht besonders gut, was auf die beschränkte Genauigkeit der

Passpunkte, die aus Orthofotos des USGS digitalisiert wurden, zurück zu führen ist. Die etwas schlechteren Ergebnisse der zweiten Auswertung der Szene 12450 mit 207 Passpunkten ist dadurch zu erklären, dass bei der zweiten Auswertung viele Passpunkte an Grauwertkanten verwendet wurden, bei denen die Lage im Bild von dem hellen Bereich in den dunklen Bereich verschoben wird. Bei der ersten Auswertung wurde dagegen Wert auf symmetrische Passpunkte gelegt.

Tabelle 2: Ergebnisse der Orientierung von QuickBird „Basic Imagery“-Aufnahmen

Szene	Passpunkte	SX	SY
12450	48	1.08 m	1.22 m
12450	207	1.24 m	1.34 m
12451	55	1.26 m	1.22 m



Die systematischen Bildfehler der beiden in Figur 3 dargestellten Auswertungen zeigen klar die Auswirkung der Drehung der Bildzeile während der Aufnahmerichtung.

5 Erstellung von Höhenmodellen

Mit Stereokombinationen der sehr hochauflösenden Satellitenbilddaufnahmen können digitale Höhenmodelle erzeugt werden. Leider ist nur eine begrenzte Anzahl von IKONOS-Stereokombinationen im Archiv vorhanden. DigitalGlobe hat bislang die Aufnahme von Stereobildern nicht in den Katalog der Standardaufnahmen aufgenommen. Prinzipiell sind beide Systeme in der Lage, Stereoaufnahmen vom gleichen Orbit aus aufzunehmen.

Die automatische Bildzuordnung einer IKONOS-Stereokombination, deren Aufnahmen mit einem Zeitabstand von 12 Sekunden erstellt wurden, ergab sehr gute Ergebnisse. Die Korrelationskoeffizienten waren in der Regel größer als 0,95. Das Höhen-Basis-Verhältnis von 7,5 führte damit zu einer Höhengenaugigkeit von 1,7m entsprechend einer Parallaxengenaugigkeit von 0,22 Pixeln.

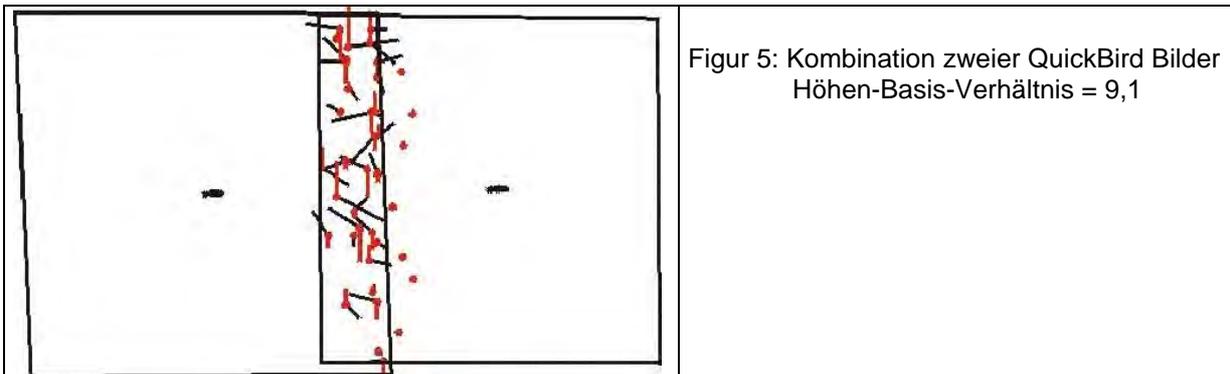
Anders sieht es bei Kombinationen von Aufnahmen mit einem größeren Zeitabstand aus, bei denen sich die Schattenlänge und auch die Vegetation verändert haben können.

Durch die Änderung der Sonnenhöhe ergeben sich in dem gebirgigen Gebiet von Zonguldak, Türkei, erheblich andere Schatten (siehe Figur 4). Damit war die automatische Bildzuordnung in den Waldgebieten nicht möglich. In den anderen Bereichen gab es größere Ausfälle und es war eine Tiefpassfilterung erforderlich. Dementsprechend wurde auch nur eine Höhengenaugigkeit in der Größenordnung von 4 bis 6m erzielt. Wegen der großen Lücken war das erstellte Höhenmodell kaum brauchbar.



Figur 4: Ausschnitte aus IKONOS-Aufnahmen vom 7.9.02 mit einer Sonnenhöhe von 67° und vom 10.11.02 mit einer Sonnenhöhe von 41°

Im Bereich von Phoenix, Arizona standen zwei, sich etwa 20% überlappende, QuickBird-Szenen zur Verfügung, die mit einem Zeitabstand von 10 Tagen aufgenommen wurden. Während dieser 10 Tage haben sich die Schattenlängen und die Vegetation praktisch nicht verändert, so dass keinerlei Probleme mit der automatischen Bildzuordnung auftraten. Die Korrelationskoeffizienten lagen im Mittel über 0,95 und es traten nur wenige Punktausfälle auf, die auf fehlende Kontraste, wie bei breiten Straßen und Sandflächen, zurück zu führen waren. Diese kleinen Lücken konnten ohne Probleme interpoliert werden.



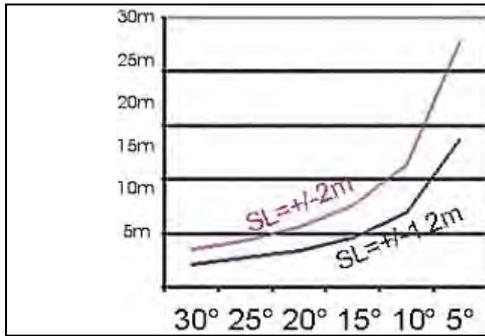
Figur 5: Kombination zweier QuickBird Bilder
Höhen-Basis-Verhältnis = 9,1

Die automatische Bildzuordnung führte zu einem Quadratmittel der Höhenunterschiede gegenüber dem auch nicht fehlerfreien digitalen Höhenmodell des USGS von $\pm 4,8$ m entsprechend einer Parallaxengenauigkeit von 0,8 Pixeln.

6 Erstellung von Orthophotos

Ausgedruckte Orthophotos sollten eine Auflösung von mindestens 8 Pixel/mm haben, dann nimmt das menschliche Auge die einzelnen Pixel nicht mehr wahr und hat den Eindruck eines kontinuierlichen Fotos. Dementsprechend können mit den IKONOS-Bildern Orthophotos bis zum Maßstab 1 : 8000 und mit QuickBird-Aufnahmen bis zum Maßstab 1 : 4800 erstellt werden. Es wird eine Lagegenauigkeit von mindestens 0,25mm erwartet, entsprechend 2m für den Maßstab 1 : 8000 und 1,2m für den Maßstab 1 : 4800. Die Bildorientierung mit dieser Genauigkeit stellt kein Problem dar im Gegensatz zu der erforderlichen Höhengengenauigkeit des digitalen Höhenmodells. Dieses muss nicht von der gleichen Datenquelle wie die zu verwendenden digitalen Bilder stammen.

Ein Höhenfehler Δh des DHM wirkt sich folgendermaßen als Lagefehler ΔL des Orthofotos aus: $\Delta L = \Delta h * \tan(\text{lokaler Nadirwinkel})$ - siehe Figur 6.



Figur 6: Erforderliche Höhengenaugigkeit [m] (vertikal) als Funktion des lokalen Nadirwinkels



Figur 7: IKONOS (Pixelgröße 1m)



Orthophoto des USGS (Pixelgröße 1m)



Figur 8: QuickBird (Pixelgröße 0.64m)



Orthophoto des USGS (Pixelgröße 1m)

Für die Orthophotos, aber auch für eine linienhafte Auswertung sind nicht nur die geometrischen, sondern auch die radiometrischen Eigenschaften wichtig. Wie aus den Abbildungen 7 und 8 ersichtlich, sind die Kontraste der hoch auflösenden Satellitenbilder besser als die der Orthofotos, die aus Luftbildern erstellt wurden.

7 Zusammenfassung

Die Orientierung und Auswertung der sehr hoch auflösenden Satellitenzeilen-scanneraufnahmen von IKONOS und QuickBird mit manchen kommerziellen Auswertepro-

grammen muss kritisch betrachtet werden. In einzelnen Fällen war die Verwendung der von SpaceImaging für IKONOS-Geo-Aufnahmen zur Verfügung gestellten rationalen Polynomfunktionen auch nach Bezug auf Passpunkte nicht ausreichend und es musste die Aufnahmerichtung verbessert werden. Die rationalen Funktionen sollten nicht nur basierend auf Passpunkten berechnet werden. Mit geeigneten mathematischen Modellen sind Genauigkeiten erreichbar, die keine Einschränkung der Auswertemaßstäbe darstellen, diese werden nur durch die Detailerkennbarkeit begrenzt. Wegen des etwas in den nahen Infrarotbereich hinein verlängerten Spektralbereichs sind die Kontraste der panchromatischen Satellitenbilder in der Regel sehr gut.

8 Literaturverzeichnis

- Grodecki, J., 2001. Ikonos stereo feature extraction – RPC approach. Proc. ASPRS Annual Conference, St. Louis, 23-27 April. American Society of Photogrammetry & Remote Sensing, 7 pp. (auf CD).
- Jacobsen, K. (2001): Automatic Matching and Generation of Orthophotos from Airborne and Spaceborne Line Scanner Images, High Resolution Mapping from Space 2001, Hannover 2001
- Jacobsen, K. (2003): Orthoimages and DEMs by QuickBird and IKONOS, EARSeL, Gent 2003
- Toutin, Th., Chenier, R., Carbonneau, Y., 2001. 3D geometric modelling of Ikonos Geo images, Proc. Joint ISPRS Workshop “High Resolution Mapping from Space 2001” Universität Hannover (auf CD).

<http://www.spaceimage.com/>

<http://www.digitalglobe.com/>

Operational processing of AVHRR data at DFD

PADSUREN TUNGALAGSAIKHAN¹, KURT P. GÜNTHER², GERHARD GESELL³, STEFAN W. DECH⁴ & THOMAS RUPPERT⁵

Zusammenfassung: Seit November 1981 empfängt das Deutsche Fernerkundungsdatenzentrum (DFD) des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) die Daten der NOAA POES Satelliten in HRPT Format. Mehr als 64000 Szenen wurden seitdem empfangen.

Die Rohdaten des "Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR)" mit standardisierten Routinen zu kalibrierten und navigierten Daten verarbeitet ("level 1"). Daraus werden RGB-Quicklooks erstellt, denen Küstenlinien überlagert sind. Ausserdem werden so genannte "Medienprodukte" generiert, auf denen ein großer Teil Europas in Kartenprojektion mit überlagerten Küstenlinien und Flussverläufen zu sehen ist. Die "level 1" Daten werden auch für die Erstellung von höherwertigen Produkten genutzt wie z.B. für den "Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)", die Meeresoberflächentemperatur (SST) und die Tages- und Nachttemperatur der Landoberfläche. Um die höherwertigen Produkte ("level 3") zu berechnen, ist eine automatische Wolkenerkennung (APOLLO Software), eine präzise Navigation und Zuordnung der Pixel zu geographischer Länge und Breite und auch eine Maskierung in Land- und Wasserflächen notwendig. Um tägliche, wöchentliche und monatliche "level 3" Produkte zu erstellen, sind unterschiedliche "Compositing" Algorithmen anzuwenden. Auf die "level 2 und level 3" Produkte kann über ein nutzerfreundliches Internetportal zugegriffen werden.

Der Beitrag beschreibt die operationellen Aspekte der täglichen Prozessierung zur Erstellung der "level 1" bis "level 3" Produkte einschließlich der automatischen Überwachung, der automatischen Fehlererkennung und Qualitätssicherung. Es werden auch zukünftige Prozessoren erwähnt wie z.B. die automatische Atmosphärenkorrektur, die Ableitung von Wolkenparametern und die Etablierung einer automatischen Harmonischen Analyse zur Erstellung einer lückenfreien, homogenisierten "Leaf Area Index (LAI)" Zeitreihe.

Introduction

Beginning in 1978, the AVHRR sensor (Advanced Very High Resolution Radiometer, http://eosims.cr.usgs.gov:5725/sensor_documents/avhrr_sensor.html) has flown on the National Oceanic and Atmospheric Administration's (NOAA) Polar Orbiting Environmental Satellites (POES; <http://www2.ncdc.noaa.gov/docs/klm>) measuring reflected and emitted radiation in four to six

¹ Padsuren Tungalagsaikhan, German Aerospace Centre (DLR), German Remote Sensing Data Centre (DFD), Münchnerstr. 20, D - 82234 Wessling, e-mail: padsuren.tunga@dlr.de

² Dr. Kurt P. Günther, German Aerospace Centre (DLR), German Remote Sensing Data Centre (DFD), Münchnerstr. 20, D - 82234 Wessling, e-mail: kurt.guenther@dlr.de

³ Gerhard Gesell, German Aerospace Centre (DLR), German Remote Sensing Data Centre (DFD), Münchnerstr. 20, D - 82234 Wessling, e-mail: gerhard.gesell@dlr.de

⁴ Prof. Dr. Stefan W. Dech, German Aerospace Centre (DLR), German Remote Sensing Data Centre (DFD), Münchnerstr. 20, D - 82234 Wessling, e-mail: stefan.dech@dlr.de

⁵ Thomas Ruppert, German Aerospace Centre (DLR), German Remote Sensing Data Centre (DFD), Münchnerstr. 20, D - 82234 Wessling, e-mail: thomas.ruppert@dlr.de

broad-band spectral channels from the visible to the thermal infra-red region. The NOAA-POES series are regarded as the backbone of the US meteorological program. The current POES series satellites are named simply NOAA-7 through NOAA-17 in order of launch. The program has evolved over several years starting in 1960 with TIROS. The philosophy of NOAA is to maintain at least two operational satellites in complementary orbits until 2010.

