

**Dreiländertagung der  
DGPF, SGPBF, ÖVG und DFD  
4.-6. 9. 2001 in Konstanz**



**Tagungsband 2001**

**Inhaltsverzeichnis**

Autorenverzeichnis

Tagungsbeiträge (Artikel)

Kurzbeiträge (Abstracts)

Herausgeber: Deutsche Gesellschaft für Photogrammetrie und  
Fernerkundung e.V.

Arnet, Felix	DHM25 Level2
Bähr, Hans-Peter	Bildverstehen und Sprachverstehen - ein methodischer Vergleich
Bähr, Hans-Peter	Bachelor/Master-Modell: Katastrophe oder Chance für die geodätische Ausbildung in Deutschland?
Bauer, Ch. & K. P. Stanek	Strike slip versus normal fault - remote sensing implications from Central Cuba.-
Beckmann, L. & L. Bischoff	Digitale Fernerkundungsmethoden zur geologischen Kartierung - Warrawoona Synklinal / Pilbara-Kraton, WA
Boochs, Frank	Ein Verfahren zur automatischen Detektion von kubischen Verknüpfungsobjekten in digitalen Farbmessbildern
Böhm, Jan	Erfassung und Interpretation von dichten Oberflächendaten
Brunn, Ansgar	Statistische Detektion von Gebäuden
Brandstätter, G.	Projektiv-geometrische Grundlagen der Stereophotogrammetrie
Brockmann, Herbert Mandelburger, Gottfried	Aufbau eines Digitalen Geländemodells vom Wasserlauf der Grenzoder
Dech, Stefan Günter, Kurt Strunz, Günter	Möglichkeiten der Fernerkundung zur Bilanzierung des terrestrischen Kohlenstoffbudgets
Donner, Ralf	Visuelle Interpretation von Fernerkundungsdaten – neu ergriffen
Donner, Ralf, Mueller, Dirk	Landnutzungsklassifikation multitemporaler Landsat ETM-Daten unter Verwendung von Zusatzinformation
Dorrer, Egon	Geodäsie und Geoinformation an der Universität der Bundeswehr München
Drechsel, M. Schreiber, F.	Automatische Detektion und Erfassung von Rissen in Fahrbahnoberflächen
Eckstein, Günter	Voruntersuchungen und Maßnahmen zur statischen Sicherung der Dreifaltigkeitskirche in Konstanz
Ehrlich, Daniele	Die Anwendung geographischer und räumlicher Daten für humanitäre Hilfsgemeinschaften
Eiden, Gerd	Charakterisierung der raum-zeitlichen Vegetationsdynamik von dürre- und desertifikations-gefährdeten, ariden und semi-ariden Regionen. Eine multitemporale Analyse von NOAA-AVHRR Satellitendaten - aufgezeigt am Beispiel der Trocken-gebiete Kenyas
Ergün, B.	Test of the Results of the Interior Orientation with On the Job Calibration For A Metric Camera Using Fuzzy Sets
Franzke, H.-J. & Wetzels, H.-U.	Geologische Interpretation des ERS-1 Radarmosaiks von Deutschland
Fraser, Clive, Baltsavias, E. Gruen, Armin	Ikonos-Geo Stereobilder: Ihr geometrisches Potential und Eignung zur 3D Gebäuderekonstruktion
Frei, M. & Crouvi, O.	Rauhigkeitsuntersuchungen zur geologischen Analyse von Radardaten am Beispiel Timna /Israel.-

Fricker, Peter Sandau, Rainer	Panchromatische und multispektrale Resultate aus Testflügen mit dem Luftbildsensor ADS40 von LH Systems
Gerke, Markus; Straub, Bernd-M.; Koch, Andreas	Automatic Detection of Buildings and Trees from Aerial Imagery Using Different Levels of Abstraction
Girk, Meike, Seyfert, Eckhardt	Bereitstellung eines Digitalen Geländemodells für den Hochwasserschutz an der Oder
Grenzdörffer, Görres	Geometrisches und radiometrisches Potential eines digitalen integrierten flugzeuggetragenen Fernerkundungssystems für Precision Farming (PFIFF)
Gruen, A.; Zhang, L., Visnovcova J.	Automated reconstruction and visualization of a complex Buddha tower of Bayon, Angkor, Cambodia
Gülch, Eberhard	INPHOs aktuelle Entwicklungen für die digitale Photogrammetrie
Hajnsek, I., Papathanassiou, K.P. Horn, R. Scheiber Moreira, A.	Neue Methoden zur Bestimmung von Bodenoberflächen- und Vegetationsparametern entwickelt aus polarimetrischen und interferometrischen E-SAR Daten
Hau, Thomas	Erfassung und Visualisierung von Gebäuden und Städten auf Basis photogrammetrischer Auswertungen mit dem Programmsystem PhauSt
Heege, Thomas Albert, Andreas Bogner, Anke	Fernerkundung des Bodenseelitorals
Hefele, J.	On-Line Pose Messsystem für Roboter
Heier, Helmut	Digitales modulares Luftaufnahmesystem DMC 2001 - Konzept und aktueller Stand
Hermann, S. W.	Kartierung und Strukturerkundung tieferreichender Hangdeformationen in den östlichen Alpen mittels Luftbildfernerkundung und digitalen Orthofotos
Hese, Soeren	Klassifikation von Forstbestandsstruktur in sehr hochauflösenden Multiblickwinkeldaten durch direktionale Variogramme und Integration in das GIS "GRASS"
Honikel, Marc Wegmüller, Urs Wiesmann, Andreas	Das Projekt CIRSTEN: Kartierung von Naturkatastrophen mit optischen und SAR Fernerkundungsdaten
Humbertclaude, C. et al.	Der Einsatz der digitale Nahbereichsphotogrammetrie im Rahmen des Aufbaus der Experimente des Teilchenbeschleunigers LHC am CERN
Ihl, Thomas, Gläßer, Cornelia	Operationalisierung von Fernerkundungsdaten für die Umweltverwaltung im Land Sachsen-Anhalt anhand ausgewählter Beispiele aus der Bergbaufolgelandschaft
Jacobsen, Karsten, Wegmann, Helge	Direkte Sensororientierung - Probleme und Lösungen
Jansa, Josef Schöner, Monika	Unterstützung der Modellierung des Schneeschmelzvorganges durch Fernerkundung

Joos, Gerhard	Die Bedeutung von Interoperabilität für Nutzer und Anbieter von Geodaten - Status und aktuelle Tendenzen bei ISO/TC 211 und OpenGIS Consortium
Kääb, A.	Digitale Photogrammetrie zur Beobachtung alpiner Massenbewegungen
Käser, Christoph Streilein, André Czáka, Thomas Roggli, Martin	SWISSIMAGE – Das neue flächendeckende Farbhofoto der L+T
Kindermann, Detlef	Einsatz der Fernerkundung zur Nahraumanalyse im Schulunterricht
Kneubühler, Mathias	Spektrometrie zur phänologischen Charakterisierung landwirtschaftlicher Flächen
Kraus, Karl	Laser-Scanning - Ein Paradigma - Wechsel in der Photogrammetrie
Kresse, Wolfgang Schwebel, Reiner	Statusbericht über Stand und Planung der internationalen Standards für Photogrammetrie und Fernerkundung
Kurz, Franz Hellwich, Olaf	Estimation of vegetation parameters from multispectral remote sensing data using radiation transfer models
Ladstädter; R.	Blockgletscher-Monitoring mittels Digitalphotogrammetrie
Linder, Wilfried	Digitale Photogrammetrie für Jedermann - ein neues Low-Cost-System
Lohr, Uwe	LIDAR Höhenmodelle und digitale Bilder zur Orthobilderstellung
Meyer, F. Hellwich, Olaf	Estimation of Glacier Topography and Velocity using Correlation Minimization
Mueller, Andreas Kaufmann, Hermann Hill, Joachim	Neue Hyperspektrale Fernerkundungssysteme
Müller, Marina Winkler, Michael Segl, Karl	Bayes Ansatz zur Fusion multitemporaler Landsat 7 Daten innerhalb einer Landnutzungsklassifizierung
Nebiker Stephan	d i l a s (Digital Landscape Server) – Eine Servertechnologie für die webbasierte Verwaltung und Visualisierung beliebig grosser, hochaufgelöster virtueller Landschafts- und Stadtmodelle
Peipe, J.	EFS-1 Electronic Film System - Digitale Bilder mit analogen Kameras
Petersen Michael	Einsatz eines GIS im Immobilien-Konzern
Pfeifer, Norbert Briese, Christian Belada, Peter	Digitale Geländemodelle im Stadtgebiet aus Laser-Scanner-Daten
Pomaska, G.	Desktop – Photogrammetry and its Link to Web Publishing
Priemer, Michael Lohmann, Peter	Untersuchungen zur Anwendbarkeit der linearen spektralen Entmischung beim Bestandsmonitoring von Waldflächen
Rabus, Bernhard Lang, Oliver	Anwendungsbeispiele der differentiellen SAR-Interferometrie
Rautenberg, U	Abnahme und Überwachung photogrammetrischer Systeme nach VDI 2634, Blatt 1

Reulke, R.,Scheele, M. Scheibe, K.,Pospis, M. Aspelmeier, A. Strackenbrock, B.	Die Multi-Sensor-Ansätze in der Nahbereichsphotogrammetrie
Roessner, S. ; Wetzels, H.-U. & Lehner, M.	Einsatz von Satellitenfernerkundung und GIS-Technologie zur Untersuchung der Hangrutschungsgefährdung in Kyrgyzstan (Zentralasien).-
Rosengarten, Hartmut	TerraShare – automatische Verwaltung und Verteilung von Geo-Image-Daten im Produktionsprozess
Roth, A. Eineder, M. Rabus, B. Mikusch, E.	Qualität und Verfügbarkeit der Daten von SRTM/X-SAR
Rottensteiner, Franz	Halbautomatische Gebäudeextraktion durch hybride Ausgleichung unter Einbeziehung von 3D Objektmodellen
Runkel, Irmi	Digitale Höhenmodelle aus Stereopaaren selbst erstellen – Ein beispielhafter Produktionsablauf mit IMAGINE OrthoBASE Pro und Stereo Analyst
Saradeth, Stefan Lautner, M. Legat, K. Klever, N.	Mountain Rescue: Mission Support using Space Technology
Sayda, Florian	VISPA- Virtual Sports Assistent
Schiewe, Jochen	Diskussion eines Konzeptes zur Methoden-Kopplung für die Auswertung von Fernerkundungsdaten
Schiewe, Jochen	Telelearning-Module für die Aus- und Weiterbildung in Fernerkundung und Photogrammetrie
Schmieder, K. Dienst, M. Ostendorp, W.	Auswertung von CIR-Luftbildern zur Bilanzierung der Auswirkungen des Extremhochwassers 1999 auf die Uferhöhen des Bodensees
Schodlock, M.	Untersuchungen zur Bestimmung des Modalbestands saurer bis intermediärer magmatischer Gesteine mit Hilfe thermaler Reflexionsspektroskopie.-
Scholten, Frank Wewel, Franz Sujew, Sergej	Einsatz digitaler Kameras im Auflösungsbereich von 5 cm bis 1 m - Die neue HRSC-AX Kamerageneration in der geometrischen Analyse
Stahl, N. Gege, P.	Ableitung von Wasserinhaltsstoffen zur Überwachung des Bodensees aus Fernerkundungsdaten
Steidler, Franz Beck, Michael	3D-Stadtmodelle mit dem CyberCity Modeler – Generierung und Echtzeitbegehung
Sümnich, Karl-Heinz Neumann, Andreas Schwarzer, Horst Zimmermann, Gerhard	Erfahrungen aus 5 Jahren Mission MOS/IRS-P3
Tetzlaff, A., Altermann W. Frei, M.	Landsat-TM Anwendungen zur Prospektion sedimentärer Lagerstätten in Südafrika

Thiel, Christian, Riedel, Tanja, Schmullius, Christiane, Hochschild, Volker, Pathe, Carsten, Herold, Martin, Grünler, Steffen,	Ableitung von Landoberflächenparametern aus flugzeuggetragenen multiparametrischen E-SAR-Daten
Thiemann, Sabine Strobl, Peter Stahl, N. Mooshuber, W., Gege, P. van der Piepen, H.	Das abbildende Spektrometer ROSIS
Tschannen Martin Meier, Stefan	BIOLADA: Das Geographische Informationssystem der Abteilungen Landschafts & Gewässer und Raumplanung des Kantons Aargau
Udelhoven, Thomas et al.	Die Nutzung von Hyperspektraldaten zur Erfassung von Bodeneigenschaften –Grundlagen und Anwendungsperspektiven
Ulrich Markus et al.	Real-Time Objekt Recognition Using a Modified Generalized Hough Transform
Volk, P. Wever, T.	Fernerkundung und softwaregestützte Bildauswertung für die Erdölexploration im Oman
Wagner, Wolfgang Schmullius, Christiane	Ansätze zur Erfassung der CO <sub>2</sub> -Bilanz Sibiriens aus Radardaten
Wack, Roland	Erstellung von DGM's aus Laserscannerdaten mit Detektion und Korrektur von Problemzonen
Weichelt, H. Klaedtke, H.-G. Pilarski, M.	Untersuchungen zur Landschafts- und Umweltkartierung mittels moderner Radarsensoren- Erste Ergebnisse aus dem Projekt ProSmart II - DEKALUMP
Wiggenhagen, M.	Multimediale Komponenten in der Lehre - Sinnvolle Hilfsmittel oder Spielerei?
Wiggenhagen, M.	Akzeptanz einfacher photogrammetrischer Auswertesoftware in der photogrammetrischen Ausbildung
Winter , Stephan, Andrew U. Frank , Bartelme , Norbert Hausleitner , Walter Car, Adrijana	Situation und Trends der Geodäsie-Ausbildung in Österreich
Wiora, G. Bobrov, P. Pollak, B.	Digitale Bildmessung retroreflektierender Marken in Echtzeit
Zeil, Peter	Was passiert in der nächsten Regenzeit? - Die Prävention von Flutkatastrophen
Zumsprekel, H. Prinz, T.	Die Shoemaker und Strangways-Krater: Zwei Impaktstrukturen in Australien in der GIS-gestützten Analyse von Fernerkundungs- und Geländedaten

# Bildverstehen und Sprachverstehen – ein methodischer Vergleich

HANS-PETER BÄHR, KARLSRUHE<sup>1</sup>

*Zusammenfassung: „Verstehen“ umschreibt einen komplexen Erkennungsprozess von Wissensmustern. Zunächst werden zentrale Begriffe der Sprach- und Bildanalyse dargestellt, gefolgt von einer Analyse methodischer Gemeinsamkeiten:*

*Wissenrepräsentation legt fakturales Wissen in Knoten und prozedurales Wissen in Relationen ab. Der Detaillierungsgrad des Graphen bestimmt die Erkennbarkeit des kodierten Wissens („Matching“). Ein weiterer Vergleich untersucht Gemeinsamkeiten bei Transformationen von sprachlicher und bildlicher Information. Schließlich wird die Rolle von „Kontext“ bei Bild- und Sprachverstehen analysiert.*

*Der Aufsatz schließt mit einem Beispiel für besonders enge Verbindung sprachlicher und graphischer Wissensrepräsentation: Die Festlegung von Grenzen im brasilianischen Eigentumkataster.*

## 1 Begriffe und Metaphern

Nicht ohne Grund wenden wir den Begriff „Verstehen“ sowohl auf Sprache als auch auf Bilder an. „Verstehen“ ist dabei ein äußerst komplexer Vorgang der jeweils ein unbekanntes Muster auf ein bekanntes a-priori-Muster abbildet. MARVIN MINSKY (1975) nennt diese Wissensmuster „frames“ und versteht darunter ein Netzwerk von Knoten und Relationen. Komplexes Wissen kann durch Systeme von frames repräsentiert werden.

Sprache auf der einen und Bilder auf der anderen Seite repräsentieren Elemente der „realen Welt“. Die sogenannte „reale Welt“ entzieht sich einer allgemeinen formalen Beschreibung, da „Realität“ eine vom Denken unabhängige Wirklichkeit darstellt (C. DELIUS et al., 2000). Ohne Verlust von Allgemeingültigkeit bei der Behandlung des Themas „Bildverstehen/Sprachverstehen“ können wir uns aber auf denjenigen Teil beschränken, der bildliche bzw. sprachliche Transformation von Objekten dieser „realen Welt“ behandelt. Es existieren jedoch sowohl Bilder als auch Sprache, die nicht spontan als Elemente der „realen Welt“ akzeptiert werden. Andererseits: Alles was der Fall ist, ist in diesem Sinne auch Teil der „realen Welt“ (L. WITTGENSTEIN, 1921).

Begriffe im Zusammenhang mit Bild- und Sprachverstehen sind häufig das Ergebnis metaphorischer Übertragung auf den einen oder anderen Bereich (C. B. BUSCH, 1998). „Nachbarschaft“ ist ein solcher Begriff. Beim Bildverstehen ist er topologisch definiert; juristisch gesprochen ist „Nachbar“ ein wohldefinierter Begriff aus dem Grenzrecht, und umgangssprachlich bedeutet er vielfach noch ganz etwas anderes. Für alle genannten Beispiele wird der Begriff jedoch jeweils „ähnlich“ gebraucht. Auch für Ähnlichkeit gilt, dass sie in Bildern Geometrie- Homogenitäts- oder sogar Topologiemäß (M. E. EGENHOFER, 1995) sein kann.

---

<sup>1</sup> Prof. Dr.-Ing. Hans-Peter Bähr, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, Universität Karlsruhe (TH), 76128 Karlsruhe, Englerstr. 7, e-mail: baehr@ipf.uni-karlsruhe.de

Auch ist versucht worden, „semantische Ähnlichkeit“ zu modellieren (H.-P. BÄHR, 2001). In der Sprache zeigt „Ähnlichkeit“ indes noch eine weitaus größere Varianz des Gebrauchs.

Zu den metaphorischen Begriffen, die heute bei formaler Repräsentation von Bild und Sprache von größter Bedeutung sind, gehören „Kontext“ und „Semantik“. Beide haben ihren Ursprung in der Sprachtheorie und wurden auf die Bildanalyse übertragen.