All NOAA-POES satellites have a circular, sun-synchronous polar orbit with a nominal flight altitude of 833 km. The even numbered satellites cross the equator at local mean solar times of approximately 7:30 and 19:30, while the odd-numbered satellites cross the equator at local mean solar times of approximately 2:30 and 14:30.

The AVHRR sensor flown aboard TIROS-N, NOAA-6, NOAA-8 and NOAA-10 collected four spectral channels (AVHRR/1), the AVHRR sensor aboard NOAA-7, NOAA-9, NOAA-11, NOAA-12, NOAA-13 (was never operational, problems after launch) and NOAA-14 is collecting with five channels (AVHRR/2). With the operation of NOAA-15, a new version of the AVHRR sensor (called AVHRR/3) is in orbit. AVHRR/3 is a six channel instrument, with three of the channels located in the visible and near-infrared regions of the spectrum, having effective wavelengths around 0.63 μm (channel 1), 0.86 μm (channel 2), and 1.6 μm (channel 3A for day-time operation), while the remaining three are located in the atmospheric window regions in the mid- and thermal infrared with effective wavelengths centred around 3.7 μm (channel 3B for night-time operation), 10.8 μm (channel 4), and 11.5 μm (channel 5).

Another new feature of the AVHRR/3 of NOAA-15,16,17 is a split gain factor in order to increase the digital resolution for low albedo ranges from 0% to 25% by a factor of two for the channels 1, 2 and 3A. The resolution for the range between 25% and 100% is reduced.

Provision has been made for the transmission of five channels in the data format for all older and new satellites. Channel 5 contains a repeat of channel 4 data, when only four different channels are available (AVHRR/1). Currently, the AVHRR sensors on board NOAA-12, NOAA-15, NOAA-16 and NOAA-17 are in operational mode, however the sensor on board NOAA-14 severely degraded due to scan motor anomaly. NOAA-13 did not become operational due to a power failure after launch.

The AVHRR sensors are cross-track scanning systems covering a swath width of app. 2800 km with ~1 km spatial resolution in nadir direction. A fairly continuous global coverage is achieved using morning and afternoon satellites.

From level 0 data to “value - added” level 3 products

The following section describes, in detail, the methods employed at DFD to process level 0 data (raw data) into value-added level 3 products such as sea surface temperature, land surface temperature and “Normalised Difference Vegetation Index” using the TeraScan software from SeaSpace Corporation (<http://www.seaspace.com/>). Further operational software and scripts are developed by DFD.

An overview of the operational NOAA-AVHRR processing scheme of DFD is given in Figure 1. The operational routines are based on the work of DECH ET AL. (1998). After reception of the AVHRR data, a pre-processing routine delivers calibrated and auto-navigated data. These level 1 data are used for generating RGB - quicklooks overlaid with coastlines and a so-called media product which is a subset showing wide parts of Central Europe („Central Europe“). The level 1 data are also used for generating value-added products such as the „Normalised Difference Vegetation Index“ of Europe, the sea surface temperature of

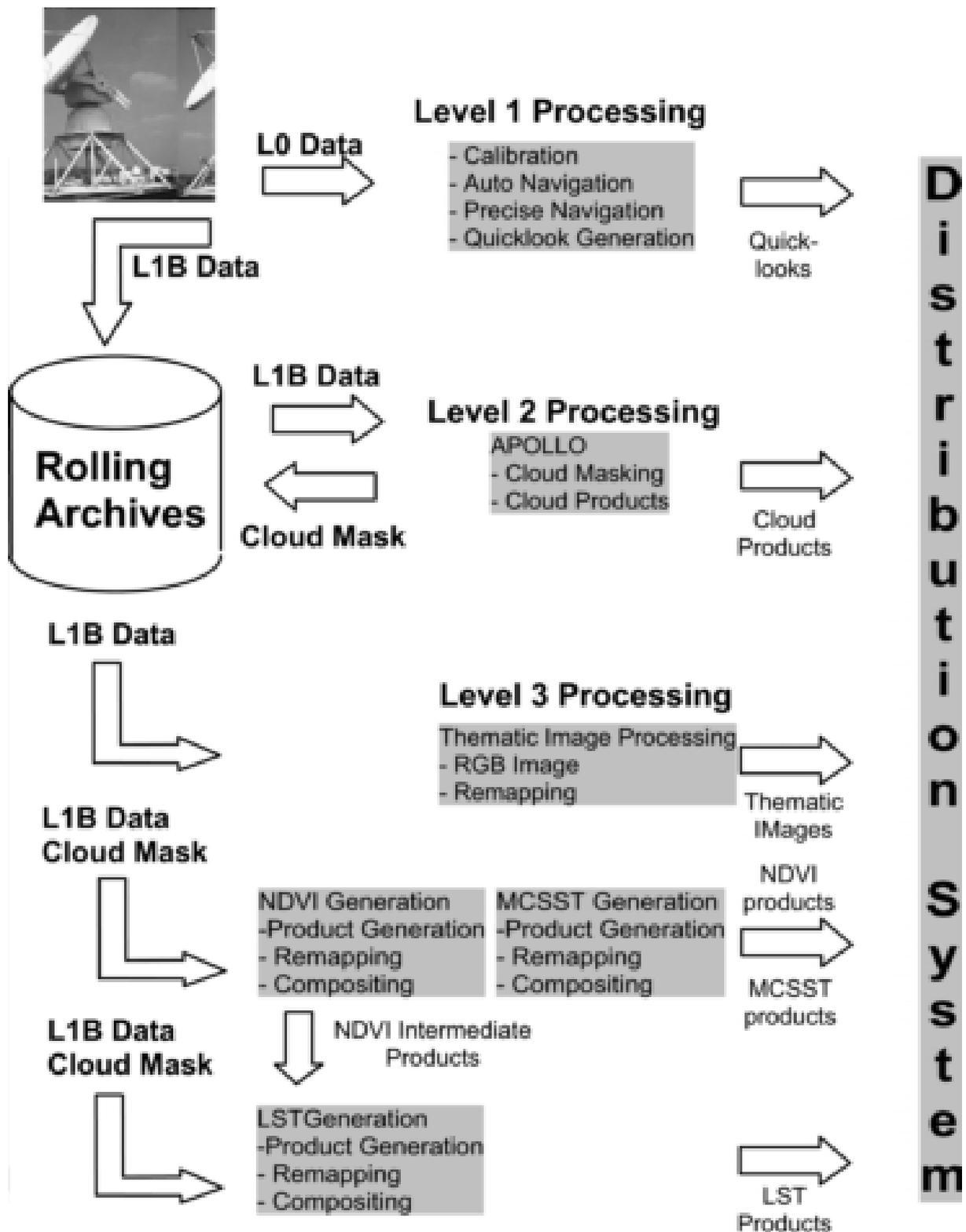


Figure 1: Overview of the NOAA-AVHRR processing scheme for generating operational products like quicklooks, level 1 and level 3 products. All products are available via different web user interfaces (GISIS, EOWEB or WWW)

European seas and the land surface temperature of Europe representing a day-time or night-time land surface temperature. For all value-added products, different routines such as cloud

masking, geo-referencing, including land-sea mask and compositing are necessary (level 2 data). The level 2 data are used for deriving daily, weekly and monthly level 3 products which are accessible via the internet (<http://eoweb.dlr.de>).

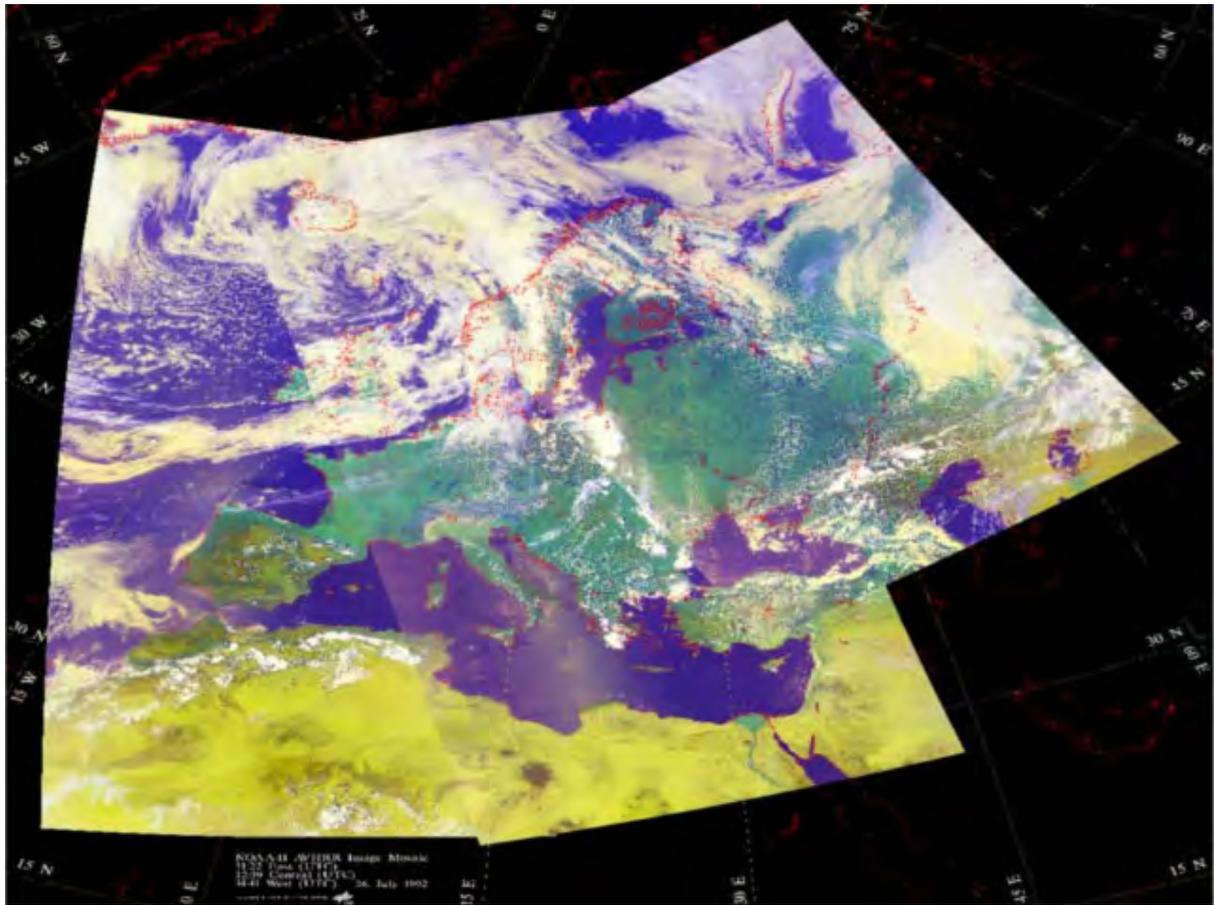


Figure 2: Geographical coverage for AVHRR data reception from Oberpfaffenhofen, Germany

The total image size of one pass depends on the time of visibility of the spacecraft and varies from day-to-day and from pass-to-pass. A "long" acquisition, e.g. a "central" pass, may contain up to 5600 lines and covers about 7150 km in north-south direction. 2048 pixels are digitised for every scan line resulting in a pass width of about 3000 km. The geometric resolution of the instrument is ~ 1.1 km at nadir and is reduced to ~ 6 km close to the pass edges due to the wide swath width and the earth curvature. The wide scan angle of the AVHRR means that the local time for pixels at the eastern and western edges of the swath can vary by more than an hour. Due to the fact that the NOAA satellites do not complete an integral number of orbits per day, the same pixel will be imaged at local times varying up to ± 50 minutes for successive days, a phenomenon called phasing.

Level 1B data processing

Inputs are level 0 HRPT Data, which are collected in a directory after acquisition. As soon as a level 0 raw data file arrives in this directory, the generation processor automatically runs determining the records, extracting the AVHRR data from HRPT data stream, calibrating the data, and lastly performing the auto navigation. The quality of the auto navigation is interactively checked and manually corrected if necessary (Precise Navigation). Level 1B data are calibrated and navigated data in such called "satellite" projection.

Radiometric Calibration

The radiometric calibration of the AVHRR data is done in accordance with methods described in “Techniques for Data Extraction and Calibration of TIROS-N/NOAA Series Satellite Radiometers for Direct Readout Users” (LAURITSON & NELSON, 1979).

The raw digital counts for channels 1 and 2 are calibrated into technical albedo values. As there is no on-board calibration for solar channels 1 and 2, major problems arise in calibrating the data. For retrospective NOAA-11 AVHRR data processing, time-adjusted coefficients are used to consider the degradation of the sensor sensitivity over time (TEILLET & HOLBEN, 1994). For NOAA-14 AVHRR, post-launch updated calibration coefficients provided by NOAA/NESDIS (RAO & CHEN 1997) were applied. For NOAA-16 AVHRR data only pre-launch coefficients are available. Due to a dual gain response for channel 1 and 2, Piecewise Linear (PWL) calibration coefficients are needed in order to increase sensitivity.