Die aufgeführten Beispiele beziehen sich jeweils auf das formale *Handwerkszeug* zur Strukturierung von Bild- und Sprachverstehen. Jedoch, auch bei den individuellen Begriffen für *Gegenstände* (Objekte) kann es zu unerwarteten Problemen kommen. So überschneiden sich die Inhalte der Namen für Landnutzungsklassen bei der Bildklassifizierung im Vergleich mit der Umgangssprache. In H.-P. BÄHR und A. SCHWENDER (1996) werden eine Reihe von Beispielen für diese Fälle gegeben.

Die Probleme mit Begriffen lassen sich daraus erklären, dass sie bereits auf eine symbolische Ebene transformierte Repräsentation der „realen Welt“ darstellen. Dies setzt in beiden Bereichen Wissen voraus sowie Zuordnungsregeln. Damit verbundene Schritte werden in den folgenden Kapiteln behandelt.

## 2 Graphen zur Wissensrepräsentation von Bild und Sprache

Wissen, nach Makoto Nagao „Erkenntnis und Logik“ (M. NAGAO, 1990), ist bei Minsky durch *frames* repräsentiert (s.o). Die „a-priori-Muster“ werden in Form eines Verifikationsprozesses mit neuen Mustern verglichen, welche der sensorielle Apparat liefert. Dieser Prozess gilt ganz allgemein, also für Sprach- und Bildverstehen in gleicher Weise.

Das a-priori-System der *frames* kann dabei auch verändert werden und es wird damit zu einem „lernenden“ System. Es ist dies auch das Prinzip der Neuronalen Netze (K. SEGL, 1996). Neuronale Netze sind wiederum ein Beispiel für gleiche methodische Handwerkszeuge beim Sprach- und Bildverstehen. Wissensrepräsentation und Wissensnutzung geschehen hier getrennt. Solche „impliziten“ Methoden sind pragmatisch und effektiv, wenn sie ihrer Natur nach auch als heuristisch einzustufen sind.

Offensichtlich kommt hierbei der Assoziationsfähigkeit menschlichen Denkens eine zentrale Rolle zu. **Abbildung 1** mag dies erläutern. Die klassische, visuelle Photointerpretation basiert in ähnlicher Weise auf solchen „unstrukturierten“ Assoziationen.

Graphen stellen ein mächtiges methodisches Werkzeug zur Repräsentation und Nutzung von Wissen dar. Der implizite Ansatz Neuronaler Netze ist hier nur eines von vielen möglichen Beispielen. Der tiefere Grund liegt in der zweifachen Natur von Wissen, dem Faktenwissen einerseits und dem Regelwissen andererseits (H.-P. BÄHR, 1998). Streng genommen ist beides nicht trennbar, doch das Modell ist hilfreich für die weiteren Untersuchungen, weil Fakten in den Knoten und Regeln in Relationen abgebildet werden können (H.-P. BÄHR, 2001). Beiden Gruppen können auch zusätzlich Attribute zugeordnet werden.



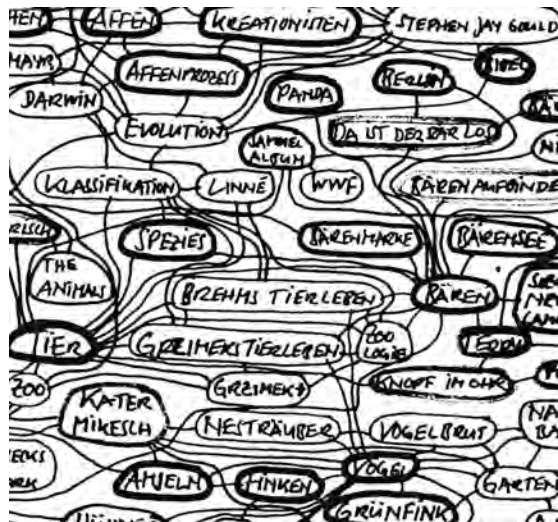
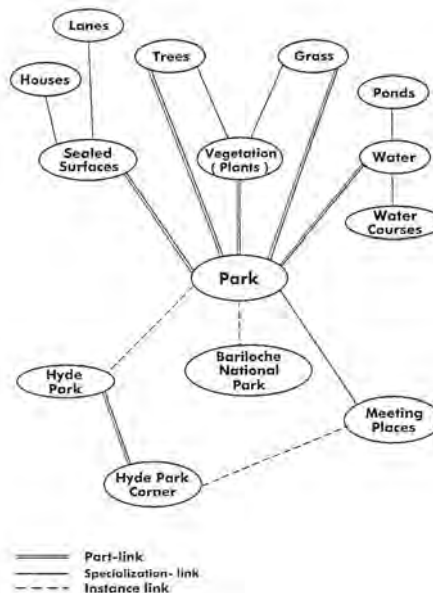


Abb. 1: Denken in Netzwerken (Assoziationen). In GEOWISSEN Nr. 1/1987 (Ausschnitt).

Die enge Verwandtschaft zwischen formaler Strukturierung von Bild und von Sprache zeigen vor allem Semantische Netze. Der Begriff hat sich allgemein eingebürgert, er ist jedoch nicht voll zutreffend, da „Semantik“ im Sinne von „Bedeutung“ sehr viel mehr umfaßt als das, was Semantische Netze bei Bild- und Sprachverstehen heute zu modellieren vermögen. **Abbildung 2** zeigt ein reales Semantisches Netz. Es könnte sowohl einen Sprach- als auch Bildausschnitt repräsentieren und offenbart so die komplementäre Struktur von Bild und Sprache auf einer symbolischen Ebene. Diese wird z.B. ebenfalls durch den Ausdruck „einen Text lesen“ und „ein Bild/eine Karte lesen“ deutlich.



"Vegetation, sealed surfaces and water are components of the concept "park" (connected to it by part links). Trees and grass are also to be found in a park (part links). Trees and grass are special types of vegetation (specialization links). Bariloche National Park and Hyde Park are local instances of park (instance links). Hyde Park Corner is a sector of Hyde Park (part link). It is a "meeting place" which is part of the concept "park" like, for example, "playing ground". Hyde Park Corner is a unique and localized instance of "meeting place" (instance link).

Abb. 2: Semantisches Netz und seine sprachliche Umsetzung (Bähr, H.-P. und Schwender, A., 1996, verändert)

### 3 Vergleich von Wissensmustern

Im vorigen Abschnitt haben wir Möglichkeiten zur Wissensrepräsentation bei Bildern und Sprache behandelt. Eine Größenordnung schwieriger ist die Nutzung des abgelegten Wissens etwa durch Abbildung bisher nicht kodierter Signale auf vorhandene Wissensmuster. Nur in Ausnahmefällen wird diese Abbildung völlig „kongruent“ sein können, um es einmal mit dieser Metapher aus der Geometrie zu sagen.

Im einfachsten Falle geht es um Ja/Nein-Entscheidungen und eindeutig mögliche Zuweisungen. Überraschenderweise sind solche eindeutigen Zuordnungen in der „realen Welt“ gar nicht leicht zu finden. Selbst die Aussage „Punkt A liegt näher an Punkt B als Punkt C“ geht von Voraussetzungen aus, ganz zu schweigen von Entscheidungen wie „Der Wald ist grün“.

Die nächste Stufe der Komplexität verwendet *Fuzzyness*, *Gewichte* oder *Schwellwerte*. Damit lassen sich Zuordnungen treffen zu Aussagen wie „der Wald ist grün“ oder „die spektrale Signatur  $x$  gehört zur Klasse  $\omega$ “. Selbst bei diesen beiden einfachen Beispielen ist die Unsicherheit (oder, komplementär, die Wahrscheinlichkeit) der Aussagen mitzuführen.

Diese Art von Unsicherheit steckt von vornherein in der Natur der Wissensnutzung. Es gilt für die sehr einfachen gezeigten Beispiele wie natürlich auch für die in Abschnitt 2 behandelten komplexen Graphen. Dort wird besonders deutlich, dass es eine völlige Kongruenz zwischen dem Graphenmuster der Wissensbasis und dem zuzuordnendem Signal nicht geben wird. In der Linguistik spricht man von Isomorphie (D. R. HOFSTADTER, 1979) bei identischen sprachlichen Inhalten, in der Statistik von Akzeptanz einer Hypothese, in der Bildverarbeitung von Verifizierung eines Objektes – in jedem Fall muß ein stochastisches Modell die deterministische Aussage begleiten oder, einfacher ausgedrückt, es muss neben dem eigentlichen Ergebnis auch seine Zuverlässigkeit angebbar sein.

Beim Bildverstehen ist dieses streng nur bei expliziten Modellen möglich. Bei den implizit-heuristischen Verfahren entstehen daher immer Probleme mit der Einschätzung der Ergebnisqualität. Beispielsweise stellt die zuverlässige Bewertung der Ergebnisse digitaler multispektraler Klassifizierung aus diesem Grunde stets ein Problem dar. Um beim Modell der Graphen zu bleiben: Die Assoziierung neuer Muster zu bekannten verlangt nicht nur Übereinstimmung der Knoten sondern auch der Relationen. Diese Zuordnung erfüllt damit den Tatbestand „Verstehen“ unabhängig davon, ob es sich um Sprach- oder Bildmuster handelt.

Es muß noch angemerkt werden, dass Sprachverstehen eine erheblich höhere Komplexität enthält als Bildverstehen, wie es im Rahmen von rechnergestützter Bildinterpretation unternommen wird. Nach Frege (hier zitiert nach Quine, 1961) umfasst die Sprache auch die „Absicht“ des Autors, ein Umstand, der in dieser Form für Bilder keine Entsprechungen hat. Als Beispiel wird von Frege „Morgenstern“ und „Abendstern“ genannt. Obwohl es sich offensichtlich um denselben Stern, nämlich die Venus handelt, wird man doch unter den beiden Bezeichnungen jeweils etwas anderes „verstehen“. In der englischsprachigen Literatur spricht man hier von „intensional representations“ (W. A. WOODS, 1975).

Noch einen Schritt weiter führt uns das folgende Nietzsche-Zitat: „*Es genügt noch nicht, dass man dieselben Worte gebraucht, man muß dieselben Worte auch für dieselbe Gattung innerer Erlebnisse gebrauchen, man muß zuletzt seine Erfahrung miteinander gemein haben*“ (F. N. NIETZSCHE, 1886).

Für die Sprachmodellierung eröffnen sich hier unfassbare Abgründe. Es zeigt sich, dass eben nicht alles zwischen Himmel und Erde aus einem einzigen Ansatz heraus modellierbar und erklärbar ist, so verführerisch eine solche Möglichkeit auch immer erscheint.

Die zentrale Frage dieses Kapitels nach den Voraussetzungen für „Verstehen“ soll noch von einer anderen Perspektive aus angegangen werden: Dem Einfluß des Abstraktionsgrades. Sowohl für Sprache als auch für Bildverstehen gilt: Isomorphismus, die Übereinstimmung von Wissensmustern, ist auch eine Frage des Abstraktionsgrades. In der Praxis bedeutet dies: Je höher der Abstraktionsgrad formaler Wissensrepräsentation, desto leichter gelingt die Transformation auf vorgegebene Wissensmuster. Danach besteht umgekehrt die geringste Kompatibilität auf der physikalischen (sensoriellen, ikonischen) Ebene.

Für diese These gibt es viele Beispiele. So ist ein rechnergestützter Vergleich von Bild und Karte auf der ikonischen Ebene nicht möglich; eine Fusion gelingt erst nach Transformation beider Repräsentationen der „realen Welt“ auf die symbolische Ebene (vgl. F. QUINT, 1997). Als Beispiel aus dem Sprachbereich braucht man nur einmal den Vergleich von Umgangssprache mit Fachsprache heranzuziehen. Und Konzepte von Politikern etwa erscheinen solange akzeptabel, wie sie sich an der Oberfläche allgemeiner Erklärungen bewegen. „Der Teufel steckt im Detail“ sagt der Volksmund. Aus diesen Überlegungen folgt andererseits die bekannte Einsicht, dass man ein Modell nur allgemein genug „formulieren“ muß, um möglichst viele Sachverhalte darin unterzubringen.

## **4 Transformationen bei Bild und Sprache**

Unter „Transformationen“ sollen im folgenden Veränderungen in bildlichen oder textlichen Darstellungen verstanden werden, die absichtlich und nach bestimmten Regeln erfolgen. Insgesamt kann man vier verschiedene Gruppen von Transformationen unterscheiden:

### **4.1 Veränderung der Perspektive (Sichtweise) mit Synergie durch Fusion**

Die beiden Metaphern aus dem Bereich des Sehens, „Perspektive“ und „Sichtweise“, werden sehr anschaulich auf den Bereich der Sprache übertragen. Der Gegenstand textlicher oder bildlicher Betrachtung selbst bleibt dabei unberührt. Das Ergebnis dieser Transformation läßt den Gegenstand „in einem anderen Licht“ erscheinen. Bei der Veränderung bildlicher Perspektive greifen die wohlbekanntesten Regeln geometrischer Transformation, die in dieser Form im Sprachbereich nicht vorkommen. Umgekehrt kommt die Übersetzung eines Textes in fremde Sprachen in der Bildanalyse nicht vor. Bei Übersetzungen wie auch bei Änderung der Perspektive sollte das Subjekt der Betrachtung, wie gesagt, keiner qualitativen Veränderung unterliegen. Dies gilt auch dann, wenn ein Sachverhalt „mit anderen Worten“ ausgedrückt wird. Wie die bildliche Erfassung von Objekten etwa mit verschiedenen Sensoren und deren integrierte Auswertung, bringt die gemeinsame Analyse, die „Fusion“ unterschiedlicher textlicher Darstellungen ein und desselben Sachverhaltes/ desselben Gegenstandes häufig eine bessere Information und eine klarere Einsicht als die Einzeldarstellung. Das Lesen von Berichten über ein Ereignis in verschiedenen Zeitungen z. B. mag insgesamt zu einem „richtigeren“ Eindruck führen. Dieser Art besseren Verständnisses im textlichen Bereich durch Hinzunahme weiterer Sichtweisen entspricht, diese Aussage sei mit aller Vorsicht gewagt, die Datenfusion im bildlichen.

## **4.2 Veränderungen des Abstraktionsniveaus (Generalisierung) zur Verbesserung der Lesbarkeit**

Das schon in Kapitel 3 erwähnte Abstraktionsniveau von Bild und Sprache führt im Falle seiner Veränderung auf eine Transformation von Wissensmustern. Bei Generalisierung sowohl von Text als auch von bildlicher Information wie Karten darf dabei der semantische Gehalt, die Bedeutung, nicht verändert werden. Dies wird immer nur bis zu einer gewissen Grenze möglich sein. Der Sinn von Generalisierungen oder von Transformationen auf eine höhere Abstraktionsebene liegt jeweils darin, die wesentlichen Informationen von den unwesentlichen zu trennen. In beiden Fällen wird mit diesem Filter die „Lesbarkeit“ verbessert, etwa durch Kartengeneralisierung einerseits und Verkürzung von Texten andererseits. Durch die quantitative Reduktion leidet in der Regel auch der qualitative Eindruck und die Akzeptanz, was aber gemessen an den genannten Vorteilen in Kauf genommen wird (vgl. auch M. SESTER, 2000).

## **4.3 Veränderung des formalen Niveaus (von ikonischer zu symbolischer Ebene)**

Transformationen des Abstraktionsniveaus geschehen in aller Regel auf der ikonischen, der physikalischen Ebene. Anders einzustufen ist eine Transformation von der ikonischen auf die symbolische Ebene. Hier geht es in erster Linie nicht um stärkere Generalisierung sondern um stärkere Formalisierung. Es wurde schon darauf hingewiesen, dass erst eine solche Art von Formalisierung Vergleich oder Fusion von Daten unterschiedlicher Natur möglich macht, wie den Vergleich von Bild und Karte; entsprechendes gilt für sprachliche Wege- oder Grenzbeschreibungen aufgrund von Karten oder Bildern. Die Zerlegung eines Bildes in eine vollständige Szenenbeschreibung etwa in Form eines semantischen Netzes stellt eine Transformation auf ein höheres formales Niveau dar. Für die Strukturierung von Texten gibt es sehr ähnliche formale Verfahren wie bei Bildern (vgl. z. B. Semantische Netze bei W. A. WOODS, 1975, A. FRANK und D. MARK, ).

## **4.4 Veränderung der Wirkung (Manipulation)**

Schließlich soll nicht ausgeklammert werden, dass sowohl Bild als auch Sprache Gegenstand absichtlicher Manipulationen sein können. Auch dieses sind Transformationen nach der anfangs gegebenen Definition. Bilder und Sprache werden dabei nach den Regeln der psychologischen Kunst verändert, um den beabsichtigten Zweck zu erreichen. Wie wir etwa aus der Werbung wissen, können sowohl ein Text, ein Slogan, als auch ein Bild unmittelbaren Eingang ins menschliche Bewusstsein finden und dieses direkt beeinflussen. Das heimtückische dabei ist, dass sich der Vorgang häufig als „robust“, also als weitgehend irreversibel erweist: Ein einmal ausgesprochenes Wort lässt sich praktisch nicht wieder zurücknehmen, ein starker bildlicher Eindruck „steht immer vor Augen“.

# **5 Kontext bei Bild- und Sprachverstehen**

Kontext bei jeweils Bild- und Sprachverstehen erscheint besonders geeignet für einen methodischen Vergleich. Er manifestiert sich in Graphen, welche das Wissen repräsentieren, in den Relation zwischen den Knoten. Wie ein aus dem Zusammenhang gerissenes einzelnes Wort

noch keinen Sinn gibt, so auch nicht ein isoliertes Pixel oder noch nicht einmal ein isoliertes Objekt. Erst in ihrem Kontext bekommen Wort, Pixel und Objekt ihre Bedeutung. Die Rolle der Relationen in Graphen in diesem Zusammenhang haben u.a. W. A. WOODS (1975) und H.-P. BÄHR (2001) herausgestellt.

Umgekehrt erklärt Wittgenstein den Begriff „Bedeutung eines Wortes“ genial mit „Gebrauch in der Sprache“<sup>2</sup>. Der jahrhunderte alte Streit über den Inhalt von „Bedeutung“ wurde auf diese Weise pragmatisch gelöst durch Hinweis auf den Kontext, eben auf „Gebrauch in der Sprache“. Etwa zur gleichen Zeit wurde dies von Sprachwissenschaftlern sogar mit einem noch höheren Anspruch formuliert<sup>3</sup>.

Die bedeutungsgebende Rolle des Kontextes beim Sprachverstehen ist uns allen wohl bewußt; bei der Bildanalyse wächst die Überzeugung, dass ausschließlich pixelbezogenes Vorgehen eine Sackgasse bedeutet. Die Hineinnahme von Nachbarschaftsrelationen, also von Kontext in die Analysemethoden, wie sie heute entwickelt werden, führt daher zu durchgreifenden Fortschritten beim Bildverstehen.

## 6 Von der Theorie zur Praxis

Eine sehr enge Symbiose gehen Bild- und Sprachverstehen bei Navigation, z. B. bei Wegbeschreibungen ein. Insbesondere aus den USA liegen hierzu aus unterschiedlichen Perspektiven vieler Disziplinen Untersuchungen vor (z. B. B. TVERSKY und P. LEE, 1999). Die verbale Beschreibung der Orientierung im Raum oder auch Wegbeschreibungen aufgrund von Karte oder Bild haben schon immer das Interesse von Geographen, Psychologen, Psycholinguisten oder Entwicklern autonomer Systeme gefunden.

Abschliessend soll ein damit verwandtes Problem gezeigt werden, welches z. Zt. am IPF in Karlsruhe bearbeitet wird. Es geht um die Grenzfestlegung im brasilianischen Eigentumkataster, welche formal durch eine verbale Beschreibung der Grenzen erfolgt. Für die überwiegende Mehrzahl der Grundstücke liegen nur solche verbalen Beschreibungen vor (häufig noch dazu auf äußerst dürftigem Niveau), welche immerhin das Grundrecht auf Eigentum an Grund und Boden sichern helfen sollen. In „entwickelten“ Gebieten Brasiliens gibt es neben der sprachlichen Festlegung auch graphische Darstellungen, welche aber nicht am öffentlichen Glauben teilhaben.

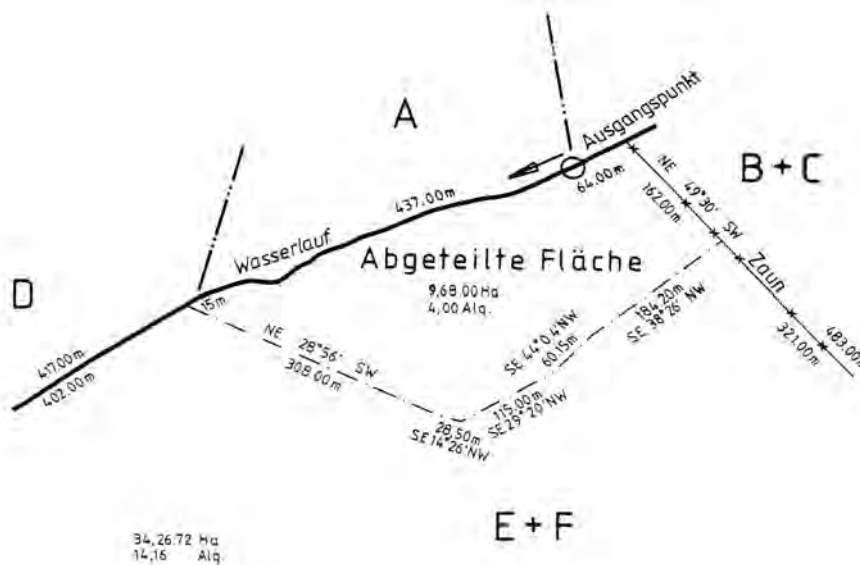
**Abbildung 3** zeigt als Beispiel einen Vergleich der sprachlichen und graphischen Version einer Grenzfestlegung im brasilianischen Eigentumkataster. Nach den Überlegungen in den Abschnitten 3 und 4 müssen Sprache und Graph zunächst jeweils getrennt auf eine höhere formale (symbolische) Ebene transformiert werden, um diesen Vergleich zu ermöglichen, also die beiden Wissensmuster aufeinander abbildbar zu machen.

---

<sup>2</sup> „Man kann für eine große Klasse von Fällen die Benützung des Wortes „Bedeutung“ - wenn auch nicht für alle Fälle seiner Benützung - dieses Wort so erklären: Die Bedeutung eines Wortes ist sein Gebrauch in der Sprache“. L. Wittgenstein, Philosophische Untersuchungen § 43, 1953

<sup>3</sup> „The patterns of sentence structure that guide words are more important than the words“ (Die Muster der Satzstruktur, welche die Wörter steuern, sind wichtiger als die Wörter selber) . B.L. Whorff , Language, Thought and Reality, 1956

Abb. 3: Grundstücksteilung im brasilianischen Kataster  
a) graphische Darstellung



b) verbale Beschreibung: Der Ausgangspunkt der Grenze befindet sich an einem Wasserlauf am Zusammenstoß der Grundstücksgrenzen von A und einem Teil des Anwesens SA der Eigentümerin B und ihres Ehemannes C. Von hier aus folgt sie dem Wasserlauf auf eine Entfernung von 437,00 m als Grenze zu A; von hier aus folgt sie dem Wasserlauf 15 m als Grenze zu D; von hier biegt sie nach links vom Wasserlauf ab und bildet die gemeinsame Grenze mit der verbleibenden Fläche von E und F, verläuft 308,00 m in der Richtung 28° 56' SW; von hier aus verläuft sie 28,50 m nach links in der Richtung 14° 26' NW; von hier biegt sie 115,00 m nach links ab unter 29° 20' NW; von hier aus verläuft sie 60,15 m nach links unter der Richtung 44° 04' NW, von hier verläuft sie nach rechts auf 184,20 m in der Richtung 38° 26' NW und bildet bis hierher die gemeinsame Grenze mit der verbleibenden Fläche von E und F; von hier biegt sie nach links ab und verläuft auf 162,00 m entlang eines Zaunes in der Richtung von 49° 30' NO bis zum Wasserlauf; von hier biegt sie nach links ab und folgt dem Wasserlauf auf einer Entfernung von 64,00 m bis zum Ausgangspunkt und bildet in diesem Verlauf die gemeinsame Grenze mit dem Anwesen SA der Eigentümerin B und ihres Ehemannes C.

[Übersetzung der brasilianischen Originalurkunde ohne Personendaten unter Verwendung von Aurélio, 1999]

Diese Aufgabe ist zwar nicht trivial, wegen der guten Qualität von Text und Graphik (es handelt sich um eine Grundstücksteilung im Bundesstaat São Paulo aus dem Jahre 1999), aber doch für beide Beschreibungsarten der Grundstücksgrenzen jeweils eindeutig durchzuführen. Eine andere Größenordnung von Schwierigkeit liefern mögliche Kontrollen. Sie können umfassen:

- Konsistenz getrennt für jeweils textliche und graphische Beschreibung (Geometrie, Topologie)
- Abbildbarkeit der beiden Beschreibungen aufeinander
- Vergleich mit der Örtlichkeit

## Dank

Die Arbeit entstand anlässlich eines Forschungsaufenthaltes bei Prof. Dr. Manfred Fischer an der Wirtschaftsuniversität Wien, dem ich herzlich für freundliche Aufnahme, hervorragende Arbeitsbedingungen und viele gute Diskussionen danke.

Mein Dank gilt auch Herrn Notar Sergio Jacomino/São Paulo für die Bereitstellung umfangreicher Materials aus dem brasilianischen Kataster.

## Literatur

- BÄHR, H.-P., 2001: The Power of the Links. Photogrammetrie und Fernerkundung, Heft 1
- BÄHR, H.-P., 1998: From Data to Interference: Examples for knowledge representation in image understanding, Comm. III, ISPRS Ohio.
- BÄHR, H.-P., SCHWENDER, A., 1996: Linguistic Confusion in Semantic Modelling. In K. Kraus, P. Waldhäusl (Eds.): Proc. of the XVIII Congress of the ISPRS, Vienna. International Archive of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXXI, Part B6, Commission VI, pp. 13-17.
- BUSCH, C.: Metaphern in der Informatik: Modellbildung, Formalisierung, Anwendung. Deutscher-Universitäts-Verlag, Wiesbaden 1998.
- DELIUS, C. et. al., 2000: Geschichte der Philosophie. Könenmann, Köln.
- EGENHOFER, M. und MARK, D., 1995: Modelling conceptual neighbourhoods of topological line-region relations. Internat. Geographical Information Systems, Vol. 9, no. 5, S. 555-565.
- FRANK, A. und MARK, D. M.: Language Issues for Geographical Information Systems. In: Experimental Realism and its Applications to Geographic Space (Hrsg. I. Campari und A. Frank). Geoinfo TU Wien.
- AURÉLIO BUARQUE DE HOLLANDA FERREIRA: Aurélio Século XXI O Dicionário de Língua Portuguesa, Rio de Janeiro, 1999
- HOFSTADTER, D. R., 1979. Goedel, Escher, Bach: an Eternal Golden Braid. Basic Books, New York.
- MINSKY, M., 1975, The Psychology of Computer Vision, Kap. A Framework for Representing Knowledge, Computer Science Series, McGraw-Hill.
- NAGAO, M., 1990. Knowledge and Interference. Academic Press.
- NIETZSCHE, F., 1988: Jenseits von Gut und Böse, Vorspiel einer Philosophie der Zukunft. Leipzig 1886 und de Gruyter, dtv.
- QUINNE, W. V., 1961: From a logical point of view (2<sup>nd</sup> Ed., rev.) New York: Harper.
- QUINT, F., 1997: Kartengestützte Interpretation monokularer Luftbilder. Deutsche Geodätische Kommission bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften. Dissertationen, Reihe C Heft Nr. 477, München.
- SEGL, K., 1996: Integration von Form- und Spektralmerkmalen durch künstliche neuronale Netze bei der Satellitenbildklassifizierung. Deutsche Geodätische Kommission bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, Dissertationen Reihe C, Heft Nr. 468, München.
- SESTER, M., 2000: Knowledge acquisition for the automatic interpretation of spatial data. International Journal of Geographical Information Science, Vol. 14 No. 1, S. 1 – 24.
- TVERSKY, B. und LEE, P., 1999: Pictorial and verbal tools for conveying routes. In: Spatial Information Theory (Freska, C. und Mark, D., Hrsg.), Lecture Notes in Computer Science 1661, Springer.
- WITTGENSTEIN, L., 1953: Philosophical Investigations. Basil Blackwell Oxford.
- WHORF, B. L., 1956: Language, Thought and Reality. The MIT Press.
- WOODS, W. A., 1975: What's in a link: Foundations for Semantic Networks. In: Representation and Understanding, Studies in Cognitive Sciences (Ed.: Bobrow, D. G. and Collins, A.). Academic Press.

# Bachelor/Master-Modell: Katastrophe oder Chance für die geodätische Ausbildung in Deutschland?

HANS-PETER BÄHR, KARLSRUHE<sup>1</sup>

*Zusammenfassung: Dramatisch sinkende Studentenzahlen in den Ingenieurwissenschaften, so auch in der Geodäsie, haben vielerlei Ursachen und führen mittelfristig zu Versorgungslücken in Wirtschaft und Verwaltung. Neue Modelle wie Bachelor/Master müssen daher auf ihre Attraktivität einerseits und ihre Kompatibilität andererseits hin untersucht werden. Im Detail geschieht dies durch Analyse von Einzelelementen des Bachelor/Masters Modells, wie internationale und nationale Kompatibilität, mit kritischen Hinweisen auf Gemeinsamkeiten zwischen liberalistischer Wirtschaftspolitik und liberalistischer Bildungspolitik. Es wird auf die Notwendigkeit von Mobilität, Flexibilität und Qualität und schließlich auf berufsständische Aspekte eingegangen. Den Abschluß bildet die Vorstellung von drei konkreten Modellen, das des ARGE TU/TH, des Fakultätentages Bauingenieur- und Vermessungswesen und eines eigenen. Gemeinsam ist den Vorschlägen die kritisch-ablehnende Bewertung des Bachelor und ein Votum für den bewährten Diplomingenieur. Der eigene Vorschlag stellt darüber hinaus die mit dem Master verbundenen Chancen in einer akademischen Ausbildung heraus.*

## 1 Einleitung

Vor genau fünf Jahren erschien an gleicher Stelle ein Aufsatz des Autors, ebenfalls mit einem als Frage formulierten Titel: „Ausbildungsmodelle in Photogrammetrie und Fernerkundung für die Zukunft – für die Praxis?“ (BÄHR, H.-P., 1996 a). Auch dieser Aufsatz beschäftigte sich im Kern bereits mit der Frage nach „Bachelor/Master“ versus „Diplomingenieur“. Es ist immer gut zu lesen, was man vor geraumer Zeit zu Papier gebracht hatte. Insbesondere ist es hilfreich zu analysieren, welche äußeren Bedingungen sich inzwischen verändert haben und wie die allgemeine Meinung, (einschließlich der eigenen), darauf reagiert.

Was hat sich in den vergangenen fünf Jahren bei der Ausbildung in Photogrammetrie und Fernerkundung verändert? Die Curricula der Ingenieurfächer unterliegen permanent Veränderungen, was auch die ARGE TU/TH herausstellt (ARGE TU/TH 2001). So sind die Studienpläne aller geodätischen Ausbildungsstellen der technischen, aber auch der gesellschaftlichen Entwicklung angepaßt worden. Dabei erfolgte häufig auch eine Umbenennung in „Geodäsie und Geoinformatik“ oder ähnlich unter Verzicht auf den Begriff „Vermessungswesen“ als Konsequenz aus der Veränderung des Berufsbildes (BÄHR, H.-P., 1996b, und DEUTSCHE GEODÄTISCHE KOMMISSION, 1998). Umbenennungen reflektieren eine tatsächliche Veränderung der Schwerpunktsetzungen, wobei in Deutschland die Herausbildung eigener Profile an den verschiedenen Standorten angestrebt wird. Dies ist auch in der Vergangenheit praktisch immer der Fall gewesen.

---

<sup>1</sup> Prof. Dr.-Ing. H.-P. Bähr, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, Universität Karlsruhe (TH), 76128 Karlsruhe, Englerstr. 7, Tel. 0721/608-2314, e-mail: baehr@ipf.uni-karlsruhe.de



## 2 Niedrige Studierendenzahlen und ihre Ursachen

Eine dramatische Veränderung allerdings hat sich durch den Rückgang der Studierendenzahlen in unserem Fach eingestellt (DIE WELT, 2001 und WITTE, B., 2000). Dies berührt seinen Lebensquell. Der Rückgang erfolgte mit lokalen und fachlichen Ausnahmen in allen Bereichen des Ingenieurwesens. In der Geodäsie ist diese Tendenz im Süden stärker als im Norden und in den alten Bundesländern stärker als in den neuen. Im Durchschnitt der vergangenen 20 Jahre liegen der Anfängerzahlen relativ genau bei 10% derer des Bauingenieurwesens. Für beide Studiengänge sind sie heute auf etwa ein Drittel der „Maximalauslastung“ zurückgegangen. Dieser Absturz folgte den absoluten Höchstwerten Anfang der 90er Jahre und hat sich auf dem niedrigen Niveau in den letzten Jahren „stabilisiert“. Gründe für den Rückgang beim Ingenieurstudium sind vielschichtig, z. B.:

- Zurückgehende Geburtenraten
- Zurückgehendes Interesse der Abiturienten, überhaupt ein Studium aufzunehmen (DIE WELT, 2001);
- Verunsicherung über die Zukunft von Ingenieuren, auch im europäischen Kontext
- Relativ anspruchsvolles und langes Ingenieurstudium
- Gemessen an den Anforderungen und Bedingungen des Studiums nur bescheidene Verdienstmöglichkeiten im späteren Beruf
- Kein Glamour und keine Entscheidungskompetenz wie bei Ärzten, Architekten, Juristen
- Dramatischer, auch von der Bevölkerung wahrgenommener Rückgang der Baukonjunktur
- Konkurrenz von „Modestudiengängen“ wie Betriebswirtschaft

Die niedrigen Studentenzahlen speziell im Vermessungswesen sind natürlich auch eine Reaktion auf die umfangreichen Sparmassnahmen im öffentlichen Dienst, die vor allem auch Stellen im höheren Dienst treffen.

Dies führt insgesamt zu einer Verunsicherung, die durch Medien und Politik weiter angeheizt wird. J. K. Gregory, Professor an der TU München und US-Bürger, formulierte es bei einem Vortrag an der Universität Kaiserslautern so (GREGORY, J. – P., 1999): ... in Deutschland *„wird jahrelang diskutiert, Vorwürfe der Inkompetenz werden zwischen Politik, Industrie und der Hochschule selbst hin und her geschoben. Die deutsche Hochschule und ihre Professoren und Studenten werden schlecht geredet; etwa um unausweichbare finanzielle Kürzungen als „Strafe“ in der Öffentlichkeit gerechtfertigt erscheinen zu lassen?“*

Tatsächlich kann man einen Mechanismus ausmachen, nach dem heute leider vielfach Reformen ablaufen, was zur Verunsicherung der direkt oder indirekt Betroffenen führt: „Schlechtreden“ (z. B. Gesundheitswesen, Bildungssystem, Forschung), Auseinanderdividieren der Kompetenz-Träger (Ärzteschaft/Lehrer/Wissenschaftler), Gesetzreform mit allgemeiner Zustimmung der mediengesteuerten öffentlichen Meinung, Neuverteilung der Zuständig-

keiten und der Entscheidungsebene (z. B. von öffentlich nach privat, von Fachdisziplinen zu Verwaltungsjuristen, von Gruppen zu einzelnen oder umgekehrt).

Der Griff der Industrie nach öffentlichen Mitteln für wissenschaftliche Forschung folgt genau diesem Muster (VDI-NACHRICHTEN 2001).

Es ist bereits heute absehbar, dass die niedrigen Studierendenzahlen in den Ingenieurfächern sehr schnell zu „Versorgungslücken“ in Wirtschaft und Verwaltung führen werden. Politiker thematisieren dies seit kurzem erfreulicherweise öffentlich; so setzen Bund und Länder das „Forum Bildung“ ein, um die Zukunftsfähigkeit des deutschen Bildungswesens festzustellen (HOLZAMER, H.-H., 2001). Nach Jahren des Einstellungsstops und der Stellenkürzungen muss auch die deutsche Vermessungsverwaltung wieder an Einstellung von Nachwuchs denken.