The thermal infrared data (channels 3, 4, and 5) are converted from raw counts to radiances with a linear relationship that is based on the raw count value associated with cold space (roughly 3 degrees Kelvin) and the raw count value associated with the temperature of an onboard target (approximately 300 degrees Kelvin). A slight nonlinearity in channels 4 and 5 is corrected using a quadratic function of radiance. Lastly, the infrared radiances are converted to temperature using the inverse Planck function.

Auto Navigation/Precise Navigation

After calibration, the earth locations of this data set are also automatically computed using the latest satellite orbit elements and a sensor model. Satellite orbit elements updated once a day by ftp except weekends or public holidays in the US, are supplied routinely by the SeaSpace Corporation. The images are correlated with land/sea masks (World Databank (WDB) or Digital Chart of the World (DCW) data bases) to provide more precise navigation. Appropriate coastline areas with significant features are selected in 1deg × 1deg boxes and checked for cloudiness by applying several spectral tests. For the remaining cloud free boxes, a cross correlation algorithm between the satellite image chips and the reference coastline is used. Based on the yielding vector array the satellite’s yaw, pitch, and roll angles are adjusted and so the assignment of each pixel to the geographical latitude and longitude is done. The accuracy of the earth location is typically 1-2 pixels of the AVHRR resolution, this means accuracy better than 2 kilometres. But if the orbital elements are not up-to-date, the satellite navigation elements can be displaced by as much as 10 km.

Therefore an interactive quality control by the operator is needed, which involves a visual display of one or more channels of the navigated and calibrated AVHRR data on a colour screen. The location of several readily identifiable land/water boundaries are displayed as an overlay on the monitor, and compared with the actual ones according to the earth reference data computed from the orbit elements, spacecraft clock time, and the pointing angle of the AVHRR scanner. Interactive routines are used to bring the reference overlays into exact alignment with the actual land/water points of the AVHRR data. This is done by first adjusting the spacecraft clock time, which is known to be inaccurate by ± 0.5 seconds, sometimes as much as 1 second. A one second clock error translates to a 6.6 km location error along the satellite. Following the spacecraft clock time correction, another set of corrections is made for adjusting the attitude control system of the spacecraft. The system for maintaining the pitch, roll, and yaw angle is accurate to about 0.2 degrees, which translates to about 2 pixels in the AVHRR data.

Quick look generation

After calibration and navigation an RGB quicklook is generated for each pass using appropriate channels depending on being a day- or night-time pass.

Digital browse quicklooks can be accessed via world wide web. Quicklooks after December 7, 1994 show a combination of AVHRR channels 1-2-4 (RGB) for day-time data (minimum sun zenith angle as threshold) and a combination of channels 5-4-3 (RGB) for night-time data. The data are re-navigated using actual orbital-elements provided by NOAA ("two-line-elements"), resampled to a nadir ground resolution of ~ 6 km, panorama-corrected against distortions due to the earth curvature, brightness and contrast-enhanced, and superimposed with a coastline (WDB-II) in red. No sun-angle correction is performed, in order to provide the user an "informative" view of the brightness conditions in the solar channels 1 and 2.

Level 2 data processing

Cloud masking and products

Clouds in satellite imagery can be considered either as obstacles or objects of interest and are thus qualitatively and quantitatively classified. In either case it is necessary to identify and separate cloudfree from cloudy pixels such that macro- and micro-physical cloud parameters can be determined from cloudy radiances while calculations such as SST, LST or NDVI are derived from cloudfree radiances. Methods for detecting clear sky and cloudy radiances and to derive optical properties of clouds from fully cloudy AVHRR pixels are provided through the APOLLO (AVHRR Processing scheme Over cLOUDs Land and Ocean) software package (SAUNDERS & KRIEBEL 1988, KRIEBEL et al. 1989, GESELL 1989). APOLLO was initiated by a joint effort of the UK Meteorological Office and DLR's Institut für Physik der Atmosphäre. It has since been continuously improved and extended at DFD together with that institute. Among several attempts to establish AVHRR data processing schemes (e.g. COAKLEY & BRETHERTON 1982, LILJAS 1984, ARKING & CHILDS 1985), APOLLO was the first to make use of all five AVHRR channels during day-time and to discretise all AVHRR pixels into four different groups called cloudfree, fully cloudy, partially cloudy (i.e. neither cloudfree nor fully cloudy) and snow/ice-contaminated, before deriving physical properties. Within APOLLO, clouds are further discretised into three layers according to their top temperature, and further a distinction between (thin) ice clouds and water clouds is made. After these classifications are made for the pixels, cloud parameters such as the fractional coverage, top temperature, optical depth, liquid/ice water path and IR emissivity can be derived. Figure 3 shows a night-time example of an APOLLO cloudmask together with a colour-composite of the channels 3, 4 and 5.

At DFD, all the physical methods provided by APOLLO are embedded, together with statistical and mathematical ancillary functions, into a complex scheme (KRIEBEL et al 2003) which is part of the NOAA-16 operational processing chain and a so-called European Cloud Climatology (ECC). Within the NOAA-16 processing chain, APOLLO delivers a simple cloud mask which separates cloudfree from cloud- snow- and ice-contaminated pixels. APOLLO is automatically started as soon as the precise georeferencing is available on the rolling archives server. All subsequent processors which need a cloud-clearing start immediately after APOLLO has finished its cloudmask. The ECC is a long-term open-ended project which up to now consists of about 10,000 processed AVHRR scenes, i.e. cloud parameters for the last 13 years are already stored in the DFD's archives. The ECC will be continued retrospectively back to 1986 and into the future as long as AVHRR data are

available at DFD. The ECC-data are to be analysed continuously and time-series are to be derived in the future.

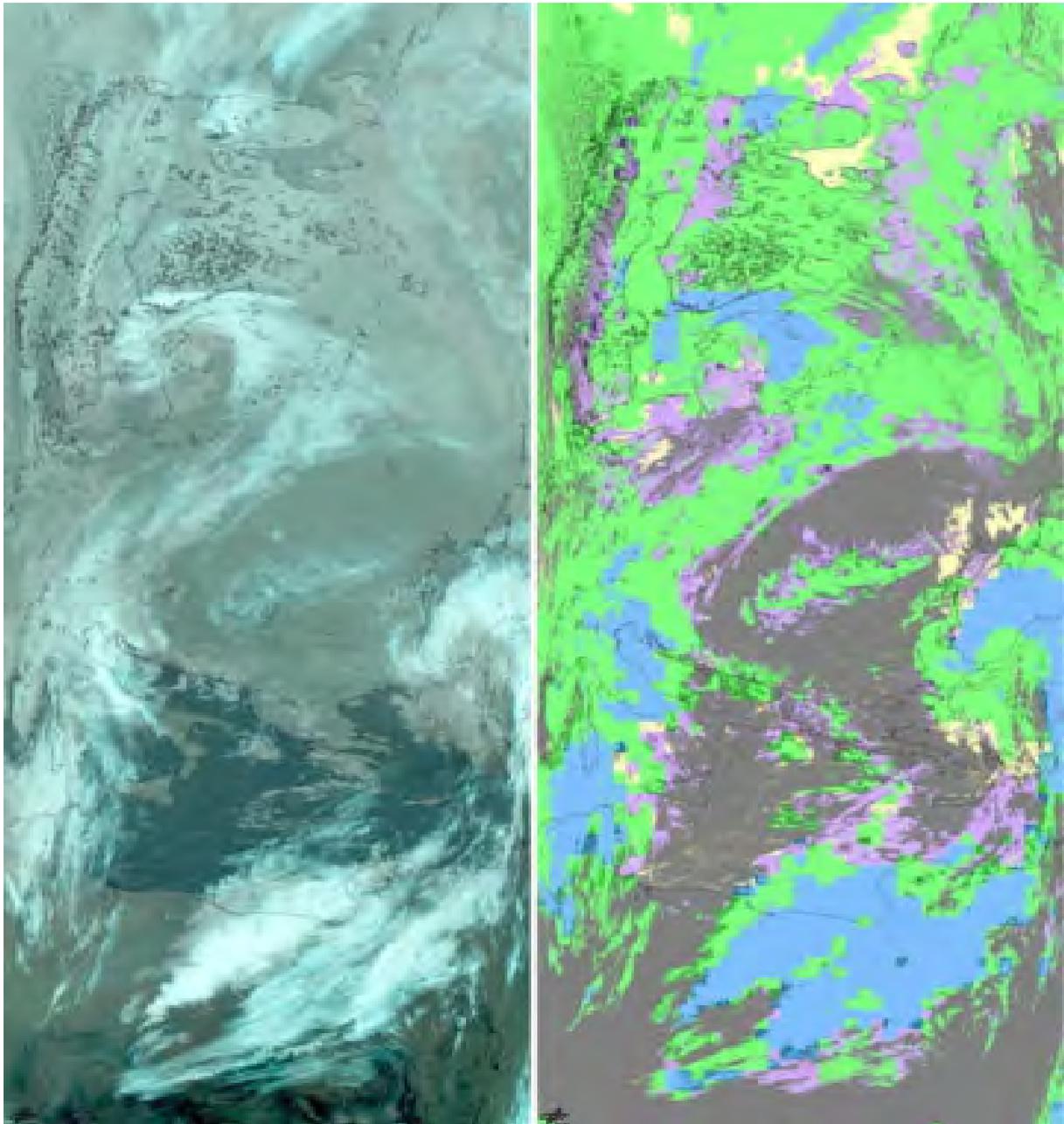


Figure 3: Example of NOAA-16 AVHRR from April 3rd, 2003, 01:01 UT, where left is the colour-composite from channels 3, 4 and 5 and right is a colour-coded APOLLO cloudmask. Low-level clouds are indicated in yellow, mid-level in green, high-level in blue and (thin) ice clouds in lilac. The brightness of the colours is a measure for the fractional coverage (brightest = 100%, darkest = 0%). The grey colour means cloudfree.

Level 3 data processing

Inputs for these processing steps are level 1B data (calibrated, navigated data) and level 2 data (cloud masks in “satellite“ projections). Outputs are 3 value-added products: NDVI of Europe, the MCSST (Multi-Channel Sea Surface Temperature) of European Seas in 3 areas and the LST of Europe on a daily, weekly and monthly basis and thematic subsets for several selected areas.

Generation of NDVI

The NDVI has proven to be very useful in measuring and mapping the density of green vegetation because it partially compensates for changing illumination conditions, surface slope and viewing aspect, all of which are factors that strongly affect observed radiances.

NDVI values are calculated using the technical albedo of channel 1 and 2 according to the following equation, *RED* stands for albedo values in channel 1 and *NIR* for those in channel 2:

$$NDVI = \frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED)} \quad (1)$$

The NDVI product is a fixed grid map with 1.1 km resolution in a stereographic projection (figure 4). The total size of the final map is 4100 samples by 4300 lines. The data from three daily afternoon passes over Europe are processed to a daily NDVI map. Based on the daily NDVI values weekly and monthly composites are processed in which maximum value compositing technique is applied.

The NDVI range is scaled between -0.1 and 0.7 with a radiometric resolution of 0.0031546 (depends on 10-bit-coding). Value of -0.1 is stored for water, clouds are masked out and set to bad value.

Generation of Sea Surface Temperature maps (MCSST)

The need for accurate sea surface temperature fields has been receiving increasing attention, primarily due to its importance in understanding variability in the oceans' climate. When compared to any other type of measurements, satellite SST measurements are attractive due to their global, repeated coverage.

For the derivation of the sea surface temperature (SST) product, eliminating cloud and other atmosphere-induced effects, is very important because clouds obscure the sea surface and therefore the satellite measures cloud top brightness temperatures rather than SSTs.

The McClain algorithm (McCLAIN et al. 1985) is applied for processing the SST. This algorithm is based on a so called 'split window technique' that takes advantage of the differential absorption in the thermal region. The two infrared channels of AVHRR (channel 4 and 5) account for the differential absorption of the atmosphere, mainly for water vapour that could lead to a significant drop in derived brightness temperatures, depending on the climatic region. The formula applied is the following:

$$MCSST = A*T4 + B*(T4-T5) + C*(T4-T5)*(SEC(sza)-1) + D*(SEC(sza)-1) + E \quad (2)$$

For the calculation of the sea surface temperature, the sun zenith angle (sza) must be known as well as the AVHRR measured temperatures in channel 4 and 5 (T4, T5). The coefficients A,B,C,D and E are day/night specific and sensor dependent. They are derived from extended statistics of empirical buoy measurements and provided by NOAA and SeaSpace Corporation, respectively.