Die folgenden Ausführungen zum Bachelor/Master-Modell sollen im Lichte der dramatisch niedrigen Studierendenzahlen und der zukünftig fehlenden Berufsanfänger gesehen werden: Wie kann das Studium des Vermessungswesens, von „Geodäsie und Geoinformatik“ zu einem zeitgemäßen, attraktiven Angebot werden?

### **3 Allgemeine Bemerkungen zum Bachelor/Master-Modell**

Im Vergleich mit der Situation von vor 5 Jahren ist die Diskussion über dieses Thema erheblich spezifischer geworden. Sie geschieht in erster Linie durch politische Vorgaben. Die Bildungsminister der Europäischen Union haben 1999 in ihrer Erklärung von Bologna auf europäischer Ebene die Angleichung der Studienabschlüsse als Ziel gesetzt (Wortlaut z. B. in <http://www.tuwien.ac.at/pr/news/Bologna.html>). Dieses Ziel, was nach etwa 10 Jahren erreicht sein soll, umfasst einen zweistufigen Studienplan mit einem ersten akademischen Grad nach drei bis vier Jahren und mit einem zweiten nach weiteren ein bis zwei Jahren. Obwohl die Bezeichnungen der akademischen Abschlüsse der beiden Stufen in den verschiedenen Ländern unterschiedlich sein können, ist damit doch eindeutig das Bachelor/Master-Modell gemeint.

An den deutschen Hochschulen (Universitäten und Fachhochschulen) und in den entsprechenden Fachverbänden laufen z. Zt. Diskussionen über das Für und Wider. Vor allem Fachhochschulen, haben die Vorschläge sehr schnell aufgegriffen und umgesetzt; andere verweisen auf das „Erfolgsmodell Diplomingenieur“, das international hohes Ansehen genießt (z. B. Korrespondenz BULMAHN, E., RAMM, W., HAUPTVERBAND DER DEUTSCHEN BAUINDUSTRIE, ARGE TU/TH). Auf einzelne Vorschläge wird im fünften Abschnitt noch eingegangen werden. Der einstufige „Diplomingenieur“ setzt Zwischenprüfungen voraus wie etwa das Vordiplom, was aber nicht zu berufsqualifizierenden Abschlüssen führt. Die Diplomarbeit im Rahmen des Studiums des Vermessungswesens ist, und dabei unterscheidet es sich von vielen anderen universitären Ingenieurstudiengängen, eine *Forschungsarbeit*. Die Verbindung zwischen Forschung und Lehre, wenn nicht gar die „Einheit von Forschung und Lehre“ wirkt stark in die Diplomstudiengänge mit hinein, allein schon deshalb, weil die Lehrenden, ob Professor oder Assistent, im Regelfall auch jeweils in Forschungsprojekten engagiert sind.

Die politischen Vorgaben in Richtung zweistufiges Modell undiskutiert „weisungsgemäß“ zu übernehmen widersprüche der guten europäischen Tradition akademischer Unabhängigkeit. Politik muss erfolgsorientiert und daher natürlicherweise eindimensional ausgelegt sein. Entwicklungen im Hochschulbereich setzen hingegen sehr beschwerliche Prozesse der Diskussi-

on und internen Abstimmung voraus. Dadurch dauern Veränderungsprozesse häufig inakzeptabel lange: Also auch die „eindimensional“ verlaufenden politischen Entscheidungsvorgaben haben ihre Berechtigung.

In diesem Lichte sollen im folgenden die Vor- und Nachteile der wesentlichsten Elemente von Bachelor/Master im Vergleich mit dem klassischen Diplomstudiengang untersucht werden.

## **4 Analyse von Einzelementen des Bachelor/Master-Modells**

„Der Teufel steckt im Detail“, und dieses gilt mit Sicherheit auch für die Diskussion der Modelle Diplomingenieur versus Bachelor/Master.

### **4.1 Internationale Kompatibilität und Mobilität im Bildungswesen sowie Vergleich mit Entwicklungen in der Wirtschaft**

Vergleichbarkeit im Bildungswesen und Forderung nach Mobilität, zumindest in Europa, ist das Hauptargument, ja der Anlass für den Vorschlag, das Ausbildungssystem in Deutschland von seinem Grundsatz her zu verändern. Die Vorschläge nehmen ihren Ausgang von der politischen Basis der Bologna-Erklärung. Der Riß, der zwischen „Europa-Euphorie“ und eingefleischten Skeptikern verläuft, kann auch hier ausgemacht werden.

Die Vorgabe des zweistufigen Studienganges in Europa zielt u. a. auf Angleichung, „Standardisierung“. Die Ingenieurwissenschaft hat uns gelehrt, dass Standardisierung Voraussetzung für ein langfristig erfolgreiches, marktfähiges Produkt ist. Im kulturellen Bereich, und dazu sollte auch die akademische Ausbildung gehören, bedeutet Standardisierung aber auch den Gegenpol zu Kreativität, Innovation und Individualität. Forschungsnahe Ausbildung, innovative Ideen, zukunftsweisende Experimente sind eine Sache, Produktion, Arbeitsplätze und Bruttosozialprodukt eine andere, zumindestens in ihrer zeitlicher Folge. Dieser Widerspruch wird sich so leicht nicht auflösen lassen.

Kompatibilität und Vergleichbarkeit, günstigenfalls Konkurrenz, ungünstigenfalls „Gleichmacherei“, sind auch Konsequenzen neoliberaler Wirtschaftsphilosophie. In diesem Sinne ist die Forderung nach einem zweistufigen Ausbildungskonzept in einem größeren Zusammenhang zu sehen. Es entspricht der Forderung nach „Öffnung der Märkte“. Dass diese allgemein unreflektiert *positiv* kommentierte Forderung eine durchaus zweite, dunkle Seite aufweist, zeigt Chomsky in seinem Buch mit dem bezeichnenden Titel „Profit over People“ (CHOMSKY, N., 1999). Die Öffnung des Marktes „Bildung“ führt im gleichen Maße zu Vor- und Nachteilen wie die Öffnung der Kapital- und Warenmärkte: Der Bessere setzt sich durch. Tatsächlich? Oder führt das zur Steuerung durch die Mächtigen, einiger weniger, wie es sich bei der „Globalisierung“ abzeichnet?

Liberale Wirtschaftspolitik und Standardisierung von Produkten kommt letztendlich den Konsumenten zugute, so lautet das Argument der Befürworter von Öffnungen. „Konsument“ standardisiert und kompatibel ausgebildeter Ingenieure ist in erster Linie Industrie und Wirtschaft. Auch hier soll das „Produkt“ zwei Forderungen erfüllen, hohe Qualität einerseits und

niedrige Kosten andererseits. „Qualität“ bedeutet hier, wie auch in den Niederungen realer Produkte, „was am Markt ankommt“. Konsequenz zu Ende gedacht, führt dies auf ein Horror-szenario.

Und die Mobilität? Sowohl bei industrieller Fertigung als auch bei akademischer Ausbildung geht es um Standortunabhängigkeit. Auch das klingt zunächst einmal positiv, führt aber in der Realität häufig zu unerwünschten Nebenwirkungen, wie Beschränkung der Produktion auf Billigstandorte und Transport von Gütern über weite Entfernungen. Für die akademische Ausbildung bedeutet dies im übertragenen Sinne eine Internationalisierung der Ausbildung mit allen sich daraus ergebenden Konsequenzen. Danach wird der Absolvent die besten Berufschancen haben, der das Anforderungsprofil des Berufsmarktes/der Wirtschaft erfüllt, unabhängig davon, wo er ausgebildet wurde.

Dieses Szenario ist durchaus nicht notwendigerweise und von vorne herein negativ zu bewerten; man muß aber die Dinge sehen wie sie sind und verantworten können, was man tut. Abgesehen davon existieren global gültige Gesetzmäßigkeiten für die Akkumulation von Kapital und Macht, von denen die Entwicklungen nun einmal gesteuert werden.

Danach gibt es, bei allen kritischen Einwänden, heute keine Alternativen zu Verwirklichung globaler Kompatibilität und Mobilität im Bildungswesen.

## **4.2 Nationale Kompatibilität und Mobilität**

Je allgemeiner eine Frage formuliert wird, desto einfacher ist es, sie im Konsens zu beantworten. Im globalen, internationalen Bereich ist es, bei allen offensichtlichen Nachteilen einsichtig, dass der Schritt zur Vereinheitlichung des Bildungswesens nötig ist. Im nationalen Umfeld stößt man naturgemäß auf viel mehr Schwierigkeiten bei der Änderung des Bildungssystems vom ein- zum zweistufigen.

Die zweistufige Ausbildung im Sinne von Bachelor/Master ist dem deutschen Bildungssystem fremd. Dieses darf auch nicht isoliert gesehen werden, sondern es ist eingebettet in Besoldungs- und Laufbahn- Dienstrecht und umfasst dabei nicht nur den öffentlichen Sektor, sondern auch den privaten, wenn auch in geringerem Maße. Nach den Gesetzen der Systemtheorie wirkt ein einziges Element eines Systems auf alle anderen. So muss ein Eingriff ins Bildungssystem, noch dazu ein so tiefgehender wie der Schritt von einstufiger zu zweistufiger Ausbildung im Hochschulbereich zu drastischen Konsequenzen im benachbarten beruflichen Umfeld führen (BÄHR, H.-P., 1996b) und auf dem Arbeitsmarkt insgesamt.

Konkret gibt es z.B. in Deutschland noch kein Berufsbild für Absolventen mit dem ersten akademischen Abschluss („Bachelor“), worauf unter 4.4 noch näher eingegangen wird. „Kompatibilität“ im nationalen Rahmen bedeutet auch Vergleichbarkeit mit bestehenden, konventionell einstufigen Ausbildungsgängen. Es schließt auch Vergleichbarkeit mit anderen, nicht ingenieurorientierten Studiengängen ein, die dann ebenfalls eine zweistufige Alternative anbieten müßten.

„Mobilität“ umfasst im nationalen Umfeld und darüber hinaus mehr als nur die Forderung nach örtlicher Ungebundenheit (die bei Akademikern ohnehin vorausgesetzt wird), sondern bezeichnet auch die Bereitschaft, seine fachlichen Kenntnisse dem jeweiligen Bedarf mobil

anzupassen, sich „fortzubilden“. Hier liegt ein großer Nachteil des bestehenden einstufigen Systems, welches traditionell keine Fortbildung mit integriert (auch hier wird bei Akademikern vorausgesetzt, dass sie sich technisch-wissenschaftlich auf dem laufenden halten). Zweistufige Ausbildungskonzepte bieten hier viel mehr Möglichkeiten als einstufige, wie in Abschnitt 5 gezeigt werden wird.

### 4.3 Flexibilisierung und Qualität

Der klassische Diplomstudiengang ist „theoretisch fundiert, intensiv...“ (ARGE TU/TH, 2001) mit einem „stark leistungsselektiven, nicht berufsqualifizierenden“ Vordiplom. Diese Ausrichtung macht es praktisch unmöglich, hier eine Bachelorausbildung anzubinden. Diese müsste nach 3 bis 4 Jahren zu einem berufsqualifizierenden ersten Abschluss kommen, was notwendigerweise – und da gibt es keine Alternative! – zu Abstrichen bei den theoretischen Grundlagen führen muss, also zu Qualitätseinbußen. Diplomstudiengang und Bachelorausbildung sind daher vom Grundsatz her inkompatibel. Man kann ein theoretisch fundiertes Diplom nicht auf der schmalen fachlichen Basis eines Bachelor aufbauen.

Andererseits läßt sich auf ein theoretisch fundiertes Studium jederzeit eine Masterausbildung aufbauen. Da in Deutschland Diplom und Master als etwa *gleichrangig* (natürlich nicht als *gleich*) angesehen werden, wäre mit einem an das Diplom anschließenden Master formell aber keine höhere Qualifizierung verbunden. Ein auf „Laufbahnen“ fixiertes Denken wird sich daher mit einem solchen Weg nicht anfreunden können. Master und Diplom lassen sich jedoch offensichtlich, anders als Bachelor und Diplom, miteinander kombinieren.

Eine solche Kombination, eine an das Diplom anschließende Masterausbildung, zeigt eine Reihe wesentlicher Vorteile:

- Es können aktuelle „Querschnittsthemen“ angeboten werden, an welchen Absolventen unterschiedlicher Disziplinen gleichermaßen interessiert und wofür sie auch grundsätzlich qualifiziert sind. Als Beispiele seien die Themen „Geoinformationssysteme“, „Fernerkundung“ und „Navigation“ genannt. Neben Diplomingenieuren der Geodäsie können an einer entsprechenden Masterausbildung in gleicher Weise Geographen, Informatiker, Elektrotechniker, Geoökologen, Physiker und andere teilnehmen. Diese fachliche Mischung zeichnet auch die Master“kurse“ angelsächsischer Tradition aus (BÄHR, H.-P., 1995).
- In Deutschland kann der Master das bisher fehlende Konzept der Fortbildung liefern. Auch in anderen Ländern, welche Masterausbildung anbieten, wird diese zum großen Teil nicht unmittelbar anschließend an den berufsqualifizierenden Abschluss absolviert, sondern nach einer Berufstätigkeit, und durchaus auch direkt in Verbindung damit. Dies gilt z.B. für Brasilien, wo der Trend nach Weiterbildung sehr stark ausgeprägt ist.
- Die Themen der Masterausbildung können schneller und flexibler angeboten werden als dies beispielsweise für einen „großen“ Diplomstudiengang möglich ist. Und sie können auch ohne einschneidende Konsequenzen wieder eingestellt werden, wenn kein Bedarf mehr besteht.

- Der klassische Master ist Teil eines Graduiertenprogramms (in Brasilien „Postgraduier-tenprogramm“ genannt), welches das Doktorat mit integriert. Konsequenterweise gibt es auch in Deutschland entsprechende Vorschläge wie die hier seit etwa 10 Jahren laufen- den Graduiertenkollegs, welche in etwa 3 Jahren zur Promotion führen, und bereits einen Schritt in diese Richtung gehen. Mit dem Blick auf die Promotion könnte auch ein formal nicht qualifizierender Master im Anschluss an den Diplomingenieur sehr attraktiv sein. Für die ausbildenden Institute ist es von Vorteil, Forschungsthemen und –Ergebnisse leichter in die Lehre mit einfließen zu lassen. Im Rahmen der Diplomingenieurausbil- dung ist dies selbst bei Vertieferveranstaltungen nur eingeschränkt möglich.

#### **4.4 Berufsständische Aspekte**

Die gesellschaftliche Stellung des Ingenieurs liegt in Deutschland allgemein im Mittelfeld zwischen der Spitzengruppe (z.B. Mediziner, Juristen) und den akademischen Underdogs (z.B. dazu gemachte Lehrer). Dabei ist seine „akademische Gleichberechtigung“ aber erst seit etwa 100 Jahren formal voll anerkannt, etwa durch das Promotionsrecht an „Technischen“ Hochschulen. In den 20er Jahren ist es dem Geodäten gelungen, sich gegenüber dem Juristen für die Wahrnehmung von Verwaltungsaufgaben im höheren technischen Dienst durchzuset- zen. Seitdem wurde peinlich genau darauf geachtet, die Laufbahnvorschriften des technischen Dienstes denen des allgemeinen Verwaltungsdienstes anzupassen.

Eine mindere Qualifikation im Sinne eines ersten berufsqualifizierenden Abschlusses durch einen Bachelor machte die akademische, berufliche und gesellschaftliche Gleichberechtigung des Ingenieurs mit „Vollakademikern“ wieder zunichte. Man muss befürchten, dass Wirt- schaft und Verwaltung die „preiswerten“ Absolventen den „teuren“ Diplomingenieuren vor- ziehen und dass sich die Studenten entsprechend orientieren, wie aus den USA bekannt. Und ist es andererseits denkbar, dass Juristen mit einem Bachelor-Abschluss antreten?

Die sich abzeichnende Schlacht wird aber möglicherweise nicht im Felde des öffentlichen Dienstes geführt werden, sondern in Wirtschaft und Industrie. Und hier geht es weniger um Laufbahnvorschriften und Dienstrecht als um Fähigkeiten und Fertigkeiten, um Angebot und Nachfrage. Die Zukunft gehört dem gut ausgebildeten Fachmann, der überdies das Hand- werkzeug beherrscht, sich flexibel in neue Arbeitsfelder einzuarbeiten. Nichts ist dabei so praktisch wie die solide Basis einer guten theoretischen Ausbildung.

## 5 Ausbildungsmodelle in Diskussion

Abschliessend werden drei Vorschläge vorgestellt und kurz kommentiert.

### 5.1 Modell der ARGE TU/TH

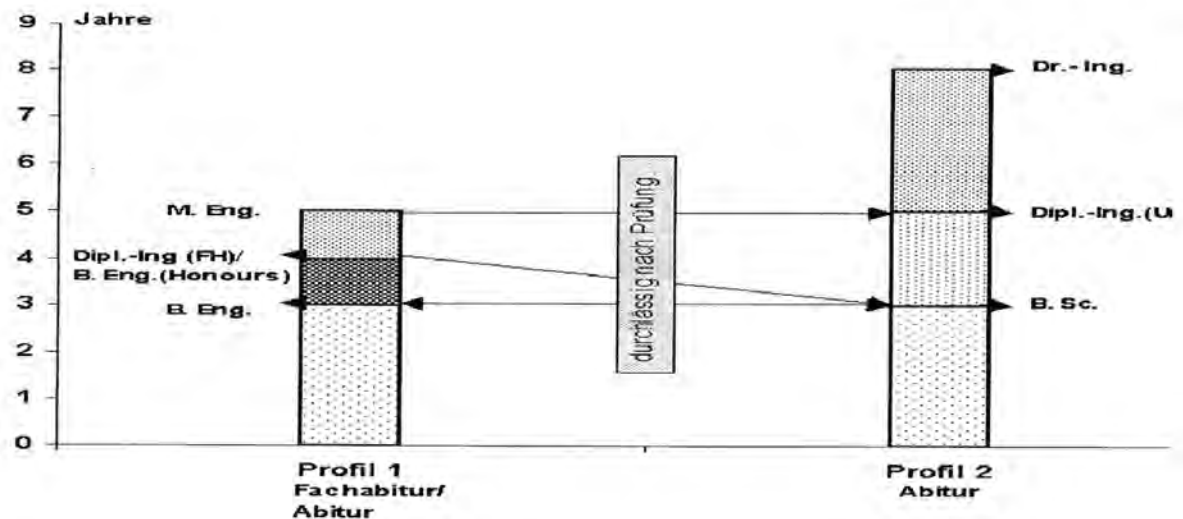


Abb.1: Vorschlag der ARGETU/TH (s. auch [www.tu-dresden.de/Presse/Positionspapier](http://www.tu-dresden.de/Presse/Positionspapier))

Abb.1 zeigt die zwei Profile der Ingenieurausbildung des Positionspapiers der ARGE TU/TH, 2001. Das Modell wird aus den traditionellen Ausbildungsgängen an Fachhochschule und Universität entwickelt und sieht an beiden Standorten den Bachelor nach 3 Jahren vor, modifiziert durch die Bezeichnungen B. Eng und B. Sc.. Nach insgesamt 5 Jahren erreicht ein Kandidat an der Fachhochschule den Master (M. Eng.) und an der Universität das klassische Diplom, an welches sich ein Doktorat für weitere 3 Jahre anschließen kann. Durchlässigkeit nach Prüfungen ist gewährleistet.

Bemerkenswert ist hier, dass der Diplomingenieur erhalten und an der Universität kein Master eingeführt wird. Zweifelhaft bleibt, ob an der Universität im Rahmen des grundlagenorientierten Diplomstudiengangs ein berufsqualifizierender B.Sc. machbar ist.

### 5.2 Modell des Fakultätentages „Bauingenieur- und Vermessungswesen“ (RAMM, W., 2001)

Auf seiner 56. Plenarsitzung am 5. und 6. Oktober 1999 hat der Fakultätentag grundsätzliche Beschlüsse zum Thema Bachelor/Master getroffen. Er kommt aus den gleichen Gründen wie in Abschnitt 4 dargelegt zu der Aussage:

„Die eingeführten Diplom-Studiengänge und der Diplom-Abschluss sollen beibehalten werden“.

Aus diesem Statement folgt dann die Aufgabe, Kompatibilität zwischen dem zweistufigen System und dem Diplomstudiengang herzustellen. Dies soll durch mehrere Maßnahmen geschehen, so durch eine Zusatzurkunde zum Diplomzeugnis, aus dem sich die erbrachten Leistungen klar ablesen lassen können und welches „mindestens Gleichwertigkeit“ mit dem Master-Abschluss feststellt, durch Einführung des Kreditpunktesystems und schliesslich durch Definition von Ein- Um- und Ausstiegs- Schnittstellen.

Abb. 2 zeigt das vom Fakultätentag vorgeschlagene System, welches das Diplomstudium praktisch unangetastet lässt und eine Schnittstelle nach dem Grundfachstudium als Ausstieg mit berufsqualifizierenden Abschluss vorsieht. Gleichzeitig markiert dies eine Einstiegsmöglichkeit für Studenten mit Bachelorgrad, „u.U. nach Erwerb der notwendigen Eingangsqualifikation“.

Der Fakultätentag nennt ebenfalls die Probleme mit dem Bachelor-Abschluss wie in Abschnitt 4 dargelegt und weist in diesem Zusammenhang auf die „American Society of Civil Engineers“, welche den Bachelor-Grad nicht als berufsqualifizierend für die heutige Ingenieur-tätigkeit ansieht.

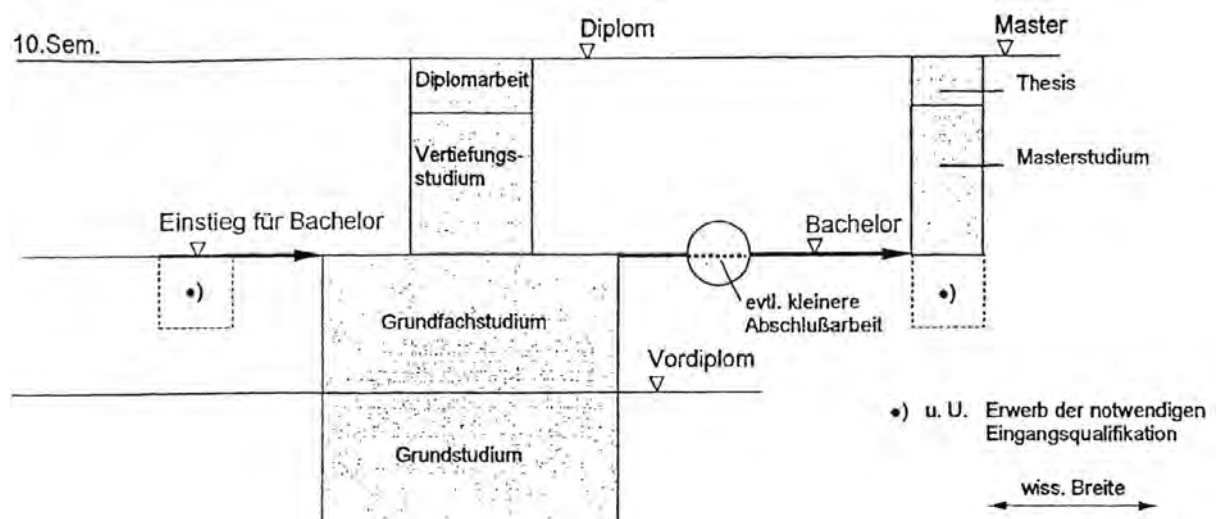


Abb.2: Schema zur Herstellung einer Kompatibilität von Diplom- und Bachelor/Master-Studiengängen im Bauingenieurwesen an Universitäten (in: W. Ramm, 2000)

### 5.3 Eigenes Modell (Kombiniertes Modell: „KOMM“)

Die beiden vorgestellten Modelle zeigen eine Reihe von Gemeinsamkeiten, insbesondere ein Votum für die Beibehaltung des Diplomingenieurs, von welchem auch der Autor überzeugt ist und für welches er sich einsetzt (z.B. Korrespondenz mit Ministerin Bulmahn: „bewährtes Erfolgsmodells Diplomingenieur“). Gemeinsam ist den beiden Papieren auch die kritische bis ablehnende Bewertung eines Bachelors, die im vorliegenden Aufsatz geteilt wird.

Das eigene Modell sieht jedoch, anders als die Vorschläge von Fakultätentag und ARGE TU/TH, im Master eine große zusätzliche Chance für die universitäre Ausbildung, was bereits



im Abschnitt 4.3 begründet wurde. Für viele Bildungsexperten aus der Universität mag sich die Schwierigkeit mit dem Master aus einem „Laufbahndenken“ und als Ergebnis der üblichen Visualisierung der Studiengänge in Form von Säulendiagrammen (wie in Abb. 1 und 2) ergeben: Wenn das Diplom „mindestens gleichwertig“ mit dem Master ist, dann dürfte ein Master dem Diplom nicht zeitlich folgen und nicht etwa der Säule „Diplom“ noch aufgesetzt werden – das ließe sich mit der Anschauung nicht vereinbaren.

Das eigene Modell verzichtet daher auf graphische Visualisierung. Es enthält folgende Komponenten:

Masterstudiengänge sollten

- Themen anbieten, welche aktuell, fachübergreifend sowie relativ speziell sind und für die eine große Nachfrage von der Praxis besteht. „Geoinformationssysteme“, „Fernerkundung“, „Fahrzeugnavigation“ oder „Web Mapping“ sind solche Themen, für welche andererseits eigene, volle Diplomstudiengänge monodisziplinärer Art nicht die ideale Form wären.
- einzelne Lehrinhalte aus dem Diplomstudiengang flexibel integrieren können
- Fortbildung integrieren und damit eine enge Verbindung zwischen Hochschule und Praxis sicherstellen
- den Weg zum Doktorat vorgeben. In vielen Ländern, etwa in Brasilien, ist der Master eine „Zwischenstufe“ zum Doktorat. Dadurch kann eine Masterausbildung auch *nach* einem Diplom sehr attraktiv werden.
- die Verzahnung mit Diplom, Fortbildung und Doktorat über das Kreditpunktsystem regeln.
- für einen großen Kreis von Interessenten offenstehen. Qualifikationslücken für die Ableistung eines erfolgreichen Studiums müssen individuell festgestellt und ggfls. durch Vermittlung zusätzlicher Kenntnisse und Fähigkeiten als Komponenten aus dem Diplomstudiengang geschlossen werden.

Das kombinierte Modell „KOMM“, welches die offensichtlichen Vorteile des soliden Diplomingenieurs mit der Flexibilität des Masters verbindet, könnte große Attraktivität bieten und eine Wende bei den studentischen Zulassungszahlen einleiten.

Eine bisher nicht erwähnte Bedingung muß allerdings erfüllt sein, um eine Kombination realistisch zu gestalten: Das Diplom müßte tatsächlich in 5 Jahren ablegbar sein. Dazu haben alle beizutragen, Hochschule, Studierende und Politik. Bedeutet das „Verschulung“ des Studiums? Nicht notwendigerweise, mit Sicherheit aber fordert dies eine bessere Organisation, und das müßte doch in Deutschland machbar sein!

## 6 Katastrophe oder Chance für die geodätische Ausbildung in Deutschland?

Nach den Ausführungen sollte die Antwort auf die Frage einfach sein und lautet in bewußt pointierter Formulierung:

*Der Bachelor ist eine relative Katastrophe, der Master eine absolute Chance für die Ingenieurausbildung in Deutschland.*

Bildungspolitiker, welche Flexibilität anmahnen und die beste Lösung anstreben, sollten von den Universitäten nicht verlangen, zusammen mit dem Master auch den Bachelor mit in Kauf nehmen zu müssen.

### Literatur

- BÄHR, H.-P., 1995: Past and Future Concepts for Foundation of Surveying Engineers in the Academic Environment of Central Europe – Statements for Discussion. Think Tank III, Geoinfo TU Wien, Ed. A. Frank and I. Orchard.
- BÄHR, H.-P., 1996 a: Ausbildungsmodelle in Photogrammetrie und Fernerkundung für die Zukunft – für die Praxis? DGPF, Band 4, ISSN 0942-2870.
- BÄHR, H.-P., 1996 b: What is the future of our profession? Invited Paper, Commission VI, ISPRS, Wien.
- CHOMSKY, N., 1999: Profit over People, Neoliberalismus und Globale Weltordnung. Europa-Verlag GmbH Hamburg/Wien.
- GREGORY, J.P., 1999: Dichtung und Wahrheit über das amerikanische Hochschulwesen: Was kann Deutschland von den USA lernen? Manuskript Vortrag Universität Kaiserslautern.
- HOLZAMER, H. H., 2001: Fachwissen allein reicht nicht aus. Süddeutsche Zeitung Nr. 131.
- RAMM, W., 2000: Zur Internationalisierung des Studiums – Über die Bedeutung von Bachelor- und Master-Abschlüssen im Bauingenieurwesen. Bauingenieur Band 75.
- WITTE, B., 2000: Absolventen und Studienanfänger im wissenschaftlichen Studiengang Vermessungswesen. Zeitschrift für Vermessungswesen (ZfV), Heft 4.
- ARGE TU/TH, 2001: Positionspapier zur Ingenieurausbildung an Technischen Universitäten und Hochschulen (TU/TH) in Deutschland. <http://www.tu-dresden.de>.
- ASII-BAU (Akkreditierungsagentur für Studiengänge der Ingenieurwissenschaften und der Informatik e. V.) Nr. 266-00, 4. April 2001: Fachspezifische ergänzende Hinweise zur Akkreditierung von Bachelor- und Master-Studiengängen des Bauingenieurwesens und des Vermessungswesens, 04. Entwurf.
- DEUTSCHE GEODÄTISCHE KOMMISSION, 1998: Geodäsie 2000<sup>++</sup> ein Strategiepapier der Deutschen Geodätischen Kommission, München, Vorbemerkung BÄHR, H.-P., Zeitschrift für Vermessungswesen (ZfV), Heft 6.
- HAUPTVERBAND DER DEUTSCHEN BAUINDUSTRIE, 2000: Parlamentarierbrief, Berlin.
- KORRESPONDENZ BUHLMANN, E./BÄHR, H.-P.: Januar/März 2001
- VDI-NACHRICHTEN, 1. Juni 2001: Industrie will Einfluss auf Fördermittel, Ausgabe 22.
- DIE WELT, 2001: Leitartikel: Nur noch 28% der Schulabgänger studieren.

# Erfassung und Interpretation von dichten Oberflächendaten

JAN BÖHM \*

*Zusammenfassung: Moderne Streifenprojektionssysteme sind in der Lage innerhalb kürzester Zeit Oberflächen dicht zu erfassen. Die Anzahl der erfassten Punkte geht dabei in die Hunderttausende, selbst Millionen von Punkte sind möglich. Spezielle Verfahren der 3D Bildverarbeitung sind notwendig um diese Daten zu verarbeiten und zu interpretieren. Der Beitrag beschreibt das am Institut für Photogrammetrie der Universität Stuttgart entwickelte Streifenprojektionssystem zur photogrammetrischen Erfassung von dichten Oberflächendaten und die aktuellen Arbeiten zur Verarbeitung und Interpretation. Die Anwendungen liegen vor allem in der industriellen Inspektion, umfassen jedoch auch Bereiche wie Denkmalspflege und Medizin.*

## 1 Einleitung

Es stehen heute zahlreiche Alternativen zur Erfassung dichter Oberflächen zur Verfügung. Die heute gebräuchlichen Verfahren lassen sich grob in triangulierende und laufzeitmessende Verfahren unterteilen. Zu ersteren zählen zum Beispiel das Stereo-Matching, Laser-Triangulation und viele andere. Den meisten Systemen zur dichten Erfassung ist gemein, dass das Messergebnis in einem Raster vorliegt, das bestimmt wird entweder durch einen rasterförmigen Sensor zum Beispiel eine CCD Kamera, eine mechanische Komponente zum Beispiel einen Kreuztisch oder einer Kombination aus Sensor und mechanischer Komponente zum Beispiel eine Laserlinie und ein Drehtisch. Dies unterscheidet die dichte Erfassung grundsätzlich von Verfahren, die auf manueller Auswertung oder auf Merkmalsoperatoren basieren. Dort liegt das Ergebnis oft in einer ungeordneten Punktwolke vor und muss nachträglich interpoliert oder trianguliert werden. Die Anordnung der Punkte in einem Raster hat den Vorteil, dass bereits eine Ordnungsinformation vorliegt. Diese Ordnungsinformation kann in den Verarbeitungsschritten zu einer beschleunigten Prozessierung genutzt werden.

## 2 Streifenprojektion zur Erfassung von dichten Oberflächendaten

Streifenprojektions-Systeme gehören sicherlich zu den populärsten Sensoren zur dichten Oberflächenerfassung. Zahlreiche kommerzielle Realisierungen des prinzipiellen Verfahrens sind heute auf dem Markt, zum Beispiel von ABW, Breuckmann, GOM, Steinbichler oder Imetric. Gegenüber den vorher erwähnten Alternativen zeichnet sich die Streifenprojektion durch ihre Zuverlässigkeit, Robustheit gegenüber der Oberflächentextur, sowie ihre Geschwindigkeit aus. Das heißt, anders als bei shape-from-x Verfahren können auch Objekte mit starken Sprüngen in der Oberfläche und großer Ausdehnung in Aufnahme­richtung zuverlässig erfasst

---

\*Dipl.-Inform. M.Sc. Jan Böhm, jan.boehm@ifp.uni-stuttgart.de, Institut für Photogrammetrie, Universität Stuttgart, Geschwister-Scholl-Str. 24, 70174 Stuttgart

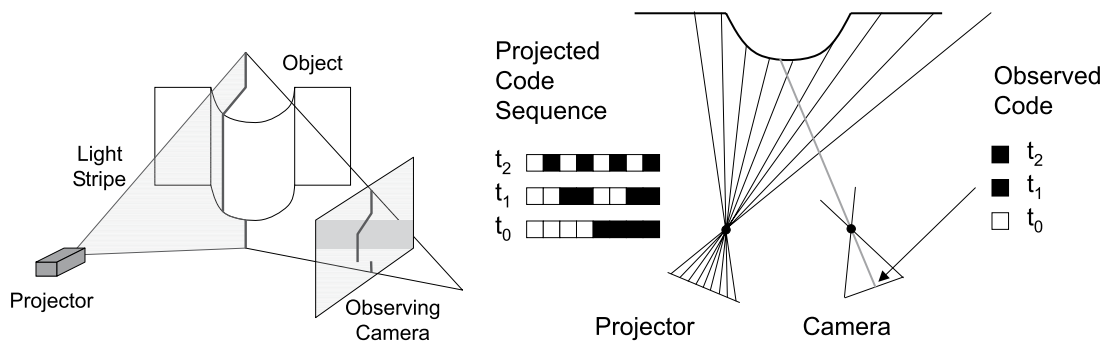


Abb. 1: Das Prinzip des Lichtschnitts und des codierten Lichtansatzes mit einer Kamera und einem Projektor.

werden. Mit einem Streifenprojektor können selbst Objekte ohne jegliche Textur erfasst werden, dies ist bei Stereo-Matching nicht möglich, außerdem ist die Streifenprojektion wesentlich schneller als ein Matching. Dies trifft mit Sicherheit auch auf Laser-Scanner Systeme zu, jedoch sind Streifenprojektoren in der Regel die wesentlich kostengünstigere Alternative.