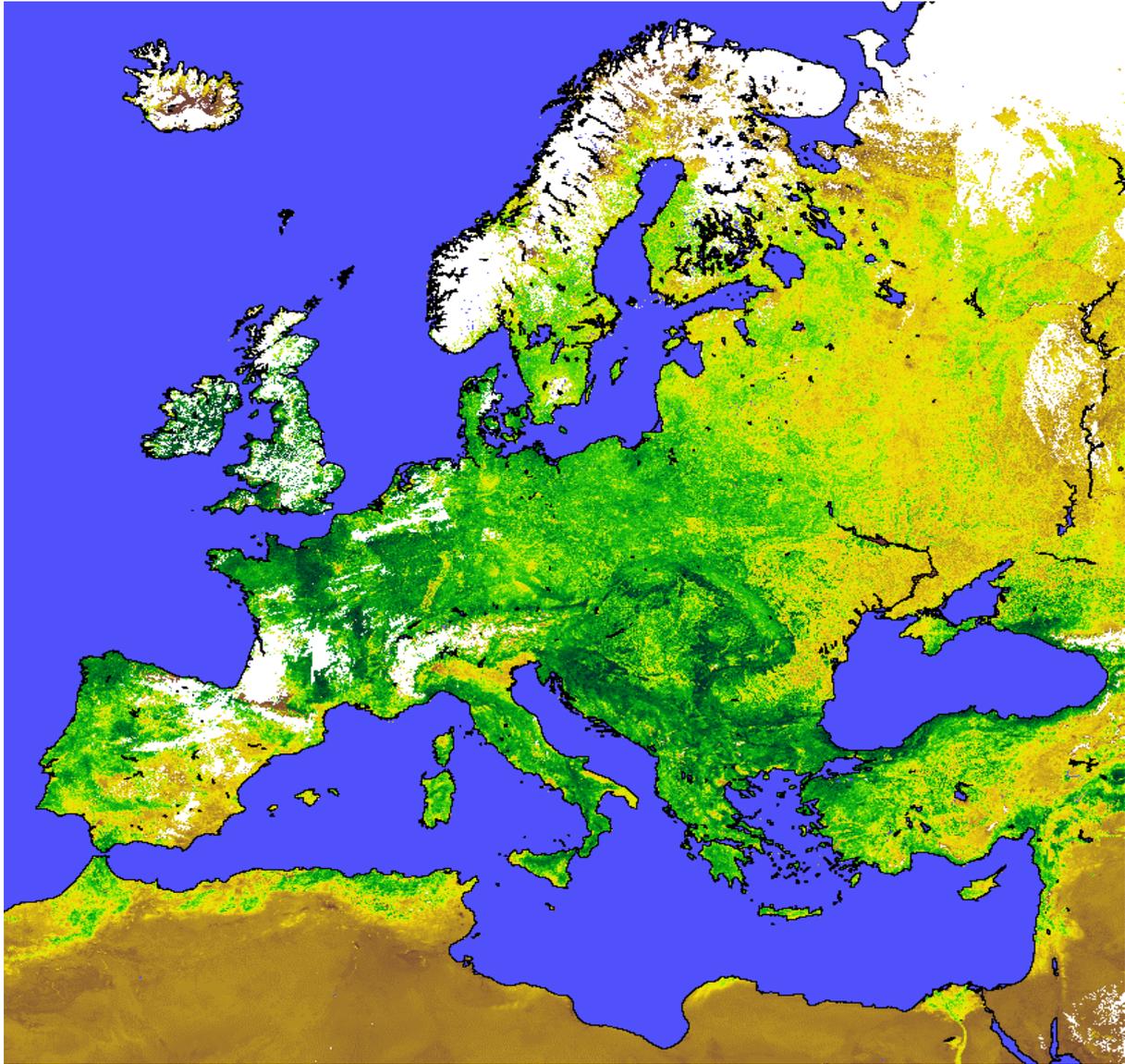


Figure 4: Weekly maximum value NDVI composite for Europe (5th - 11th May, 2003); clouds are masked out (white)

Different MCSST map products of Europe are produced, each with 1.1 km resolution and using a Mercator projection:

- 1) The Mediterranean and Black Seas (2048 lines/ 4096 samples) presented in figure 5
- 2) The North Sea, the Baltic Sea and the North-Eastern Atlantic (2500 lines/ 3900 samples) and
- 3) Atlantic around Madeira and the Canary Island (2200 lines/ 1350 samples)

To register the images from the satellite projection into the final grid-map a nearest neighbour resampling technique is applied.

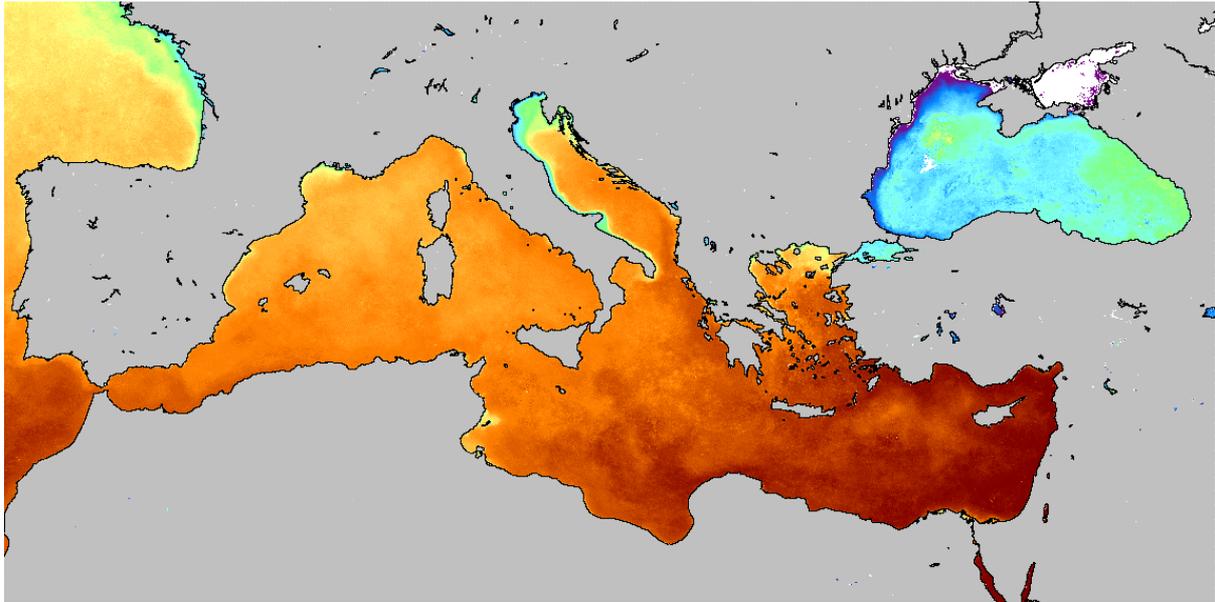


Figure 5: Monthly Sea Surface Temperature (SST) for the Mediterranean Sea (February 2003); clouds are masked out (white)

Generally a daily MCSST composite consist of 3 day-time and 3 night-time single passes. Compositing technique is maximum MCSST. From these daily composites weekly and monthly MCSST products are derived by averaging MCSST values.

The MCSST values are stored between 0.125 and 31.75 degrees Celsius ($^{\circ}\text{C}$) with a radiometric resolution of 0.125°C . The 0°C value is reserved for land, while clouds are stored as bad values.

Generation of LST

Land surface temperature (LST) is an important factor controlling most physical, chemical, and biological processes on earth. LST is generally controlled by the surface energy balance, atmospheric state (wind, humidity), thermal properties of the surface and subsurface mediums. Numerous factors determine the accuracy of the LST retrieval from satellite thermal data, including sensor radiometric calibration, atmospheric correction, surface emissivity correction, characterisation of spatial variability in land cover, and the combined effects of viewing geometry, background, and fractional vegetative cover.

The technique used at DFD for estimating the land surface temperatures from thermal infrared NOAA AVHRR data is also a so-called “Split-Window” method. This technique is based on the differential absorption effects in two infrared bands situated close to each other in order to estimate atmospheric water vapour content (channels 4 and 5 of AVHRR are closely related).

The temperature is derived using an empirical relation of the form:

$$T = a_0 + \sum a_i * T_i \quad (3)$$

where T is the land surface temperature and T_i are the brightness temperatures in two thermal infrared channels. The coefficients a_0 and a_i are dependent on the atmospheric state and on the surface emissivity. Unlike sea surface, where the emissivities are quite similar in the thermal

infrared channels, land surface emissivities depend on the type and condition of the land surface. In addition, the emissivities are wavelength-dependent. If neglected, these variations introduce large errors in the calculated LST.

The BECKER & LI algorithm (1990) is applied for processing LST over Europe at DFD.

$$T_{\text{Becker\&Li}} = 1.274 + (T4 + T5) * \frac{1}{2} * [1 + 0.15616 * (1 - \epsilon) / \epsilon - 0.482 * \Delta\epsilon / \epsilon^2] + (T4 - T5) * \frac{1}{2} * [6.26 + 3.98 * (1 - \epsilon) / \epsilon + 38.33 * \Delta\epsilon / \epsilon^2] \quad (4)$$

where

$$\epsilon = (\epsilon4 + \epsilon5) / 2 \quad (5)$$

$$\Delta\epsilon = (\epsilon4 - \epsilon5) \quad (6)$$

For estimating the surface emissivity $\epsilon(\lambda)$ the relationship given by VAN DE GRIEND et al. (1993) is applied:

$$\epsilon4 = 1.0094 + 0.047 * \ln(\text{NDVI}) \quad (7)$$

$$\Delta\epsilon = (\epsilon4 - \epsilon5) = 0.01 \quad (8)$$

NDVI here stands for the 10-day NDVI maximum composite value based on the daily composites operationally generated at DFD.

Under the assumption that the emissivity remains nearly constant within a period of ten days, the 10-day composite is a suitable input parameter to reduce cloud contamination effects and to take into account the effects caused by angular viewing conditions of the sensor.

The LST product is a fixed grid map with 1.1 km resolution in a stereographic projection (figure 6). The total size of the final map is 4100 samples by 4300 lines. Within 24 hours, day-time and night-time LST's are calculated. In general, from 3 day-time single passes or 3 night-time single passes the products are generated. Compositing technique for daily day-time LST is maximum NDVI value and for daily night-time LST maximum LST value. Weekly and monthly day-time or night-time LST composites are also obtained by averaging daily day-time or daily night-time LST values respectively.

The LST range is scaled between -39.5°C and $+87^{\circ}\text{C}$ with a radiometric resolution of 0.5°C . Value of -40°C is used for water, and clouds are masked out as bad values.

Generation of Thematic Images (e. g. "Central Europe", CE)

Five-channel NOAA-16 image subsets in standard Mercator projection are created daily for several areas such as "Central Europe" and allow user-specific applications. The data sets are navigated, calibrated, registered and scaled to a user-friendly 8-bit data format. Coastlines and state boundaries are overlaid.

Product access

Datasets in HRPT formats are stored on different media in the DFD archives. Older data are stored on HDDT analogue tapes and some on digital CCT. Since 1990 all datasets are stored digitally on tape archives. Users can get data either in a DLR-specific "DFD" format which

contains the complete datastream (AVHRR, TOVS, DCS, etc.) as well as raw HRPT and NOAA LAC format on various distribution media (CD ROM, tape, ftp etc.).

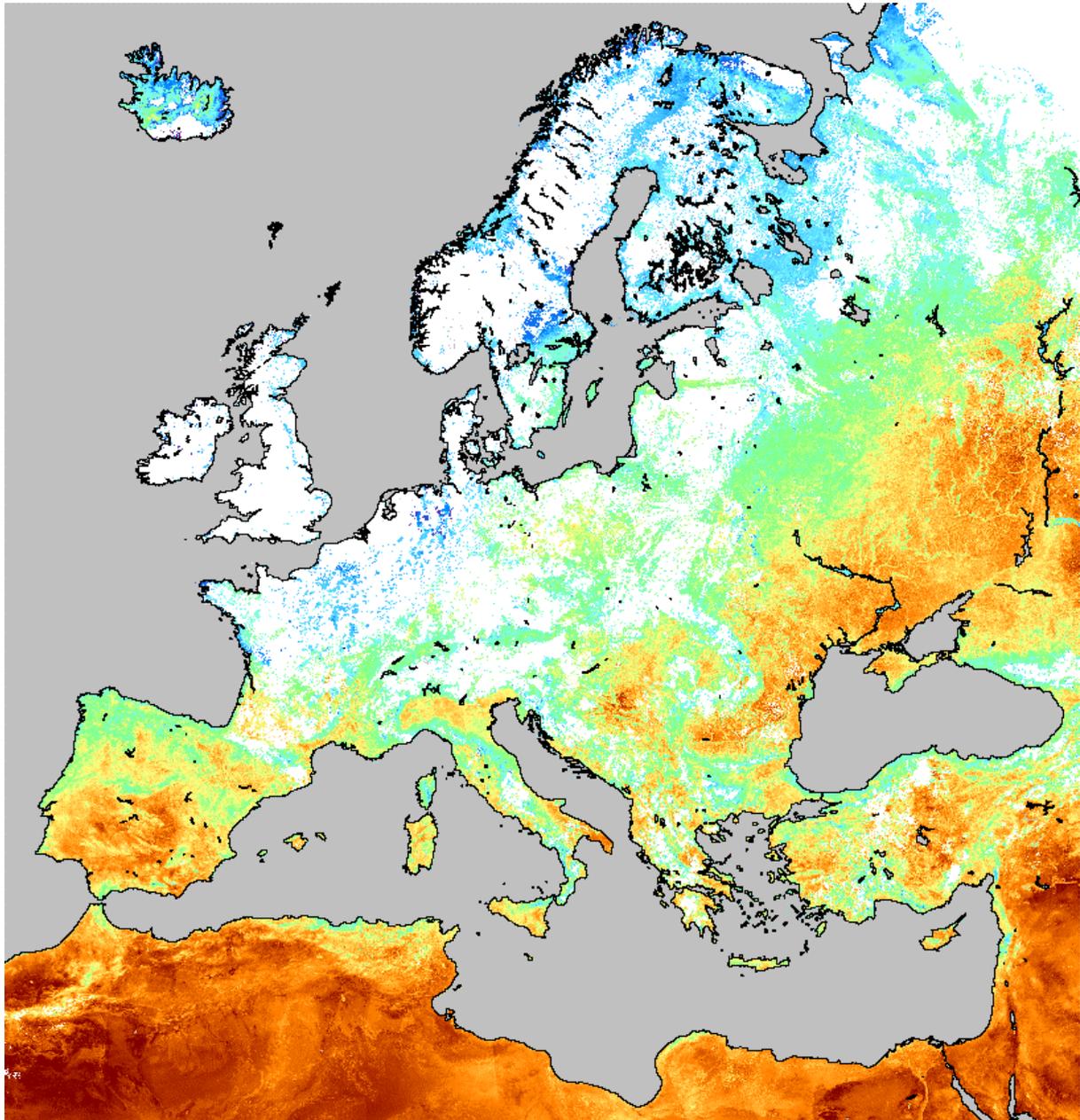


Figure 6: Weekly Land Surface Temperature (LST) composite (19th - 25th May, 2003); clouds are masked out (white)

Subsets of AVHRR acquisitions stored in the ESA-Earthnet SHARP format (Standard-family HRPT Archive Request Product) can also be ordered at the DFD. The AVHRR scenes in SHARP format contain 4 minutes of acquisition, thus 1440 lines.

In 1993, the operational delivery of daily, weekly and monthly MCSST products started. Value-added products as the daily, weekly and monthly NDVI have been available since mid-1994. Since 1995, the land surface temperature (LST) has been available as weekly and monthly day- and night-maps. Most products are available with a delay of one day except after weekends and holidays through DFD's Intelligent Satellite Information System (ISIS) or

EOWEB. ISIS software can be downloaded and installed on a PC or workstation (<http://isis.dlr.de>).

The new EOWEB interface (<http://www.oweb.de>) will run on any browser supporting Java 1.1.3, LiveConnect, JavaScript, so that the Java Swing libraries/applets are supported. With EOWEB, online transfer is possible for the products:

- 1) NOAA AVHRR Central Europe
- 2) NOAA AVHRR SST
- 3) NOAA AVHRR LST and
- 4) NOAA AVHRR NDVI.

The thematic maps SST, LST and NDVI consist of one layer in 8-bit resolution. The data format can be selected by the user (GIF, TIFF, Sun Raster or HDF4). Due to the great data volume of the thematic products, a very high compression rate can be achieved for on-line transfer. The quicklooks are stored in JPEG format and can be downloaded. All products are also available off-line and can be sent on CD on request.

New products

In early 2003, an experimental processor for routine correction of atmospheric disturbances was set-up. The atmospheric correction is based on the "Simplified Method of Atmospheric Correction" (SMAC) (RAHMAN & DEDIEU 1994). Inputs to the pre-operational processor include atmospheric products from other operational DFD processors. Water vapour is derived operationally from NOAA-TOVS data and interpolated for AVHRR coverage and spatial resolution. Ozone absorption is corrected using level-3 data derived operationally in near-real time at DFD from ERS-2 Global Ozone Monitoring Experiment (GOME). This level-3 data is derived using Kalman filter techniques for spatial and temporal interpolation. The aerosol content and type are not yet derived from remote sensing data and therefore set to default values.

Our first results show that the integration of different remote sensing data sources needs precise data management and highly sophisticated quality control. Nevertheless, routinely atmosphere-corrected AVHRR data (channel 1 and 2) may become a better basis for long-term monitoring of the land environment.

In order to use the AVHRR products more efficiently for climate change research (e.g. modelling the net primary productivity of land vegetation), an operational processing chain is under development for generating homogenised yearly time series of the NDVI. Applying the Harmonic Analysis (HA) to the noisy and missing data NDVI composites gives a smoothed and interpolated data set suitable as input for different models. Our first results show that missing data gaps of up to 20 weeks duration, which are typically observed for boreal forests during winter time, can be interpolated with good results. This new processor will be tested in the near future with a NDVI data set covering one year and entire Europe. Based on the smoothed NDVI data set, the LAI time series will be derived using the algorithm of SELLERS et al. (1996).

Conclusion

Since November 1981 the German Remote Sensing Data Centre (DFD) of the German Aerospace Centre (DLR) has been receiving AVHRR satellite data to serve the needs of the national and international user community. The operational processing of AVHRR data at DFD has now delivered a 10-year time series of the Sea Surface Temperature (SST) covering the European seas. With this dataset a first climatological record with 1 km resolution is archived and can be accessed by users via the internet. Also, the 9 years operational processing of AVHRR data to derive the Normalised Difference Vegetation Index (NDVI) and the Land Surface Temperature (LST) has brought up a valuable dataset for climatological investigations.

All products are currently accessible free of charge through DFD's electronic interfaces ISIS and EOWEB.

Acknowledgements

We thank all of our colleagues from the DFD department "International Ground Segment" for their daily support. Their work makes AVHRR data and products visible to our customers and the public.

We also thank our French colleagues from CESBIO for delivering the SMAC code adapted for NOAA-16.

The authors express their appreciation to M. Bittner, T. Holzer-Popp, T. Erbertseder and M. Schroedter for their valuable contributions to the set-up of the atmospheric correction processor and the daily delivery of atmospheric input data.

References

- ARKING, A., & CHILDS, J.D., 1985: Retrieval of cloud cover parameters from multispectral satellite measurements.- *Journal of Applied Meteorology*, **29**: 994-1004.
- BECKER, F., & LI, Z.L., 1990: Towards a local split window method over land surface.- *International Journal of Remote Sensing*, **3**: 369-393.
- BITTNER, M., DECH, S.W., & MEISNER, R.E., 1997: Monitoring of polar ozone depletion using ERS-2 GOME. - *Earth Observation Quarterly*, **55** (08/95): 6-10.
- COAKLEY, J.A., & BRETHERTON, F.P., 1982: Cloud cover from high-resolution scanner data: detecting and allowing for partially filled fields of view. - *Journal of Geophysical Research*, **87**: 4917-4932.
- DECH, S.W., TUNGALAGSAIKHAN, P., PREUSSER, C., & MEISNER, R., 1998: Operational value-adding to AVHRR data over Europe: methods, results, and prospects. - *Aerospace Science and Technology*, **5**: 335-346.
- GESELL, G., 1989: An algorithm for snow and ice detection using AVHRR data: An extension of the APOLLO software package: - *International Journal of Remote Sensing*, **10**: 897-905.
- KRIEBEL, K.T., GESELL, G., KÄSTNER, M., & MANNSTEIN, H., 2003: The cloud analysis tool APOLLO: Improvements and validations: - *International Journal of Remote Sensing*, accepted for publication.

- KRIEBEL, K.T., SAUNDERS, R.W., AND GESELL, G., 1989: Optical properties of clouds derived from fully cloudy AVHRR pixels: - *Beiträge zur Physik der Atmosphäre*, **8**:165-171.
- LAURITSON, L.N., PORTO, G.J., & FRANK, W., 1979: Data Extraction and Calibration of TIROS-N/NOAA Radiometers: - NOAA Technical Memorandum **NESS-107**.
- LILJAS, E., 1984: Processed satellite imageries for operational forecasting. - Swedish Space Corporation, Stockholm, Sweden.
- MCCLAIN, P.E., PICHEL, W.G., & WALTON, C.C., 1985: Comparative Performance of AVHRR-Based Multichannel Sea Surface Temperatures: - *Journal of Geophysical Research*, **90** (C6): 11587 - 11601.
- RAHMAN, H. & DEDIEU, G, 1994: SMAC: A simplified method for the atmospheric correction of satellite measurements in the solar spectrum. - *International Journal of Remote Sensing*, **15**: 123-143.
- RAO, C.R.N., & CHEN, J., 1997: Post-launch calibration of the visible and near-infrared channels of the Advanced Very High Resolution Radiometer on the NOAA-14 spacecraft. - *International Journal of Remote Sensing*, **17**: 2743-2747.
- SAUNDERS, R.W., & KRIEBEL, K.T., 1988: An improved method for detecting clear sky and cloudy radiances from AVHRR data: - *International Journal of Remote Sensing*, **9**: 123-150.
- SELLERS, P.J., LOS, S.O., TUCKER, C.J., JUSTICE, C.O., DAZLICH, D.A., COLLATZ, G.J., & RANDALL, D.A., 1996: A revised land surface parameterization (SiB2) for atmospheric GCM's. Part II: The generation of global fields of terrestrial biophysical parameters from satellite data: - *Journal of Climate*, **9**: 706-737.
- TEILLET, P.M., & HOLBEN, B.N. , 1994: Towards operational radiometric calibration of NOAA AVHRR imagery in the visible and near-infrared channels. - *Canadian Journal of Remote Sensing*: **20** (1): 1-10.
- VAN DE GRIEND, A.A. & OWE, M., 1993: On the relationship between thermal emissivity and the normalized difference vegetation index for natural surfaces. - *International Journal of Remote Sensing*, **14**: 1119-1137.

Cartography with HRSC on Mars Express – The New Series “Topographic Image Map Mars 1:200,000”

STEPHAN GEHRKE¹, MARITA WÄHLISCH², HARTMUT LEHMANN³,
TINO SCHUMACHER⁴, JÖRG ALBERTZ⁵

Zusammenfassung: Der Mars ist zurzeit Ziel von vier Raumfahrt-Missionen. Als eine von ihnen bringt Mars Express die hochauflösende Stereokamera HRSC in den Marsorbit. Speziell unter photogrammetrischen und kartographischen Gesichtspunkten konzipiert, wird diese Kamera eine neue Ära der Mars-Kartographie einleiten.

Während die Bilddaten am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt prozessiert werden, generiert die Technische Universität Berlin darauf aufbauend großmaßstäbige Karten, allen voran die Topographic Image Map Mars 1:200,000. Diese Arbeit beschreibt das Layout des Kartenwerks sowie die zu Grunde liegenden Koordinatensysteme und Projektionen unter Beachtung der jüngsten Neudefinitionen. Bilddaten, deren Prozessierung und daraus abgeleitete Digitale Geländemodelle sowie die Mars-Nomenklatur als Grundlagen topographischer Bildkarten werden erläutert. Abschließend wird das an der TU Berlin entwickelte Softwaresystem zur automatischen Kartenerstellung vorgestellt.

1 Introduction

Mars, our neighboring planet, is becoming subject to a new era of scientific research. Not less than four missions are on their way to the Red Planet: the Japanese Nozomi, the American Mars Exploration Rover twins, namely Spirit (MER-A) and Opportunity (MER-B), and *Mars Express*, which is the first European mission to a planet ever. Mars Express was successfully launched on June 2, 2003. As the first of these missions it will enter the Martian Orbit after a seven month journey in late December. Beside the orbiter module the spacecraft brings the lander unit Beagle 2 to Mars.

Amongst other experiments, the Mars Express orbiter carries the *High Resolution Stereo Camera* (HRSC). This research program, which is guided by Prof. Dr. GERHARD NEUKUM (Free University Berlin) as the Principal Investigator, has been particularly designed to meet the demands of stereophotogrammetry and cartography. The camera will provide multi-spectral digital image data of high resolution (up to 10 m) as well as systematic stereo coverage of the Martian surface. Thus, the mission will start a new era of topographic and

¹ Technische Universität Berlin, Photogrammetrie und Kartographie, Sekretariat EB9, Str. d. 17. Juni 135, 10623 Berlin, E-mail: stephan@fpk.tu-berlin.de

² Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Institut für Weltraumsensorik und Planetenerkundung, Rutherfordstr. 2, 12489 Berlin, E-Mail: marita.waehlich@dlr.de

³ Technische Universität Berlin, Photogrammetrie und Kartographie, ..., E-Mail: hartmut@fpk.tu-berlin.de

⁴ Technische Universität Berlin, Photogrammetrie und Kartographie, ..., E-Mail: tino@fpk.tu-berlin.de

⁵ Technische Universität Berlin, Photogrammetrie und Kartographie, ..., E-Mail: albertz@fpk.tu-berlin.de

thematic mapping of planet Mars. Furthermore, the Super Resolution Channel of the camera will acquire image data of extremely high resolution (up to 2 m) from smaller areas of particular interest (NEUKUM et al. 2002).

The HRSC image data will be processed systematically at the German Aerospace Center (DLR) in Berlin to various data levels. Based on these products, the Technical University Berlin can generate large-scale topographic and thematic image maps, special target maps and related products of the Martian Surface. The main goal is the production of the *Topographic Image Map Mars 1:200,000* series. Due to the large number of maps to be generated, this work has to be automated using a cartographic software system.

2 Topographic Image Map Mars 1:200,000

The basic concept of the Topographic Image Map Mars 1:200,000 series originally has been designed for Mars 96 mapping purposes (LEHMANN et al. 1997). For Mars Express and future mapping activities the map series has been updated considering the latest developments with regard to new reference body definitions as well as changes in the common coordinate system. Although the effect to individual map contents is significant in parts, only slight modifications to the principle layout scheme occur.

Despite the loss of the Mars 96 mission some maps in the style of the Topographic Image Map Mars 1:200,000 series have been generated over the past years, such as one showing the Mars Pathfinder landing site (LEHMANN et al. 1999). Recently a specimen sheet of the series according to the new definitions has been presented (GEHRKE et al. 2003).

2.1 Reference System

The common Martian reference body for planimetry is a bi-axial (rotational) ellipsoid. Recently new ellipsoid parameters have been derived through a global adjustment of the most actual and very extensive *Mars Observer Laser Altimeter* (MOLA) dataset. As a result the best-fitting surface has been given by DUXBURY et al. (2002) with a semi-major (equatorial) axis of 3396.19 ± 0.10 km and a semi-minor (polar) axis of 3376.20 ± 0.10 km. These parameters are officially adopted by the International Astronomical Union (IAU) as the Mars IAU 2000 ellipsoid (SEIDELMANN et al. 2002).