Ohne auf die Details einzelner Implementierungen eingehen zu können, sollen im Folgende die Grundzüge der Streifenprojektionstechnik nach dem codierten Lichtansatz kurz dargestellt werden (ALTSCHULER ET AL. 1979). Die Streifenprojektion basiert auf dem Lichtschnittverfahren, wie es in Abbildung 1 angedeutet ist. Eine einzelne Linie wird auf die Objektoberfläche projiziert und unter einem anderen Winkel von einer Kamera beobachtet. Die Deformation der Linie ergibt die Parallaxen und somit die dreidimensionale Form entlang der Linie. Um eine Oberfläche dicht zu erfassen muss ein Vielzahl von Linien in dichten Abständen projiziert werden. Um dennoch die Eindeutigkeit zu gewährleisten werden die Linien nicht gleichzeitig sondern nach einem bestimmten Verfahren in zeitlicher Folge gestaffelt als binäres Muster projiziert. Das hierfür von nahezu allen Systemen verwendete Verfahren ist die Gray-Code Sequenz. Mit der Gray-Code Sequenz müssen für  $n$  Linien lediglich  $ldn$  Muster auf das Objekt projiziert werden (siehe Abbildung 2).

Die Gray-Code Sequenz löst die Korrespondenz zwischen Projektor-Koordinaten und Kamera-Koordinaten jedoch nur grob auf Pixelebene. Um Subpixel-Genauigkeit zu erreichen muss eine weitere Muster-Sequenz projiziert werden. Bisherige Systeme verwenden hierfür den Phasenshift (siehe Abbildung 2). Zwei Nachteile des Phasenshift-Verfahrens sind anzumerken. Zum einen ist die Annahme einer sinusförmigen Abbildung des Streifenmusters auf dem Sensor bei einem rasterbasierten Projektionssystem zunächst nicht erfüllt. Dies führt zu deutlich nachweisbaren Messfehlern. Die Sinusform des Streifenmusters muss erst erzeugt werden. Dies kann zum einen durch ein gezieltes 'Unschärf'-Stellen der Projektionseinheit erfolgen. Der Nachteil hierbei ist, dass diese Unschärfe nur in einem bestimmten Abstand des Objekts vom Projektor das gewünschte Ergebnis erzielt. Variiert der Abstand der Objektoberfläche stark in Aufnahme-richtung, dann wird das Streifenmuster nur in manchen Bereichen des Objekt sinusförmig abgebildet, in anderen nicht. Eine zweite Möglichkeit zur Erzeugung sinusförmiger Muster aus Raster-Projektoren ist die Anbringung optischer (Tiefpass)-Filter vor dem Projektor. Dies ist jedoch nur in einer Streifenrichtung möglich, so dass keine Kreuz-Projektion mehr erfolgen kann.

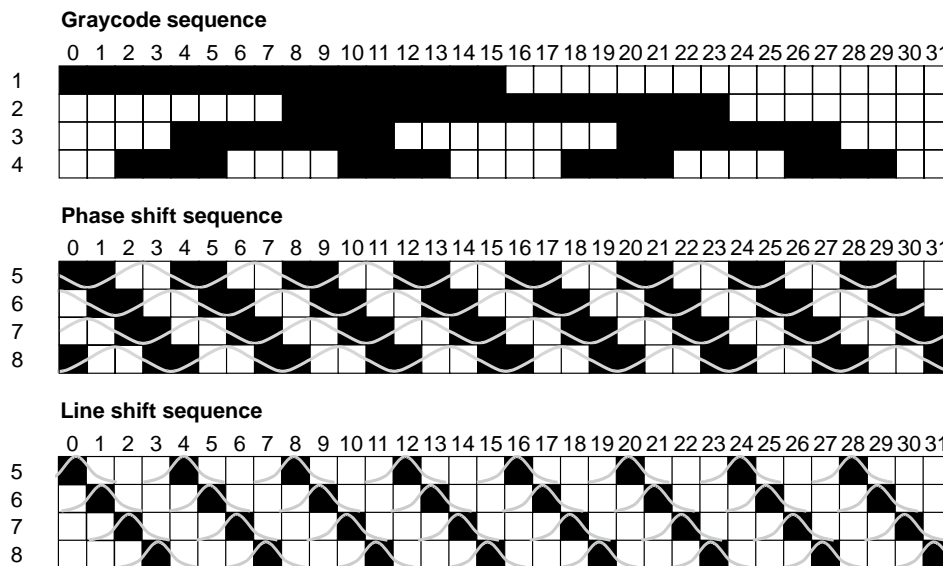


Abb. 2: Die Gray-Code Sequenz und die beiden Alternativen zur Subpixel Bestimmung, Phasenshift und Line-shift.

Ein weiterer Nachteil des Phasenshift-Verfahrens betrifft die Auswertung der Korrespondenz eines Kamerapixels zu einem Projektorstreifen. Beim Phasenshift wird die ganzzahlige Pixel-Koordinate der Kamera zu einer Subpixel-Koordinate des Projektors in Beziehung gesetzt. Beobachten mehrere Kameras dieselbe Streifensequenz, so kann keine direkte Pixel-zu-Pixel Korrespondenz zwischen den beteiligten Kameras aufgebaut werden.

## 2.1 Line-shift Verfahren

Um diesen Nachteilen des Phasenshifts zu begegnen wurde am Institut für Photogrammetrie von J. Gühring (GÜHRING ET AL. 2000) ein neues Verfahren für die Durchführung und Auswertung von Messungen nach dem codierten Lichtansatz entwickelt. Das neue Line-shift Verfahren basiert nicht mehr auf der Annahme einer sinusförmigen Abbildung des Streifenmuster. Stattdessen wird getrennt für jede projizierte Linie das Zentrum im Bild bestimmt (siehe Abbildung 2). Durch das neue Verfahren werden ganzzahlige Projektorkoordinaten mit Subpixel-Koordinaten der Kameras verknüpft. Dies ermöglicht die direkte Verknüpfung von Bildmessungen mehrerer Kameras, die dieselbe Streifensequenz beobachten. Sind mehrere Kameras an der Messung beteiligt führt dies zu einer Steigerung der Redundanz und somit zu zuverlässigeren und genaueren Resultaten. Ein weiterer Vorteil der neuen Methode ist die verbesserte Kompensation von Reflektivitätsunterschieden in der Objektoberfläche.

## 2.2 Photogrammetrische Prozessierung

Besitzt der Projektor die Möglichkeit das Streifen-Muster sowohl horizontal als auch vertikal zu projizieren, so kann der Projektor als inverse Kamera modelliert werden. Das heißt, die in der Photogrammetrie üblichen Verfahren zur Kalibrierung und Berechnung von räumlichen Koordinaten können analog auf den Projektor angewandt werden. Für den Projektor wer-

den die Parameter der inneren und äußeren Orientierung bestimmt, außerdem werden noch die zusätzlichen Parameter wie Radialverzeichnung etc. bestimmt (BRENNER ET AL. 1999). Dieses Vorgehen liefert exzellente Resultate, wenn ein geometrisch stabil aufgebauter Projektor in Kombination mit einer Kamera eingesetzt wird.

Für geometrisch weniger stabile Projektionseinheiten ist eine Kombination mit mehreren Kameras vorzuziehen, bei der die Koordinaten des Projektors nicht in die Berechnung der räumlichen Koordinaten einbezogen werden. Daher muss der Projektor nicht kalibriert werden. Stattdessen wird die Streifen-Sequenz nur dazu verwendet die Korrespondenz zwischen den beteiligten Kameras zu lösen.

Die Photogrammetrische Kalibrierung und Prozessierung hat gegenüber der häufig anzutreffenden Methode der direkten Kalibrierung den Vorteil, dass keine hochgenaue Kalibriereinheit, zum Beispiel eine Referenzebene und ein Verschiebetisch, benötigt wird. Zudem liegen die Parameter der äußeren und inneren Orientierung explizit vor und behalten ihre Gültigkeit auch außerhalb des ursprünglichen Kalibriervolumens. Die Residuen und die Kovarianz Matrizen, die auch bei der Auswertung anfallen, erlauben eine gute Selbstdiagnose des Systems.

Die oben beschriebenen Algorithmen und Verfahren wurden in mehreren Aufbauten realisiert und getestet. In einem Aufbau mit einem ABW 640 Projektor und einer hochauflösenden Digitalkamera (Abbildung 3 Links) kann auf einer Fläche von  $200 \times 200 \text{ mm}^2$  ein Raster von 640 auf 640 Punkten erzeugt werden. Dies entspricht in etwa einer Auflösung von  $0,3 \text{ mm}$  am Objekt. In einem Ebenheits-Test an einer Referenzebene, wie er in ähnlicher Weise auch für die Abnahme- und Überwachungsrichtlinien optischer 3D-Sensoren vorgeschlagen wurde, erzielt das System eine Ebenheit von  $0,031 \text{ mm}$  bei einer maximalen Abweichung von  $0,174 \text{ mm}$ .

Ein weiteres Beispiel ist die Integration eines Streifenprojektions-System in einer Multi-Sensor Mess-Maschine (BÖHM ET AL. 2001). Die Maschine, konzipiert für den automatisierten Messvorgang industrieller Teile, trägt mehrere Sensor-Plattformen, darunter eine Stereokamera mit einer Basis von ca.  $300 \text{ mm}$  (Abbildung 3 Mitte). Diese Stereo-Kamera wurde mit einem LCD-Projektor zu einem dicht messenden 3D-Sensor kombiniert. Durch die Aktorik der Maschine kann die Stereo-Kamera automatisiert und optimal zum Objekt positioniert werden.

### **3 Interpretation von dichten Oberflächendaten**

Das vorgestellte System zur Erfassung von dichten Oberflächendaten liefert eine dichte Punktwolke in einer Rasteranordnung. Diese Daten sind direkt geeignet für eine Visualisierung. Eine solche Visualisierung kann in bestimmten Anwendungen bereits das Endziel sein. Für die Ableitung von Messergebnissen im Bereich der industriellen Anwendungen muss die Punktwolke jedoch noch weiteren Verarbeitungsschritten unterzogen werden.



Abb. 3: Links: Labor Aufbau, Mitte: Multi-Sensor Mess-Maschine, Rechts: Datensatz, wie er mit dem mittleren Aufbau erzeugt wurde in schattierter Darstellung.

### 3.1 Vorverarbeitung

Durch die Anordnung der Punktwolke in Form einer Matrix, ist es möglich alle aus der Bildverarbeitung bekannten Operatoren in nahezu unveränderter Form auch auf das Ergebnis einer 3D Messung anzuwenden. Dies gilt insbesondere für die Operatoren zur Vorverarbeitung, also zum Beispiel Glättungs-Operatoren. Der Einsatz von Glättungs-Filtern findet häufig statt, wenn maskenbasierte Verfahren in der Weiterverarbeitung zum Einsatz kommen. Die Glättung füllt eventuell vorhandene Lücken in der Matrix auf, die anderenfalls zu Fehlern in den Berechnungen führen würden.

Auch einfache Operatoren zur Merkmalsextraktion wie zum Beispiel Kantendetektoren können auf 3D-Daten angewandt werden. Diese einfachen Operatoren führen jedoch nur zum Erfolg, wenn die Oberfläche starke Diskontinuitäten aufweist. Insbesondere bei gekrümmten Flächen mit stetigen Übergängen ist es notwendig auf flächenbasierte Merkmale, wie sie im nächsten Abschnitt erläutert werden, überzugehen.

### 3.2 Differential-geometrische Merkmale

Sind für einen beliebigen Punkt einer Oberfläche der Normalenvektor  $N$  und die ersten und zweiten Ableitungen bekannt, so können für diesen Punkt nach den bekannten Formeln (1) die minimale und maximale beziehungsweise die Mittlere und die Gaußsche Krümmung (2) berechnet werden (DO CARMO 1976). Die Mittlere und die Gaußsche Krümmung sind auf Grund ihrer Rotations- und Translations-Invarianz ein wichtiges und beliebtes Merkmal räumlicher Flächen bei vielen Aufgabenstellung der Computer Vision, insbesondere bei der Segmentierung.

Mehrere Schemata zur Berechnung der Krümmungseigenschaften einer Oberfläche aus einer Punktwolke sind in der Literatur vorgeschlagen worden. Einige Techniken wurden speziell für triangulierte Flächen entwickelt. Diese Techniken verwenden jedoch meist nur einen sehr kleinen Nachbarschafts-Bereich um den zu untersuchenden Punkt, und liefern daher unzuverlässige Resultate. Speziell im Bezug auf Daten, die aus Streifenprojektions-Systemen gewonnen wurden, sind Methoden interessant, die von einer rasterförmigen Organisation der

$$\begin{aligned} E &= \mathbf{x}_u \mathbf{x}_u & F &= \mathbf{x}_u \mathbf{x}_v & G &= \mathbf{x}_v \mathbf{x}_v \\ L &= \mathbf{N} \mathbf{x}_{uu} & M &= \mathbf{N} \mathbf{x}_{uv} & N &= \mathbf{N} \mathbf{x}_{vv} \end{aligned} \quad (1)$$

$$H = \frac{EN+GL-2FM}{2(EG-F^2)} \quad K = \frac{LN-M^2}{EG-F^2} \quad (2)$$

$$z = f(x, y) = ax^2 + bxy + cy^2 + dx + ey + f \quad (3)$$

Abb. 4: Formeln für die Berechnung der Krümmungen.

Punkte ausgehen.

Die einfachste Möglichkeit ist es, mit Hilfe einer Faltungs-Operation direkt die ersten und zweiten Ableitungen der Oberfläche zu berechnen, die für die Herleitung der Krümmungen benutzt werden. Jedoch sind besonders die zweiten Ableitungen sehr empfindlich gegen Rauschen. Zuverlässigere Resultate können erzielt werden indem eine Polynom-Fläche in die Umgebung des Punktes durch Kleinste-Quadrate-Methoden eingepasst wird. Üblicherweise wird hierfür ein explizites bivariates Polynom zweiter Ordnung angesetzt (3). Aus den Koeffizienten des Polynoms können die Ableitungen berechnet werden. Die Berechnungs-Ergebnisse werden jeweils für das Zentrums-Pixel der Maske gespeichert. Liegen nach üblicher Konvention x- und y-Achse in der Bildebene so lautet bei einem Polynom  $z = f(x, y)$  das Minimierungskriterium  $\sum (f(x_i, y_i) - z_i)^2$ . Die Residuen liegen also entlang der z-Achse und nicht unbedingt senkrecht zur Oberfläche, das heißt sie entsprechen nicht dem geometrischen Abstand. Verschiebt man das Eingangsbild erhält man für jeden Pixel die Ableitungen und den Normalenvektor und kann somit die Krümmungen berechnen.

### 3.3 Modellgestützte Segmentierung

Nachdem für jedes Pixel die Krümmungs-Eigenschaften bekannt sind, kann eine Gruppierung der Pixel zu Regionen ähnlicher Krümmung erfolgen. Klassische Klassifikations-Schemata sind bekannt, nach denen die Pixel in ebene, konvex oder konkav gekrümmte Regionen eingeteilt werden. J.P. Besel (BESL 1988) entwickelte ein Klassifikations-Schema das zwischen acht verschiedenen Typen unterscheidet, je nach dem Vorzeichen der Mittleren- und der Gaußschen Krümmung.

Hat man jedoch durch eine zuverlässige Datenerfassung und erweiterte Berechnungsmethoden zuverlässige Werte für die Krümmungseigenschaften, kann eine genauere Unterteilung der Regionen nach ihrem jeweiligen Krümmungswert erfolgen. Hierfür wurde vom Autor ein modellbasiertes Segmentierungs-Verfahren entwickelt (BÖHM ET AL. 2000), welches die Krümmungsinformationen eines vorgegebenen Modells in den Segmentierungsprozess einfließen lässt. Die Modellvorgaben können zum Beispiel vollautomatisch aus einem CAD Modell abgeleitet werden. Ein CAD Modell erlaubt es durch die mathematische Beschreibung der Flächen für jeden beliebigen Punkt exakt die Krümmungseigenschaften zu berechnen. Diese Krümmungseigenschaften werden pro Fläche berechnet und bilden im Parameterraum aufgespannt durch die Mittlere und die Gaußschen Krümmung die Modell-Klassen. In einem Nächste-Nachbarschaft Klassifikations-Verfahren werden die einzelnen Pixel des Distanzbil-



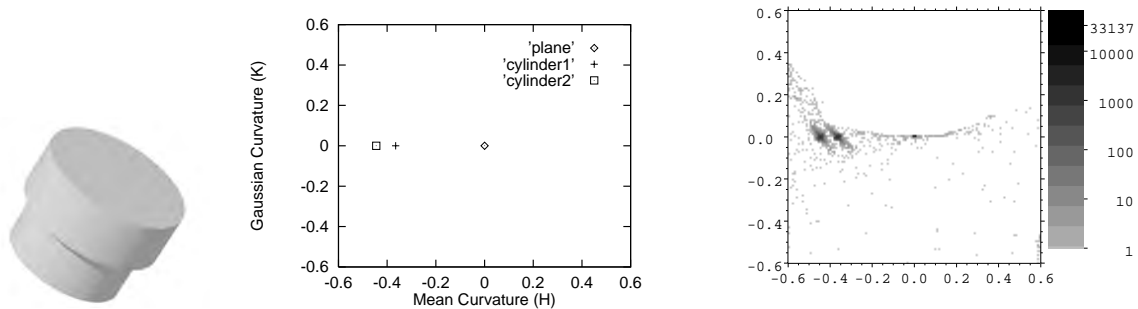


Abb. 5: Ein einfaches Test-Teil "Adapter" mit drei Flächen: Ebene, Zylinder1 und Zylinder2. Die Modell-Klassen abgeleitet aus dem CAD-Modell sind dem Krümmungshistogramm der 3D-Messdaten gegenübergestellt.

des diesen Modell-Klassen zugeordnet. Abbildung 5 zeigt die Gegenüberstellung der aus einem CAD Modell abgeleiteten Modell-Klassen und des Krümmungshistogramms eines Distanzbildes desselben Objekts. Deutlich sind die zu den Klassen korrespondierenden Zentren des Histogramms zu erkennen.

### 3.4 Merkmalszuordnung und Objekterkennung

Durch die modellgestützte Segmentierung wurde bereits ein erster Zusammenhang zwischen einem Modell des Objekts und seinen 3D-Messdaten hergestellt. Im oben angeführten Beispiel ergibt sich hieraus bereits eine eindeutige Zuordnung. Bei komplexeren Objekten jedoch kann es zu Mehrdeutigkeiten kommen. Diese Mehrdeutigkeiten können nur in einem Suchprozess aufgelöst werden, der zusätzliche geometrische Bedingungen einfließen lässt um die richtigen Zuordnungen herzustellen. Ein solches System zur Objekterkennung wurde in ähnlicher Weise bereits mit Erfolg implementiert (BÖHM ET AL. 1999).