An equipotential surface (Areoid = Martian Geoid), which is derived from *Mars Global Surveyor* (MGS) Doppler tracking data, is the reference surface for heights. The average equatorial radius of the Areoid is equal to that of the above-mentioned ellipsoid (SMITH et al. 2001).

According to IAU conventions two different types of planetary coordinate systems are in use. One consists of positive western longitude and planetographic latitude (west/planetographic), the other one of positive eastern longitude and planetocentric latitude (east/planetocentric). While the former system had been the Martian standard for decades, the MOLA team switched to the latter one. Hence, the best global dataset of Mars is in east/planetocentric coordinates (DUXBURY et al. 2002). Since for that reason most mission teams are switching to it, the east/planetocentric coordinate system becomes the standard of Mars Express mapping too. The Topographic Image Map Mars 1:200,000 still contains both the primary east/planetocentric system, which also defines the sheet lines, and the west/planetographic coordinate system.

2.2 Map Projections

As already decided earlier, equal-area map projections are applied for compiling the Topographic Image Map Mars 1:200,000. The Sinusoidal Projection in its authentic ellipsoidal form is applied to all map sheets between 85° north and south. However, the polar regions can not be mapped appropriately by this projection. Therefore the Lambert Azimuthal Projection was selected for mapping the regions beyond 85° and 90° north or respectively south (LEHMANN et al. 1997).

An overview of the map series layout is given by figure 1.

2.3 Map Sheet Layout

Since under the topographic conditions conventional line maps of the Martian surface are not useful, the series is planned as an image map. The orthoimage as the basic information is supplemented by the map frame, two graticules (east/planetocentric and in addition west/planetographic), Martian feature names and marginal annotations. Furthermore, the image map contains relief information in terms of contour lines and spot heights.

The map sheet layout has been designed considering the ease of handling as well as production costs and technical restrictions for printed maps. While all sheets feature the same latitude dimension of 2 degrees, their longitude dimensions are latitude-dependant in such a way that map widths do not vary too much. Considering the scale of 1:200,000 for Mars this results in mapped surfaces of approximately 59 cm in height for the sinusoidal projected sheets, and around 62 cm (with curved parallels) for the azimuthal sheets; the maximum sheet width is approximately 70 cm. Further information regarding the sheet lines as well as the map layout is given by LEHMANN et al. (1997).

Altogether a total number of 10,372 map sheets, 10,324 in Sinusoidal Projection and 48 in Lambert Azimuthal Projection, will provide complete coverage of the planet Mars as illustrated by figure 1.

2.4 Sheet Designation and Name

Each sheet of the Topographic Image Map Mars 1:200,000 series is identified by a specific designation code. According to GREELEY & BATSON (1990) a planetary map is labeled by four designators: planet, scale, location and version. E.g. the code “M 200k 14.0S/176.0E OMT” identifies a map sheet of Mars in scale 1:200,000, centered at 14.0° southern planetocentric latitude and 176.0° eastern longitude, which is based on an orthophotomosaic and supplemented with topographic data, in particular contour lines and nomenclature. Solely the location parameters differ between the sheet designations of the Topographic Image Map Mars 1:200,000 series. It should be remarked, that within this series the year of publication, which is often given as part of the designation, appears in the copyright note.

In addition to the designation the sheets will be named after a mapped surface feature, where this is possible. Since there are less than 1,500 named features on Mars (USGS 2003), obviously only a small share of the 10,372 sheets could be provided with reasonable names – it would not make sense to derive such sheet name from a global feature complemented with a set of complex specifications.

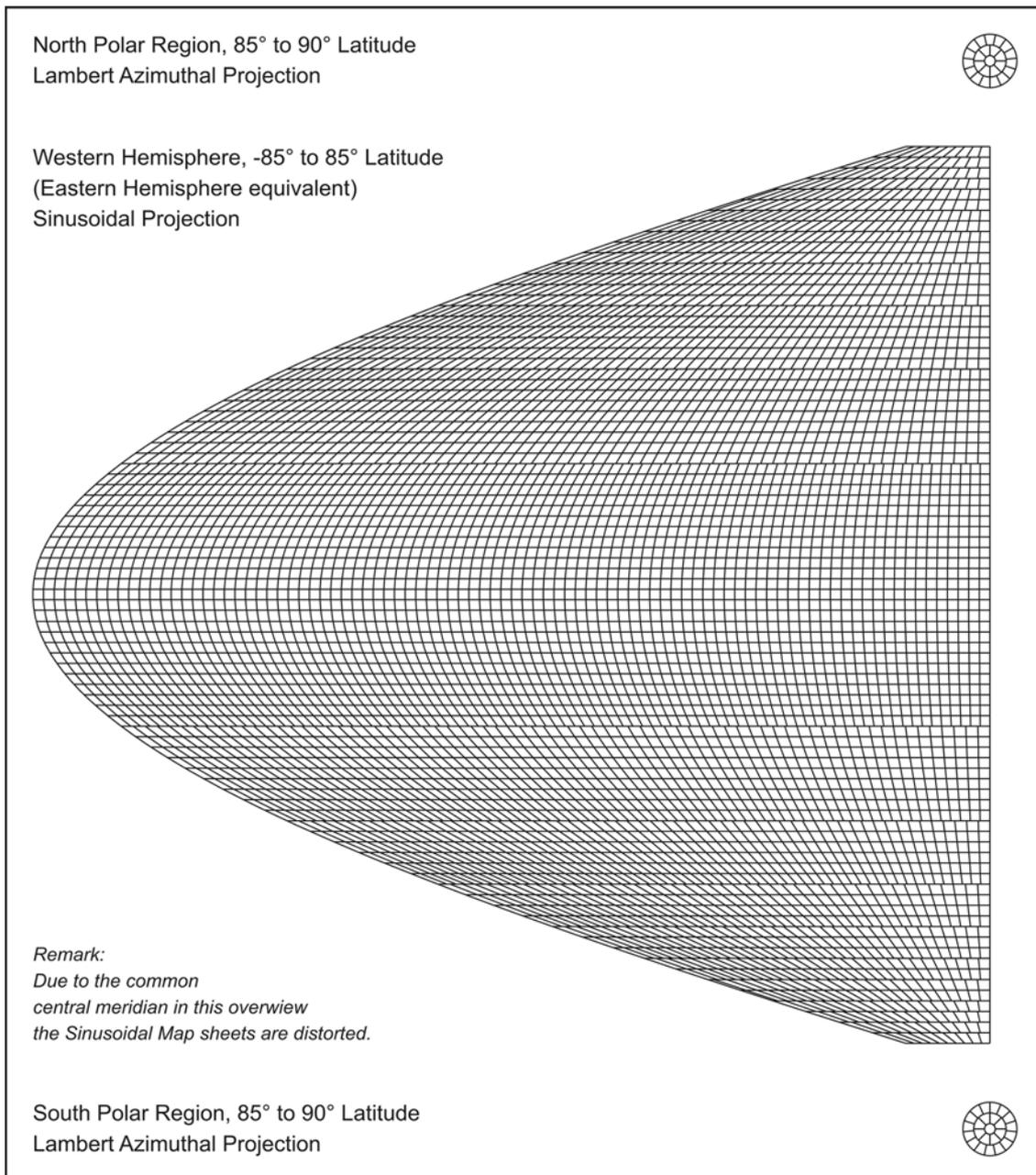


Figure 1: Sheet Lines System of the Topographic Image Map Mars 1:200,000 (Scale: 1:110,000,000)

3 Image and DTM Data

The HRSC is designed as a line scanner. Altogether nine lines (four color, including infrared, and five panchromatic) are arranged under five viewing angles (nadir, two backward and forward respectively). For details see NEUKUM et al. (2002).

At DLR the HRSC data will be processed systematically to various data levels. After basic ground processing, e.g. decompression, calibration and geometric correction, the image data undergo the photogrammetric processing, which is fulfilled by a software system mainly developed at TU Berlin for Mars 96 and now adapted and implemented at DLR. Of special importance for map generation purposes are the resulting orthophoto-mosaics, forming the

actual image background, and the Digital Terrain Models (DTM's) as basic dataset for the derivation of contour lines.

Orthophoto-mosaics will be provided as map projected color image data, depending on the available HRSC imagery. Similarly to that DTM files consist of grayscale-coded heights. Although these data can be projected like the map sheet to be generated, it is planned to produce mosaics and DTM's larger than one sheet of the Topographic Image Map Mars 1:200,000. Thus for the practical map production (see also chapter 5) normally image resampling will be necessary, in particular for special target maps.

4 Martian Nomenclature

Martian Nomenclature is regulated by the IAU. Several descriptor terms have been defined to distinguish global land masses (terra, comparable to Earth's continents), regional features like planes, valleys, etc. and local types, e.g. craters (KIEFFER et al. 1992). About 1500 surface features are named until now. Most of them are impact craters. The most actual and all-embracing dataset of these features, amongst other things containing the names and location parameters, is provided within the *Gazetteer of Planetary Nomenclature* by USGS (2003). In particular the feature location is given by the center point, the size (e.g. the diameter of a crater) and in addition the starting and ending latitudes and longitudes (bounding box) as illustrated in figure 2.

By looking at the number of named features, it is clear that the sheets of the Topographic Image Map Mars 1:200,000 will often contain solely one (global) feature. So far Martian names are not assigned if features have been recognized but only when the need of names comes up through scientific investigations, e.g. the analysis of potential landing sites. Although, coming along with the new missions, some further nomenclature will appear, it is subject of discussion to assign new names particularly for the challenge of large-scale mapping of Mars.

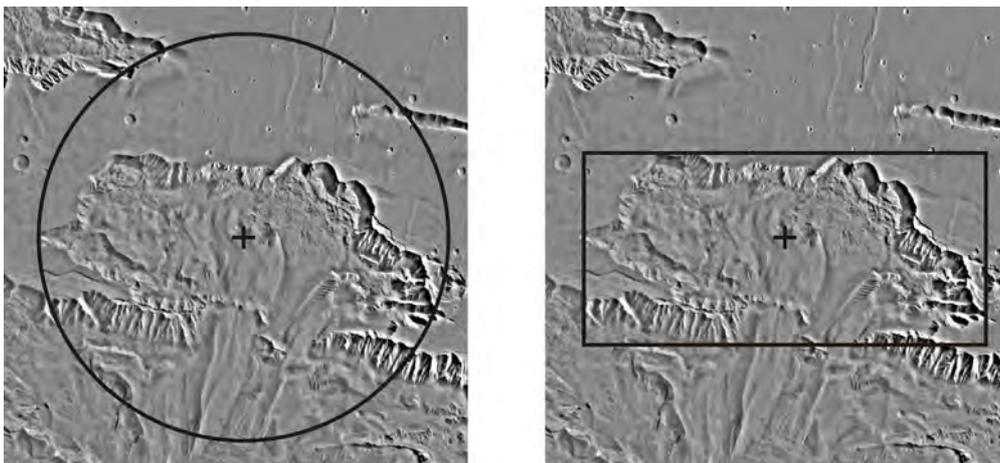


Figure 2: Localization Parameters of Ophir Chasma (Center: 4.0°S/287.5°E)

Especially impact craters are of major scientific interest. On one hand Martian control point networks are based on craters, on the other hand many investigations, e.g. automatic feature detection or ejecta morphology studies, have been made over the past. Recently the *Mars Crater Morphology Consortium* was formed in order to address issues related to impact craters and to integrate inventories into one database. The most complete of the existing datasets is the *Catalog of Large Martian Impact Craters*, including every crater with a diameter

larger than 5 km, altogether more than 40,000. Therefore it is determined by the Consortium being the base of a new Integrated Crater Catalog whose publication through the web is planned (BARLOW et al. 2003).

Amongst other things the Catalog of Large Martian Impact Craters contains feature ID's (numbers) and their location similar to the above-mentioned Gazetteer of Planetary Nomenclature. When finally revised by the Consortium and transformed into the new east/planetocentric coordinate system, the catalog will be integrated into the Topographic Image Map Mars 1:200,000. Providing such a large set of information obviously valorizes the map series for its users.

5 Cartographic Data Processing

By looking at the number of 10,372 sheets of the Topographic Image Map Mars 1:200,000 and in addition several other maps to be produced within the Mars Express mission, it is evident that this production has to be fulfilled as automatically as possible, even when only a smaller share of the series is generated. Therefore a sophisticated cartographic software system compiles all map content according to the user's definitions, which ranges from simply choosing a particular sheet out of the map series up to very individual map specifications. The whole production line becomes completely digitally. Final products are digital versions of maps, which can and will be printed on demand.

The cartographic software system was developed over the past two years at the TU Berlin; it is nearly ready for operation (GEHRKE et al. 2003). Starting from the orthoimages provided by DLR the software adjusts them to the mapped surface by resampling and fitting. This basic data set is automatically completed by frame and grid line systems, all related topographic data and several marginal annotations including the sheet designation.

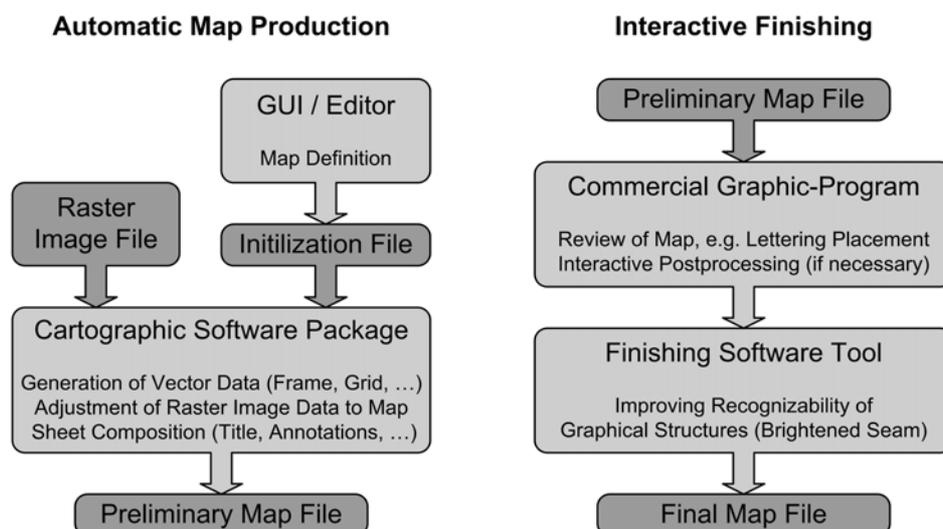


Figure 3: Overview of the Cartographic Data Processing

An appropriate hybrid format, which is suited to handle both raster and vector data, has been chosen for storing all map content. This is of special importance, since each sheet has to be finished interactively using vector-oriented commercial software. Automatically placed nomenclature could cover important image information and has eventually to be shifted in an appropriate way. Finally the recognizability of graphical structures in dark image regions has to be enhanced by laying a brightened seam around them as proposed by ALBERTZ (1993).

6 Conclusion

The HRSC aboard the Mars Express orbiter will open up a new era of Mars mapping; the Topographic Image Map Mars 1:200,000 series, based on HRSC imagery, will become true as the first large-scale map series of our neighboring planet. Recent changes in Martian reference systems and coordinates as well as results of the latest investigations have been or respectively will be integrated into the map series. Therefore the Topographic Image Map Mars 1:200,000 presents itself as a very modern product, which will be the guideline for future topographic map series in larger scales and for comparable thematic map products as well. Special target maps, e.g. in 1:100,000 and larger scales, could easily be derived by dividing the 1:200,000 maps accordingly.

The cartographic software system, which will handle the automatic map production, has been developed at the TU Berlin. As a first comprehensive test of the software and the whole production line recently a particular sheet of the new Topographic Image Map Mars 1:200,000 has been produced and published by GEHRKE et al. (2003). The generation of this specimen sheet demonstrated, that the software system for the map production works nearly operational.

HRSC image data are expected from early January 2004 on; accordingly the first map products will be published afterwards.

The authors gratefully acknowledge the cooperation with project group members at the German Aerospace Center (DLR) in Berlin, under the guidance of Dr. RALF JAUMANN.

7 References

- ALBERTZ, J., LEHMANN, H., SCHOLTEN, F., TAUCH, R., 1992: Satellite Image Maps – Experiences, Problems and Chances. – IAPRS, Vol. XXIX, Washington D.C., Part B4: 309-314
- ALBERTZ, J., 1993: Merging Graphical Elements and Image Data in Satellite Image Maps. – Proceedings of the International Mapping from Space Workshop and Conference, Hannover: 265-271
- BARLOW, N.G. et al. (MARS CRATER MORPHOLOGY CONSORTIUM), 2003: Utilizing GIS in Martian Impact Crater Studies. – Proceedings of the ISPRS WG IV/9 Extraterrestrial Mapping Workshop, Houston 2003
- DUXBURY, T.C., KIRK, R.L., ARCHINAL, B.A., NEUMANN, G.A., 2002: Mars Geodesy/ Cartography Working Group Recommendations on Mars Cartographic Constants and Coordinate Systems. – IAPRS, Vol. XXIV, Ottawa, Part 4
- GEHRKE, S., WÄHLISCH, M., LEHMANN, H., SCHUMACHER, T., ALBERTZ, J., 2003: Cartography with HRSC on Mars Express – A Specimen of the New Series “Topographic Image Map Mars 1:200,000”. – Proceedings of the ISPRS WG IV/9 Extraterrestrial Mapping Workshop, Houston
- GREELEY, R., BATSON, R.M., 1990: Planetary Mapping. – 296 p., Cambridge University Press, Cambridge
- KIEFFER, H.H., JAKOSKY, B.M., SNYDER, C.W., MATTHEWS, M.S., 1992: Mars. – 1498 p., University of Arizona Press, Tucson

- LEHMANN, H. SCHOLTEN, F., ALBERTZ, J., WÄHLISCH, M., NEUKUM, G., 1997: Mapping a Whole Planet – The New Topographic Image Map Series 1:200,000 for Planet Mars. – IAPRS, Vol. XXXI, Vienna, Part 4
- LEHMANN, H., ALBERTZ, J., WÄHLISCH, M., ZEITLER, W., NEUKUM, G., 1999: The Mars Pathfinder Landing Site – A Topographic Image Map 1:200,000. – Proceedings of the 19th International Cartographic Conference, Section 13, Ottawa: 15-23
- NEUKUM, G. and the HRSC CO-INVESTIGATOR AND EXPERIMENT TEAM, 2002: The High Resolution Stereo Camera of Mars Express. – ESA Special Publication, SP-1240
- SEIDELMANN, P.K. et al., 2002: Report Of the IAU/IAG Working Group on Cartographic Coordinates and Rotational Elements of the Planets, and Satellites: 2000. – Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy, Vol. 82: 83-110.
- SMITH, D.E. et al., 2001: Mars Orbiter Laser Altimeter: Experiment Summary after the First Year of Global Mapping of Mars. – Journal of Geophysical Research, Vol. 106 (E10): 23,689-23,722.
- USGS, 2003: Gazetteer of Planetary Nomenclature. – <http://planetarynames.wr.usgs.gov>

Autorenverzeichnis

ALBERTZ, J.: siehe GEHRKE, S.; WÄHLISCH, M.; LEHMANN, H.; SCHUMACHER, T. & ALBERTZ, J.: Cartography with HRSC on Mars Express – The New Series „Topographic Image Map Mars 1:200,000“	451
BÄUMKER, M. ; HAHN, H ; HEIMES, F.-J. & VESTJENS, G.: Ein strenges funktionales Modell für die direkte Georeferenzierung und modellgestützte Regelung einer Fernerkundungsplattform	15
BISCHOFF, L.: siehe ZUMSPREKEL, H. & BISCHOFF, L.: Möglichkeiten der Fernerkundung zur Analyse terrestrischer Impaktstrukturen	363
BOCHOW, M.; GREIWE, A. & EHLERS, M.: Ein Prozessmodell zur Analyse von Hyperspektraldaten in urbanen Gebieten	255
BOOCHS, F.; ECKHARDT, S. & FISCHER, B.: Einsatz des Open Source CAD Paketes „Open CASCADE“ für die stereoskopische Objekterfassung aus digitalen Messbildern	285
BRIESE, C. & KRAUS, K.: Laser-Geländemodelle: Zusammenspiel von Filterung und Datenreduktion	125
BRUNN, A. & FISCHER, C.: Erfassung bergbaubedingter Veränderung von Vegetationsparametern durch Nutzung hyperspektraler Bilddaten	211
BUCERIUS, M. & FUß, R.: Fernerkundung auf Schutz- und Förderflächen – zwei Projekte des Bayerischen Landesamtes für Umweltschutz	229
BUDE, S. & PRINZ, T.: Das geostrukturelle Inventar zwischen Arunta Block und Amadeus Basin (Zentralaustralien) : Digitale Fernerkundungsanalysen und Geländebefunde im Kontaktbereich intrakratoner Blöcke	375
CONRADT, M.; SRINIVASAN, T.P. & SAKOWSKI, O.: Geo-Referenzierung der Daten vom Mikrosatelliten BIRD	411
DEBITSCH R.: Automatische V/H und Driftberechnung beim Bildflug	61
DECH, S.W.: siehe TUNGALAGSAIKHAN, P.; GÜNTHER, K.P.; GESELL, G.; DECH, S.W. & RUPPERT T.: Operational processing of AVHRR data at DFD	435
DORSTEN, P.: siehe NOCKER, U.; PILARSKI, M. & v. DORSTEN, P.: Monitoring von Vegetationsstrukturen auf ehemaligen Truppenübungsplätzen mittels multitemporaler Fernerkundungsdaten – Möglichkeiten und Grenzen	247
ECKHARDT, S.: siehe BOOCHS, F.; ECKHARDT, S. & FISCHER, B.: Einsatz des Open Source CAD Paketes „Open CASCADE“ für die stereoskopische Objekterfassung aus digitalen Messbildern	285
EHLERS, M.: siehe BOCHOW, M.; GREIWE, A. & EHLERS, M.: Ein Prozessmodell zur Analyse von Hyperspektraldaten in urbanen Gebieten	255
Ettel, M.: siehe STAIGER, R. & ETTTEL, M.: Untersuchungen des Laserscanners IMAGER 5003 von Zoller & Fröhlich	293
FISCHER, B.: siehe BOOCHS, F.; ECKHARDT, S. & FISCHER, B.: Einsatz des Open Source CAD Paketes „Open CASCADE“ für die stereoskopische Objekterfassung aus digitalen Messbildern	285
FISCHER, C.: siehe BRUNN, A. & FISCHER, C.: Erfassung bergbaubedingter Veränderung von Vegetationsparametern durch Nutzung hyperspektraler Bilddaten	211
FISCHER, C.: siehe SCHÄFER, M. & FISCHER, C.: Auswertung von LANDSAT-7 ETM+ und Aster-Daten zur Erfassung von Temperaturanomalien der Landoberfläche	387
FRANZ, S.: siehe GRENZDÖRFFER, G.; WESSNER, A. & FRANZ, S.: Kombinierte visuelle und digitale Flächennutzungsklassifizierung der Hansestadt	

Rostock auf der Grundlage von HRSC-AX Daten	203
FRANZKE, H.J.: siehe WETZEL, H.-U. & FRANZKE, H.J.: Lassen sich über die Fernerkundung weitere Kenntnisse zur seismogenen Zone Bodensee-Stuttgart (9°-Ost) gewinnen?	339
FRASER, C.: siehe VOZIKIS, G.; FRASER, C. & JANSKA, J.: Alternative Sensor Orientation Models for High Resolution Satellite Imagery	179
FUß, R.: siehe BUCERIUS, M. & FUß, R.: Fernerkundung auf Schutz- und Förderflächen – zwei Projekte des Bayerischen Landesamtes für Umweltschutz	229
GÄHLER, M.: siehe JANOWSKY, R. & GÄHLER, M.: Hierarchisches Klassifikationsverfahren zur automatisierten Ableitung von Biotoptypen aus HRSC-AX-Scannerdaten	81
GEHRKE, S.; WÄHLISCH, M.; LEHMANN, H.; SCHUMACHER, T. & ALBERTZ, J.: Cartography with HRSC on Mars Express – The New Series „Topographic Image Map Mars 1:200,000“	451
GESELL, G.: siehe TUNGALAGSAIKHAN, P.; GÜNTHER, K.P.; GESELL, G.; DECH, S.W. & RUPPERT T.: Operational processing of AVHRR data at DFD	435
GLEITSMANN, L. & KAPPAS, M.: DGM-Erstellung und Reliefanalyse aus Schrägluftbildern in Alaska als Grundlage angewandter Klimaforschung	329
GREIWE, A.: siehe BOCHOW, M.; GREIWE, A. & EHLERS, M.: Ein Prozessmodell zur Analyse von Hyperspektraldaten in urbanen Gebieten	255
GRENZDÖRFFER, G.: siehe THOMAS, H. & GRENZDÖRFFER, G.: Digitale Nahbereichsphotogrammetrie zur Verformungsmessung an bewehrten mineralischen Oberflächenabdichtungen	319
GRENZDÖRFFER, G.; WESSNER, A. & FRANZ, S.: Kombinierte visuelle und digitale Flächennutzungsklassifizierung der Hansestadt Rostock auf der Grundlage von HRSC-AX Daten	203
GÜNTHER, K.P.: siehe TUNGALAGSAIKHAN, P.; GÜNTHER, K.P.; GESELL, G.; DECH, S.W. & RUPPERT T.: Operational processing of AVHRR data at DFD	435
GWINNER, K.: siehe SCHOLTEN, F. & GWINNER, K.: Parallelisierung und Automatisierung bei der Verarbeitung von 3-Zeilen-Scannerdaten	419
HAHN, H.: siehe BÄUMKER, M. ; HAHN, H ; HEIMES, F.-J. & VESTJENS, G.: Ein strenges funktionales Modell für die direkte Georeferenzierung und modellgestützte Regelung einer Fernerkundungsplattform	15
HASTEDT, H.: siehe MÜLLER, C.; HASTEDT, H.; TECKLENBURG, W. & LUHMANN, T.: Erstellung und Analyse von 3D-Oberflächenmodellen zur Beobachtung der Beständigkeit von Fugenmörtel	311
HATGER, C. & KRAMEIKE, K.: Interpretation und Generalisierung dichter Digitaler Geländemodelle.....	135
HEIMES, F.-J.: siehe BÄUMKER, M. ; HAHN, H ; HEIMES, F.-J. & VESTJENS, G.: Ein strenges funktionales Modell für die direkte Georeferenzierung und modellgestützte Regelung einer Fernerkundungsplattform	15
HELLWICH, O.: siehe STECKLING, T.; KLÖTZER, H.; SUTHAU, T.; WÄLTER, S.; WANKER, E. & HELLWICH, O.: Objekterkennung und Modellierung zellulärer Strukturen aus mikroskopischen Bildern	89
HELMCKE, D.: siehe MAIBAUM, N.; RÖHRING, M. & HELMCKE, D.: Geogefahren im Klostertal, Vorarlberg/Österreich - Analyse komplexer geologischer Gefährdung mit Mitteln der Fernerkundung	405
HESE, S. & SCHMULLIUS, C.: A Neural Network Change Detection Approach for Analysis of Afforestation, Reforestration and Deforestation Process in Siberia	195