Die Zuordnung von Flächen der Messdaten zu Flächen eines CAD Modells ist ein wichtiger Schritt in einem automatisierten Messablauf und erlaubt die direkte Ableitung von Messergebnissen und den Vergleich zu Sollwerten. So kann zum Beispiel die Ebenheit einer Fläche bestimmt werden, oder der Radius eines Zylinders mit dem Sollwert aus dem CAD Datensatz verglichen werden.

## 4 Zusammenfassung

Es wurden die weiterentwickelten Verfahren zur Streifenprojektion aufgezeigt, die eine zuverlässige und hochgenaue dichte Erfassung von Oberflächen ermöglichen. Ausgehend von den rasterförmigen Distanzdaten können Algorithmen zur automatischen Distanzdaten-Interpretation eingesetzt werden. Ziel ist die vollautomatische Messung und Ableitung von quantitativen Messergebnissen.

## 5 Literaturverzeichnis

- ALTSCHULER ET AL. (1979): M. Altschuler, B.R. Altschuler und J. Taboada. Measuring surfaces spacecoded by a laser-projected dot matrix. In *Imaging Applications for Automated Industrial Inspection and Assembly*, Band 182. SPIE, 1979.
- BESL (1988): P.J. Besl. *Surfaces in Range Image Understanding*. Springer-Verlag, 1988.
- BÖHM ET AL. (1999): J. Böhm, C. Brenner, J. Gühring und D. Fritsch. CAD-basierte Objekterkennung für ein multisensorielles Meßsystem. *Mustererkennung 1999*, Seite 62–69, 1999.
- BÖHM ET AL. (2000): J. Böhm, C. Brenner, J. Gühring und D. Fritsch. Automated Extraction of Features from CAD Models for 3D Object Recognition. In *ISPRS Congress 2000*, Amsterdam, Netherlands, 2000, Band 33.
- BÖHM ET AL. (2001): J. Böhm, J. Gühring und C. Brenner. Implementation and calibration of a multi sensor measuring system. In Sabry El-Hakim und Armin Grün (Hrsg.), *Videometrics and Optical Methods for 3D Shape Measurement*, Band 4309 der Reihe *Proceedings of SPIE*, Seite 154–161. SPIE, 2001.
- BRENNER ET AL. (1999): C. Brenner, J. Böhm und J. Gühring. Photogrammetric calibration and accuracy evaluation of a cross-pattern stripe projector. *Proc. SPIE Videometrics VI* **3641**, 164–172, January 1999.
- DO CARMO (1976): M. do Carmo. *Differential Geometry of Curves and Surfaces*. Prentice-Hall, 1976.
- GÜHRING ET AL. (2000): J. Gühring, C. Brenner, J. Böhm und D. Fritsch. Data processing and calibration of a cross-pattern stripe projector. In *ISPRS Congress 2000*, Amsterdam, Netherlands, 2000, Band 33.

# Ein Verfahren zur automatischen Detektion von kubischen Verknüpfungsobjekten in digitalen Farbmessbildern

FRANK BOOCHS<sup>1</sup>

*Zusammenfassung: Der Beitrag stellt ein Verfahren vor, mit dessen Hilfe kubische Verknüpfungsobjekte in terrestrischen Messbildern erkannt und für die Orientierung der Messbilder eingesetzt werden können. Mit dem Verfahren wird das Ziel verfolgt, Einschränkungen hinsichtlich der Verknüpfung von Messbildern aufzuheben, die durch Sichtbarkeits- und Abbildungsprobleme bei den heute üblicherweise eingesetzten ebenen Signalen entstehen können. Dazu ist eine Lösung entwickelt worden, die in Farbbildern räumliche Signale erkennt und die Koordinaten der Targets für die Zuordnung und Bildorientierung bereitstellt. Im Beitrag wird das Vorgehen im Zusammenhang mit der Bildanalyse beschrieben und an Bildbeispielen dokumentiert.*

## 1. Motivation

In der Mehrzahl der industriellen oder terrestrischen Anwendungen in der Photogrammetrie werden die Objekte durch viele, im Verbund angeordnete Messbilder erfasst (vgl. Abb.1). Die Nutzung dieser Messbilder setzt deren Verschmelzung zu einem stabilen, in einem festgelegten Koordinatensystem definierten Verband voraus. Basisinformation für die Bestimmung der Orientierung sind die Bildkoordinaten von Verknüpfungspunkten und die damit verbundenen Bildstrahlen.

In digitalen Bildern erfolgt die Auffindung von Verknüpfungspunkten oft automatisch unter Verwendung unterschiedlicher Methoden der Bildverarbeitung. Diese Methoden benutzen im allgemeinen spezielle Modelle zur Erkennung der fast immer im Objektraum durch Signale (Targets) gekennzeichneten Verknüpfungspunkte. Dabei wird entweder direkt das Erscheinungsbild der Targets modelliert oder eine in den Signalen enthaltene geometrische Form. Die Leistungsfähigkeit der hierzu existierenden Algorithmen hat einen hohen Stand erreicht und man findet sie durchgängig in Anwendungen, die digitales Bildmaterial einsetzen.

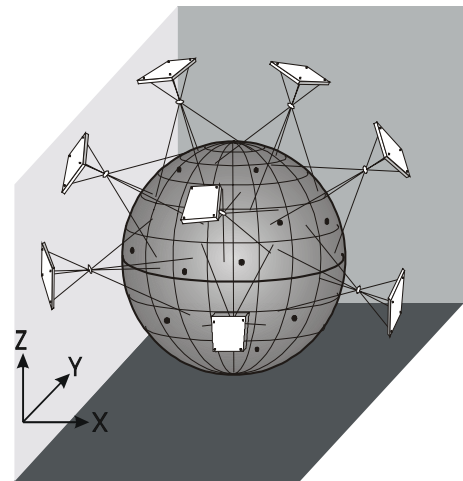


Abb. 1: Ein 3D-Objekt mit beliebig angeordneten Bildern

Die Verfahren unterliegen natürlich den Gesetzmäßigkeiten der Statistik und liefern immer dann gute Resultate, wenn die Daten gut mit dem benutzten Targetmodell übereinstimmen. Mit abnehmender Korrespondenz verschlechtern sich die Ergebnisse oder es kommt zum Versagen. Ursachen für fehlende Übereinstimmung sind beispielsweise starke Beeinträchtigungen der Bild-

<sup>1</sup> Prof. Dr.-Ing. Frank Boochs, Institut für Raumbezogene Informations- und Messtechnik, Fachhochschule Mainz, Holzstr. 36, 55116 Mainz, [boochs@geoinform.fh-mainz.de](mailto:boochs@geoinform.fh-mainz.de)

qualität oder Abweichungen von dem zugrunde gelegten Geometriemodell. Letzteres kann beispielsweise auf die Wirkung der Zentralprojektion zurückzuführen sein.

Mitverantwortlich für eventuell auftretende Probleme ist die Tatsache, dass die zur Anwendung kommenden Signale ebene Flächen darstellen. Die Geometrie der Abbildungen ist dabei von der gegenseitigen Ausrichtung von Aufnahme und Target abhängig und verändert sich mit jedem Bild. Falls die Targets aus stark verschiedenen Perspektiven aufgenommen wurden lassen sie sich ggf. nicht mehr identifizieren. Dies führt zur Verschlechterung der Verknüpfungssituation oder kann schlimmstenfalls eine Verknüpfung ganz verhindern.

Diese Schwierigkeit kann durch kubische Verknüpfungselemente umgangen werden. Kubische Targets bilden sich in alle Richtungen ausreichend gut ab und können eine Verknüpfung dann noch erlauben, wenn ebene versagen. Allerdings wachsen durch die kubische Form der Targets die Anforderungen an die Bildverarbeitung erheblich. Es muss nicht nur eine 3D-Geometrie im 2D modelliert werden, sondern auch topologische Betrachtungen sind anzustellen, um die Ausrichtung der Targets berücksichtigen zu können. Hierzu ist ein Lösungsansatz entwickelt worden, der im folgenden vorgestellt wird.

## 2. Konzeption

### 2.1. Generell

Kubische Verknüpfungselemente vermeiden die Probleme nicht ausreichend oder zu stark verzerrt abgebildeter Flächen, weil sie mehrere Flächen besitzen (vgl. Abb. 2). Darunter gibt es immer mindestens eine, die einem Messbild ausreichend gut zugewandt ist und eine Identifikation des Targets erlauben kann. Folglich ist aber auch davon auszugehen, dass je nach Bildanordnung verschiedene Flächen abgebildet werden, die in der Bildanalyse auch entsprechend als unterschiedliche Teile ein und desselben Objektes zu behandeln sind. Damit spielt für die Analyse die Beziehung der detektierten Bestandteile zum Targetobjekt selbst auch eine Rolle, weshalb eine stabile Lösung die komplette 3D-Geometrie des Targets betrachten und verarbeiten muss.

Für die Bildverarbeitung reicht daher nicht die Identifikation einer einzelnen Fläche sondern es muss das gesamte räumliche Objekt erkannt und in seiner räumlichen Beziehung zum Messbild entschlüsselt werden.

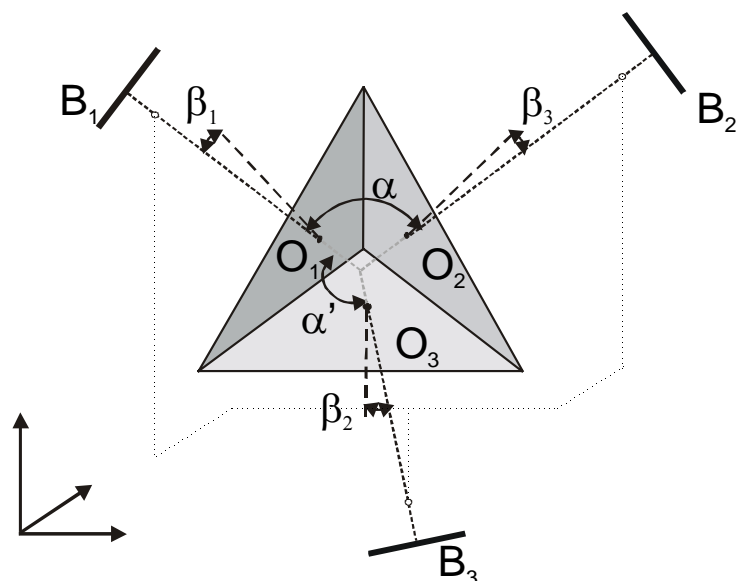


Abb. 2: Mögliche Sichtbeziehungen zu kubischen Targets

### 2.2. Vorgaben

Die Lösung baut auf einige Vorgaben, die im wesentlichen gewisse Vereinfachungen erlauben. Es handelt sich um Randbedingungen, die auch unter praktischen Bedingungen keine unvertret-

baren Einschränkungen zur Folge haben, sondern lediglich das Verfahren robuster machen und die Komplexität des Modelles in Grenzen halten.

Zu den verwendeten Vorgaben zählen:

- I. Einsatz von Farbbildmaterial
- II. Verwendung von einfachen und symmetrischen Targets
- III. Benutzung speziell angefertigter Targets
- IV. Einbeziehung der geometrischen Daten zu den Targets

(I) Die Benutzung von Farbe ist aus zwei Gründen nötig:

- es nimmt der Kontrast zu, mit dem sich Targets von ihrer Umgebung abheben, womit die Erkennungsleistung verbessert, bzw. erst möglich wird
- der Farbraum gibt ausreichend Spielraum zur optischen Gestaltung der verschiedenen Targetseiten. Hiermit wird für ausreichende Eindeutigkeit der einzelnen Targetfläche gesorgt, ohne die eine Berücksichtigung der Targettopologie nicht zu erreichen wäre.

(II) Die geometrische Einfachheit der Targets führt zu entsprechend simplen Bildstrukturen. Folglich sind die im Algorithmus zu beherrschenden Geometrien weniger komplex und vereinfachen die Bewertung der Strukturen bzw. steigern die Eindeutigkeit und Sicherheit im Erkennungsprozess.

(III) Mit der Anfertigung von Targets wird primär der Praxisbezug berücksichtigt. Untersuchungen zur Bildqualität und ihrer Abhängigkeit von äußeren Faktoren wie Zusammensetzung und Stärke der Beleuchtung uvm. haben gezeigt, dass mit starken Schwankungen im Erscheinungsbild von Objekten zu rechnen ist. Vorkehrungen zur Begrenzung der Schwankungen sind deshalb angebracht und ein Weg dahin führt über optimiert gestaltete und als bekannt eingeführte Targetobjekte.

(IV) Schließlich spielt auch das geometrische Wissen zum Aufbau der Targets eine wichtige Rolle. Daraus lassen sich Bedingungen formulieren, die sowohl im Zusammenhang mit der Bildanalyse, als auch im späteren Zuordnungsprozess nützlich sind.

## **3. Lösungsweg**

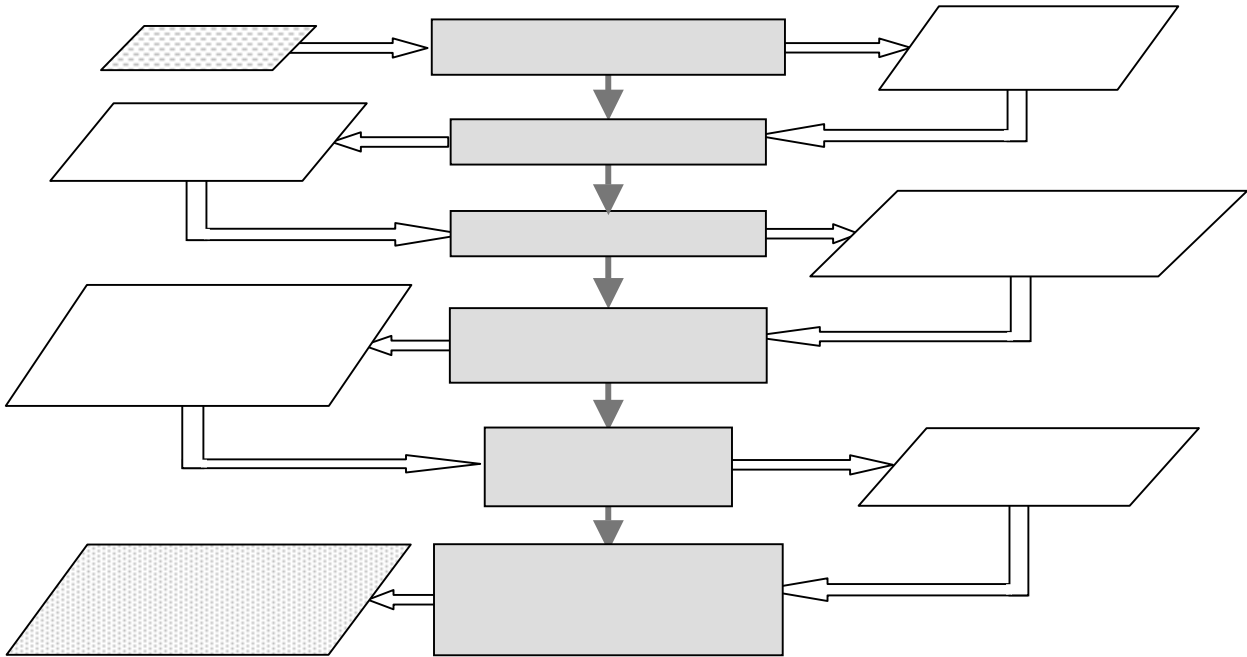
### **3.1. Allgemein**

Mit diesen Vorgaben folgt für den Algorithmus, dass er in Farbbildern anhand der Farbinformation potentielle Targetkandidaten lokalisieren und anschließend anhand der verschiedenen Randbedingungen die Übereinstimmung mit dem korrekten Erscheinungsbild eines Targets verifizieren muss. Durch den einfachen geometrischen Aufbau und die charakteristischen Übergänge zwischen benachbarten Farbflächen eines Targets, die sich im Bild als Farbkanten darstellen, empfiehlt sich das Konzept auf Kanten im Farbraum und ihre weitere Prozessierung zuzuschneiden. Dies hat zu dem gewählten Ablauf geführt (vgl. Abb. 3), dessen einzelne Arbeitsschritte im folgenden kurz umrissen und an Bildbeispielen dokumentiert werden.

### **3.2. Verfahrensschritte**

#### **3.2.1. Extraktion von Bildkanten**

Aufgabe des ersten Arbeitsschrittes ist die zuverlässige Extraktion von linienhaften Strukturen. Durch den geometrischen Aufbau der Targets müssen sich auch die zu den Würfeln gehörenden Kanten darunter befinden. Ziel dieser Maßnahme ist die Reduzierung des Bildinhaltes auf relevante geometrische Strukturen. Dabei ist Sorge zu tragen, dass möglichst nur auch solche erhalten bleiben, die mit Targets in Verbindung stehen könnten. Andererseits dürfen die Kriterien



nicht zu eng gefasst sein, damit nicht auch die Bestandteile der gesuchten Objekte aussortiert werden. Der Nachteil dieses Schrittes ist die starke Abhängigkeit vom Bildinhalt. Je nach Qualität der Aufnahme und dem gegebenen Hintergrund kann die Menge der aufgespurten Strukturen erheblich schwanken.

Der Extraktionsprozess umfasst eine Reihe von Rechenschritten, die insgesamt die verlangte Funktionalität sicherstellen. Dazu gehört u.a. auch die Beseitigung von störenden Rauschteilen (GARNICA ET. AL., 2000), womit der Einfluss störender und zu überflüssigen Kanten führenden Farbschwankungen reduziert wird. Grundlage für das hier angewandte Verfahren sind die Arbeiten von CANNY (1986). Es wurde auf die Verwendung von Farbdaten adaptiert und umfasst die Schritte Bildglättung, Berechnung der Farbgradienten, Unterdrückung der Hintergrundinformation, Ausdünnung des Kantenbildes und die Bildung von Umringslinien (vgl. Abb. 4).