HOFMANN, A.D. : Untersuchungen im 1D- und 2D-Parameterraum von Punktwolken aus Flugzeuglaserscannerdaten	73
JACOBSEN, K.: Auswertung von QuickBird- und IKONOS-Aufnahmen	427
JANOWSKY, R. & GÄHLER, M.: Hierarchisches Klassifikationsverfahren zur automatisierten Ableitung von Biotoptypen aus HRSC-AX-Scannerdaten	81
JANSA, J.: siehe VOZIKIS, G.; FRASER, C. & JANSA, J.: Alternative Sensor Orientation Models for High Resolution Satellite Imagery	179
KAPPAS, M.: siehe GLEITSMANN, L. & KAPPAS, M.: DGM-Erstellung und Reliefanalyse aus Schrägluftbildern in Alaska als Grundlage angewandter Klimaforschung	329
KLÖTZER, H.: siehe STECKLING, T.; KLÖTZER, H.; SUTHAU, T.; WÄLTER, S.; WANKER, E. & HELLWICH, O.: Objekterkennung und Modellierung zellulärer Strukturen aus mikroskopischen Bildern	89
KONECNY, G.: Studium des Geoinformationswesens in Nordamerika für Deutsche	41
KRAMEIKE, K.: siehe HATGER, C. & KRAMEIKE, K.: Interpretation und Generalisierung dichter Digitaler Geländemodelle	135
KRAUSE, K.: siehe BRIESE, C. & KRAUS, K.: Laser-Geländemodelle: Zusammenspiel von Filterung und Datenreduktion	125
KRESSE, W.: Internationale Normungsarbeit für Photogrammetrie und Fernerkundung	171
LEHMANN, H.: siehe GEHRKE, S.; WÄHLISCH, M.; LEHMANN, H.; SCHUMACHER, T. & ALBERTZ, J.: Cartography with HRSC on Mars Express – The New Series „Topographic Image Map Mars 1:200,000“	451
LESSING, R.; LIPPOLD, R. & LÜNSMANN, F.: Ansätze zur servergesteuerten Erfassung und Auswertung von GeoObjekten	107
LIPPOLD, R.: siehe LESSING, R.; LIPPOLD, R. & LÜNSMANN, F.: Ansätze zur servergesteuerten Erfassung und Auswertung von GeoObjekten	107
LUHMANN, T.: siehe MÜLLER, C.; HASTEDT, H.; TECKLENBURG, W. & LUHMANN, T.: Erstellung und Analyse von 3D-Oberflächenmodellen zur Beobachtung der Beständigkeit von Fugenmörtel	311
LÜNSMANN, F.: siehe LESSING, R.; LIPPOLD, R. & LÜNSMANN, F.: Ansätze zur servergesteuerten Erfassung und Auswertung von GeoObjekten	107
LÜNSMANN, F.: siehe WEICHELT, H. & LÜNSMANN, F.: Erfahrungen und Ergebnisse bei der Operationalisierung von Prozessschritten für die Verarbeitung von SAR-Daten	239
MAIBAUM, N.; RÖHRING, M. & HELMCKE, D.: Geogefahren im Klostertal, Vorarlberg/Österreich - Analyse komplexer geologischer Gefährdung mit Mitteln der Fernerkundung	405
MEINEL, G. & NEUBERT, M.: Bildsegmentierer – Ansätze, vergleichende Untersuchungsmethodik und erste Ergebnisse	187
MÜLLENHOFF, O.: siehe MÜTERTHIES, A. & MÜLLENHOFF, O.: Hochwasserschutz mit SAR-Daten: Das Projekt SediSAR (Sedimentbezogene Erkundung des Deichuntergrundes zur Integrativen Stabilitätsanalyse durch Angewandte Geologie und Remote Sensing)	221
MÜLLER, C.; HASTEDT, H.; TECKLENBURG, W. & LUHMANN, T.: Erstellung und Analyse von 3D-Oberflächenmodellen zur Beobachtung der Beständigkeit von Fugenmörtel	311
MÜTERTHIES, A. & MÜLLENHOFF, O.: Hochwasserschutz mit SAR-Daten: Das Projekt SediSAR (Sedimentbezogene Erkundung des Deichuntergrundes zur Integrativen Stabilitätsanalyse durch Angewandte Geologie und Remote Sensing)	221

NEIDHARDT, F.: Stereo – GisPlay	265
NEUBERT, M.: siehe MEINEL, G. & NEUBERT, M.: Bildsegmentierer – Ansätze, vergleichende Untersuchungsmethodik und erste Ergebnisse	187
NEUMANN, K. & SCHWEBEL, R.: Normentwurf für gescannte Luftbilder	157
NOCKER, U.; PILARSKI, M. & V. DORSTEN, P.: Monitoring von Vegetations- strukturen auf ehemaligen Truppenübungsplätzen mittels multitemporaler Fernerkundungsdaten – Möglichkeiten und Grenzen	247
OTT, N.: Visuelle Interpretation versus digitale Klassifizierung: Kontextuelle Methoden in den Geowissenschaften	397
PILARSKI, M.: siehe NOCKER, U.; PILARSKI, M. & V. DORSTEN, P.: Monitoring von Vegetationsstrukturen auf ehemaligen Truppenübungsplätzen mittels multitemporaler Fernerkundungsdaten – Möglichkeiten und Grenzen	247
PLÜMER, L.: Geoinformation – Chancen und Herausforderungen von Multimedia für die Ausbildung in einem interdisziplinären Studienfach	9
PRINZ, T.: siehe BUDE, S. & PRINZ, T.: Das geostrukturelle Inventar zwischen Arunta Block und Amadeus Basin (Zentralaustralien) : Digitale Fernerkundungsanalysen und Geländebefunde im Kontaktbereich intrakratoner Blöcke	375
RAGUSE, K. & WIGGENHAGEN, M.: Beurteilung der Optischen Messkette durch Simulation der Aufnahmekonfiguration	275
RÖHRING, M.: siehe MAIBAUM, N.; RÖHRING, M. & HELMCKE, D.: Geogefahren im Klostertal, Vorarlberg/Österreich - Analyse komplexer geologischer Gefährdung mit Mitteln der Fernerkundung	405
RUPPERT, T.: siehe TUNGALAGSAIKHAN, P.; GÜNTHER, K.P.; GESELL, G.; DECH, S.W. & RUPPERT T.: Operational processing of AVHRR data at DFD	435
SAKOWSKI, O.: siehe CONRADT, M.; SRINIVASAN, T.P. & SAKOWSKI, O.: Geo- Referenzierung der Daten vom Mikrosatelliten BIRD	411
SANTEL, F.: siehe WIGGENHAGEN, M. & SANTEL, F.: Aktuelle Erfahrungen im Einsatz von E-Learning und photogrammetrischer Auswertesoftware im Fachbereich „Bauingenieur- und Vermessungswesen“	47
SCHÄFER, M. & FISCHER, C.: Auswertung von LANDSAT-7 ETM+ und Aster- Daten zur Erfassung von Temperaturanomalien der Landoberfläche	387
SCHEUGENPFLUG, S.: GIS-Forschung über Waldökosysteme im Nationalpark Bayerischer Wald	115
SCHIEWE, J.: eLearning-Angebote in Geoinformatik und Fernerkundung: Mehrwert oder Mode-Erscheinung?	53
SCHMULLIUS, C.: siehe HESE, S. & SCHMULLIUS, C.: A Neural Network Change Detection Approach for Analysis of Afforestation, Reforestration and Deforestation Process in Siberia	195
SCHOLTEN, F. & GWINNER, K.: Parallelisierung und Automatisierung bei der Verarbeitung von 3-Zeilen-Scannerdaten	419
SCHUMACHER, T.: siehe GEHRKE, S.; WÄHLISCH, M.; LEHMANN, H.; SCHUMACHER, T. SCHWEBEL, R.: siehe NEUMANN, K. & SCHWEBEL, R.: Normentwurf für gescannte Luftbilder	157
SPRECKELS, V.: Einführung fester Transformationsparameter vom ETRS89 zum Gauß-Krüger-Koordinatensystem über NWREF-Punkte zur einheitlichen Führung der Koordinaten und GIS-Datenbestände der Deutschen Steinkohle AG (DSK AG)	145
SRINIVASAN, T.P.: siehe CONRADT, M.; SRINIVASAN, T.P. & SAKOWSKI, O.: Geo- Referenzierung der Daten vom Mikrosatelliten BIRD	411
STAIGER, R. & ETTTEL, M.: Untersuchungen des Laserscanners IMAGER 5003	

von Zoller & Fröhlich	293
STECKLING, T.; KLÖTZER, H.; SUTHAU, T.; WÄLTER, S.; WANKER, E. & HELLWICH, O.: Objekterkennung und Modellierung zellulärer Strukturen aus mikroskopischen Bildern	89
STRAUB, B.-M.: Automatische Extraktion von Bäumen aus Luftbildern und Oberflächenmodellen	99
SUTHAU, T.: Augmented Reality Techniken für den Einsatz in der Leberchirurgie .	301
SUTHAU, T.: siehe STECKLING, T.; KLÖTZER, H.; SUTHAU, T.; WÄLTER, S.; WANKER, E. & HELLWICH, O.: Objekterkennung und Modellierung zellulärer Strukturen aus mikroskopischen Bildern	89
TECKLENBURG, W.: siehe MÜLLER, C.; HASTEDT, H.; TECKLENBURG, W. & LUHMANN, T.: Erstellung und Analyse von 3D-Oberflächenmodellen zur Beobachtung der Beständigkeit von Fugenmörtel	311
THEILEN-WILLIGE, B.: Structural Interpretation of LANDSAT ETM- and ERS-Radar Satellite Data from Southwest Czech Republic and Northern Austria as Contribution to Seismic Microzonation Studies	349
THOMAS, H. & GRENZDÖRFFER, G.: Digitale Nahbereichsphotogrammetrie zur Verformungsmessung an bewehrten mineralischen Oberflächenab- dichtungen	319
TUNGALAGSAIKHAN, P.; GÜNTHER, K.P.; GESELL, G.; DECH, S.W. & RUPPERT T.: Operational processing of AVHRR data at DFD	435
VESTJENS, G.: siehe BÄUMKER, M. ; HAHN, H ; HEIMES, F.-J. & VESTJENS, G.: Ein strenges funktionales Modell für die direkte Georeferenzierung und modellgestützte Regelung einer Fernerkundungsplattform	15
VOZIKIS, G.; FRASER, C. & JANSKA, J.: Alternative Sensor Orientation Models for High Resolution Satellite Imagery	179
WÄHLISCH, S.: siehe GEHRKE, S.; WÄHLISCH, M.; LEHMANN, H.; SCHUMACHER, T. & ALBERTZ, J.: Cartography with HRSC on Mars Express – The New Series „Topographic Image Map Mars 1:200,000“	451
WÄLTER, S.: siehe STECKLING, T.; KLÖTZER, H.; SUTHAU, T.; WÄLTER, S.; WANKER, E. & HELLWICH, O.: Objekterkennung und Modellierung zellulärer Strukturen aus mikroskopischen Bildern	89
WANKER, E.: siehe STECKLING, T.; KLÖTZER, H.; SUTHAU, T.; WÄLTER, S.; WANKER, E. & HELLWICH, O.: Objekterkennung und Modellierung zellulärer Strukturen aus mikroskopischen Bildern	89
WEICHELDT, H. & LÜNSMANN, F.: Erfahrungen und Ergebnisse bei der Operationalisierung von Prozessschritten für die Verarbeitung von SAR-Daten	239
WESSNER, A.: siehe GRENZDÖRFFER, G.; WESSNER, A. & FRANZ, S.: Kombinierte visuelle und digitale Flächennutzungsklassifizierung der Hansestadt Rostock auf der Grundlage von HRSC-AX Daten	203
WETZEL, H.-U. & FRANZKE, H.J.: Lassen sich über die Fernerkundung weitere Kenntnisse zur seismogenen Zone Bodensee-Stuttgart (9°-Ost) gewinnen?	339
WIGGENHAGEN, M. & SANTEL, F.: Aktuelle Erfahrungen im Einsatz von E-Learning und photogrammetrischer Auswertesoftware im Fachbereich „Bauingenieur- und Vermessungswesen“	47
WIGGENHAGEN, M. & WISSMANN, U.: Untersuchungen zur Prüfung digitaler photogrammetrischer Produkte nach DIN 18740	163
WIGGENHAGEN, M.: siehe RAGUSE, K. & WIGGENHAGEN, M.: Beurteilung der Optischen Messkette durch Simulation der Aufnahmekonfiguration	275

WISSMANN, U.: siehe WIGGENHAGEN, M. & WISSMANN, U.: Untersuchungen zur Prüfung digitaler photogrammetrischer Produkte nach DIN 18740	163
ZUMSPREKEL, H. & BISCHOFF, L.: Möglichkeiten der Fernerkundung zur Analyse terrestrischer Impaktstrukturen	363