### 3.2.2. Vektorisierung

Das Ziel dieser Operation muss die Erzeugung möglichst langer Vektoren sein, um die Kanten gut annähern zu können. Andererseits dürfen die Vektoren nicht zu stark vom Verlauf der Linienzüge abweichen und es darf auch nicht zu viel Linieninformation dabei verloren gehen. In der Literatur (BÄSSMANN, 1989; HENRICSSON, 1996) sind Lösungsvorschläge bekannt, die auch für die vorliegenden Aufgabenstellung in angepasster Form zum Einsatz gekommen sind.

### 3.2.3. Farbattributierung

Nach der Vektorisierung liegen die Voraussetzungen für die geometrischen Betrachtungen zu den im Bild gefundenen Kantenstücken vor. Es muss allerdings davon ausgegangen werden, dass trotz Einsatz von Farbbildern, die gefundenen Farbkanten nicht alleine den Targets zuzurechnen sind. In Abhängigkeit von der Struktur des Bildhintergrundes können ggf. auch sehr viele weitere

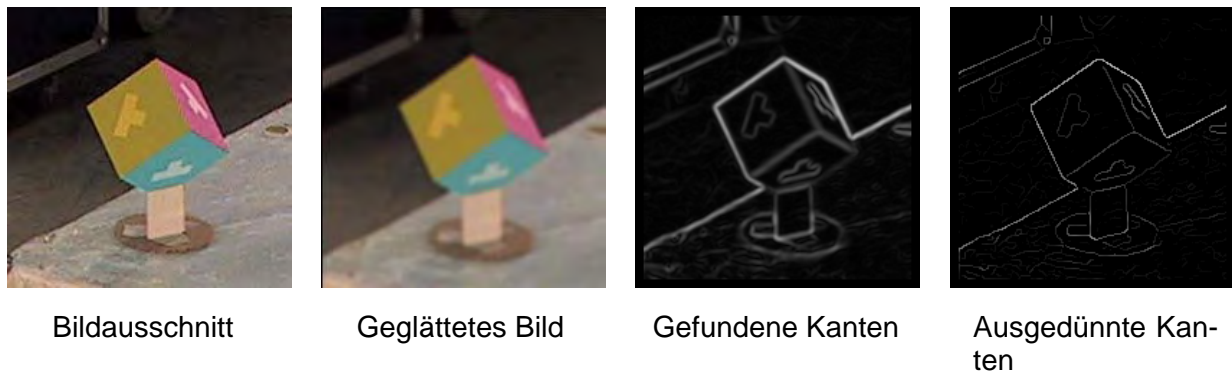


Abbildung 4: Wirkung der Kantenfilterung (Farbbabb. siehe CD des Tagungsbandes)

Farbkanten existieren, die allerdings für die weitere Verarbeitung unerwünscht und störend sind. Diese gilt es zu eliminieren. Zu diesem Zweck werden die Kanten einer Farb- und Homogenitätsbetrachtung unterzogen. Diese greift auf die unmittelbar an die Kante angrenzende Nachbarschaft zu und prüft in dieser, ob dort Farbflächen vorliegen, die mit den potentiellen Farbwerten einer Würfelfläche übereinstimmen und homogen sind. Nur passende Kanten überleben diesen Verarbeitungsschritt und erhalten die dabei gefundenen Farbmerkmale als Attribute zugewiesen (vgl. Abb. 5).

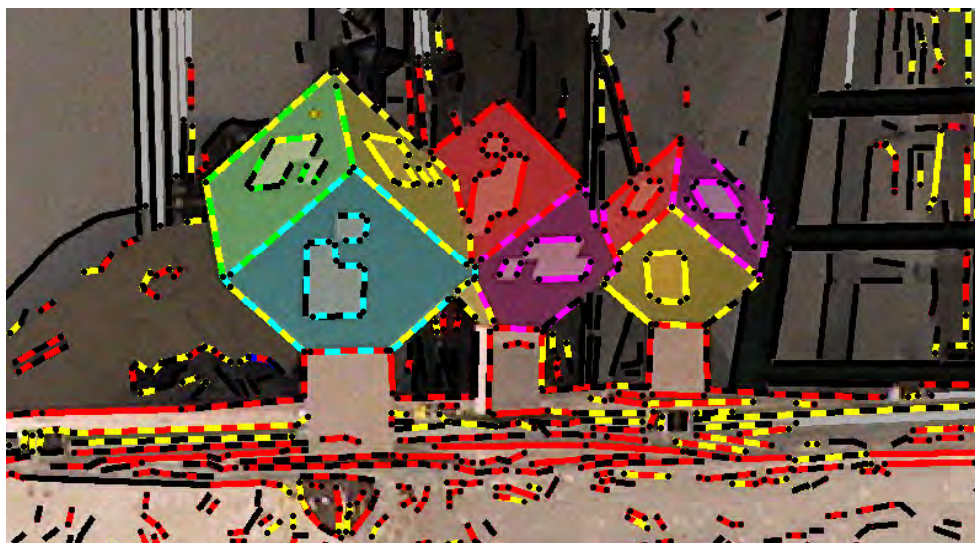


Abbildung 5: Kanten mit Farbattributen (Farbbabb. siehe CD des Tagungsbandes)

### 3.2.4. Selektion von Targetkandidaten

Die bisherigen Maßnahmen erreichen eine Reduktion des Inhaltes auf farbbehafte Kantenbestandteile unter denen sich auch die zu den Targets zählenden befinden. Allerdings sind immer noch einige andere, unerwünschte Inhalte vorhanden, die in den farblich zulässigen Wertebereich fallen.

Die nicht vollständige Isolierung der gewünschten Farbkanten liegt auch in der Beschreibung von Farbe als solches begründet. Subjektiv betrachtet erscheint beispielsweise der Hintergrund in Abb. 5 als eher farblos. In der Repräsentation als Farbwert sind die vom menschlichen Betrachter als bräunlich eingestuften Flächen aber teilweise gelb und teilweise als rot klassifiziert. Beides zwar mit geringer Sättigung, aber mit zutreffender Farbe. Deshalb sind die Möglichkeiten der rein auf die Farbe bezogenen Analyse nur noch mit einigen weiteren, umfangreichen Maßnahmen zu verbessern.



Abbildung 6: zentrale Würfelpunkte (Farbabb. siehe CD des Tagungsbandes)

An dieser Stelle empfiehlt sich, die Geometrie der Objekte ins Spiel zu bringen. Diese erlaubt einige Bedingungen zu formulieren, denen die gefundenen Kanten genügen müssen. Im wesentlichen sind in den Bedingungen die Aussagen zur Parallelität, zur Rechtwinkligkeit und zu den Längenbeziehungen von Würfelpunkten enthalten.

Der Einstieg in die geometrisch ausgelegte Analyse erfolgt mit der Suche nach einer charakteristischen Würfecke. Es wird jene Ecke gesucht, die im inneren eines Würfelbildes liegt und von der nur Farbkanten abgehen, die auf beiden Seiten von Würfelflächen benachbart sind. Von dort gehen sternförmig drei farbigen Kanten ab, weshalb dieser Ankerpunkt als Farbstern bezeichnet werden soll. In Abbildung 6 ist das Selektionsergebnis für den auch in Abb. 5 gezeigten Bildausschnitt wiedergegeben. Man erkennt eine sehr weitgehende Reduktion auf die interessierenden Kanten. Allerdings sind, wie für den mittleren Würfel zu sehen ist, diese Ecken auch noch nicht zwangsläufig alle korrekt. Weitere Maßnahmen müssen deshalb folgen.

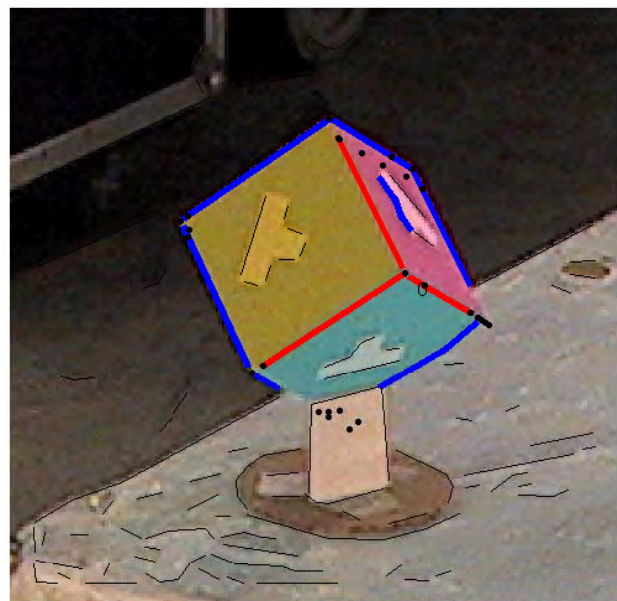


Abbildung 7: Elemente einer Targethypothese (Farbabb. siehe CD des Tagungsbandes)

### 3.2.5. Bildung von Targethypthesen



Im nächsten Analyseschritt werden weitere Informationen für die Prüfung der Targetobjekte gesammelt. Die dazu nötigen Elemente stammen wiederum aus dem geometrischen Aufbau von Würfeln. Speziell wird hier auf die Existenz weiterer, zu den Kanten des Farbsterns parallele Linien zurückgegriffen, die sich dann auch paarweise schneiden müssen und in diesen Schnitten die verbleibenden Eckpunkte eines Targets bilden. Im Hinblick auf die unter praktischen Bedingungen zu erwartende Unvollständigkeit von abgebildeten Targets muss diese Maßnahme allerdings auch verdeckte Ecken und nur teilweise erkannte Linien berücksichtigen können.

Das Ergebnis einer solchen Suche ist in Abbildung 7 zu sehen. Die selektierten Parallelen sind blau gekennzeichnet und die eingetragenen schwarzen Punkte bezeichnen die Kandidaten für die Würfecken.

### 3.2.6. Verifikation der Targethypothesen

Schließlich werden die verschiedenen Targethypothesen geprüft. Eine einzelne Hypothese stammt aus der Berechnung der Würfelgeometrie für einen Satz von Eckpunkten. Es werden alle denkbaren Kombinationen durchgerechnet und nach der Plausibilität bewertet. Letztere bezieht farbmetrische und geometrische Aussagen ein. Damit wird das Objekt mit dem Würfel ähnlichstem Aufbau gesucht, dessen Bestandteile das nötige Aussehen besitzen. Die Bewertung führt zu einer Prioritätenliste, an deren oberster Stelle die plausibelste Hypothese und damit das zu wählende Targetobjekt steht.

Diese Hypothese wird einer geometrischen Verfeinerung unterzogen mit der die Würfelkanten verbessert werden. Diese liegen bisher nur als Ergebnis der Kantenfindung und der Vektorisierung vor. Damit wird aber keine Rücksicht auf den streng geradlinigen Verlauf einer Kante genommen. Es ist deshalb die Geometrie aller Kanten durch individuelle Ausgleichungen zu verbessern, mit deren Hilfe jeweils eine bestangepasste Gerade in jeden Kantenbereich gelegt wird. Aus den so bestimmten Kanten werden die Eckpunkte durch Schnitt gerechnet.

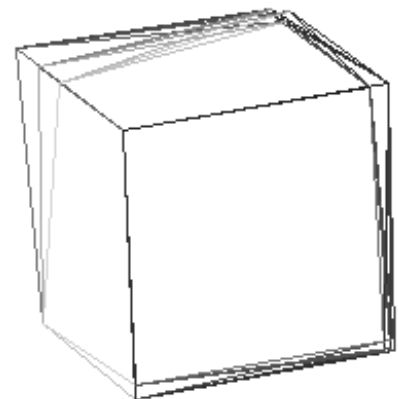


Abbildung 8: Potentielle Würfecken und korrespondierende Targethypothesen (Farbabb. siehe CD des Tagungsbandes)

### 3.2.7. Codeerkennung, Koordinatenbestimmung

Als letzte Maßnahme werden die noch fehlenden Informationen ermittelt. Dazu zählt beispielsweise die Würfelkennung, die als Markierung auf allen Seiten aufgebracht sein kann (vgl. Abb. 8 links).

Ein weiterer Schritt besteht in der Ermittlung der Koordinaten jenes Eckpunktes, der vom Bild abgewandt liegt und daher nicht abgebildet ist. Seine Position lässt sich aus den sichtbaren Ecken und Kanten ableiten.

An dieser Stelle sind die Berechnungen für ein einzelnes Targetobjekt abgeschlossen. Es liegt nun mit seinen acht Eckpunkten und seiner evtl. vorhandenen TargetID vor.

### **3.3. Weiterverarbeitung**

Das Ergebnis der Bildanalyse ist ein Datensatz in dem für jedes Bild des zu orientierenden Verbandes die gefundenen Targets mit den Koordinaten von all ihren Ecken und den ggf. vorhandenen Codes enthalten sind. Innerhalb des kompletten Orientierungsverfahrens (BOOCHS, 2001) verbleiben allerdings noch zwei weitere Schritte, bis zur Bestimmung der gesuchten Orientierungsdaten.

Zum einen bedarf es eines Zuordnungsprozesses, der die Korrespondenz der Targets bzw. ihrer Eckpunkte in den diversen Bildern klärt und zum anderen ist eine Bildtriangulation anzuschließen. Letzteres ist ein Schritt, der auf erprobte und leistungsfähige Programme zurückgreifen kann. Derzeit ist eine Schnittstelle zum Orientierungspaket CAP integriert (HINSKEN ET. AL., 1992).

Der Zuordnungsprozess besteht aus einem fortschreitenden Gruppierungsverfahren, das mit der Vereinigung aller Targets zu einer einzigen Gruppe endet. Das Gruppierungsverfahren selbst besitzt verschiedene Werkzeuge, um die Beziehung zwischen Bildern und den darin enthaltenen Punkten zu ermitteln. Im Unterschied zu den bekannten Zuordnungsverfahren profitiert das hier entwickelte Vorgehen zusätzlich von der räumlichen Ausdehnung der Targets und von dem bekannten geometrischen Aufbau. Diese Informationen erlauben durchgreifende Plausibilitätstests, die den Ablauf der Zuordnung sehr robust und damit auch den Ablauf effizient machen.

## **4. Fazit**

Die hier vorgestellte Lösung zeigt, wie kubische Verknüpfungsobjekte in Bildern erfolgreich detektiert und für die Orientierung terrestrischer Bildverbände eingesetzt werden können. Der Aufsatz präsentiert den bildanalytischen Teil eines Verfahrens, das als Gesamtlösung auch die Bildzuordnung und Orientierung übernimmt (I3MAINZ, 2001). Das Verfahren soll nach weiteren Praxistests ab dem Jahr 2002 auch als kommerziell verfügbare Lösung zur Verfügung gestellt werden können.

## **5. Literaturverzeichnis**

BÄSSMANN H., BESSLICH PH., 1989: Kontur orientierte Verfahren in der Digitalen Bildverarbeitung - Springer-Verlag.

BOOCHS F., 2001: A new solution for the automatic orientation of arbitrary arranged images - Optical 3D-Measurement Techniques, Vol. 5.

CANNY J.F., 1986: A computational approach to edge detection - IEEE, Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 8, No.6.

GARNICA C., BOOCHS F., TWARDOCHLIB M, 2000: A new approach to edge-preserving smoothing for edge extraction and image segmentation - IAPRS, Vol. 33, No.3.

HENRICSSON, O., 1996: Analysis of Image Structures using Color Attributes and Similarity Relations - Institut für Geodäsie und Photogrammetrie an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich, Mitteilungen Nr. 59.

HINSKEN, L., COGAN, L., KOTOWSKI, R., 1992: A new MS-DOS based integrated software package for triangulation and data collection for close range applications - IAPRS, Vol. 29, No. 5.

I3MAINZ, 2001: <http://www.i3mainz.fh-mainz.de/projekte/3dtarget.html>

## **6. Danksagung**

Die präsentierten Entwicklungen waren Gegenstand eines Forschungsprojektes der Stiftung Rheinland-Pfalz für Innovation unter der Vertragsnummer 8312-38 6261/319. Der Autor bedankt sich bei der Stiftung für die umfangreiche Finanzierung, ohne die diese Arbeiten nicht möglich gewesen wären.

# Über projektiv-geometrische Grundlagen der Stereophotogrammetrie

GERHARD BRANDSTÄTTER<sup>1)</sup>

## 0. Einleitung

Seit etwa 15 – 20 Jahren hat die EDV-Sparte „Computer Vision“ (kurz CV) die digitale Stereobildverarbeitung als Thema entdeckt. Die Experten dieses Faches sind klarerweise mathematisch wesentlich besser ausgebildet als Ingenieure des Vermessungswesens und gehen das Thema aus der Sicht der projektiven Geometrie an. Diese ist aber wohl auch Grundlage der Stereophotogrammetrie und kann sich da, wie die CV, auf Wissenschaftler wie Sebastian Finsterwalder, Erich Kruppa, Josef Krames und Walter Wunderlich, die Vertreter der Münchner und Wiener Schule der Geometrie, berufen.

Bei Durchsicht der schier zahllosen Publikationen ergeben sich zwei zentrale Themenkomplexe. Da ist einmal die Kalibrierung<sup>2)</sup> der Kameras und die Herstellung der „Epipolarkorrespondenz“, in photogrammetrischen Begriffen die relative Orientierung. Weiters tauchen auch Fragen der Rekonstruktion auf (z.B. räumlicher Vorwärtsschnitt). Insgesamt also Probleme, die dem Photogrammeter höchst vertraut sind und bei diesem i.a. ein gewisses Erstaunen über das Aufsehen um bekannte Dinge hervorrufen. Es sei nicht abgestritten, dass die digitale Behandlung dieser Operationen spezieller Vorgangsweisen bedarf, aber das bezieht sich vorwiegend auf die Formulierung und Implementierung sachgerechter, möglichst schneller inkrementaler Algorithmen für on-line-Operationen (Robotik oder „mobile mapping“).

In Kreisen der CV-Experten scheint die Meinung zu bestehen, daß Photogrammeter von Projektiver Geometrie nichts verstünden [FÖRSTNER 2001], obwohl in vielen projektivgeometrischen Publikationen deutliche Bezüge zur photogrammetrischen Literatur zu finden sind, also sachlich eigentlich kein Grund dafür vorliegt. Viel eher dürfte die Ursache darin zu suchen sein, dass sehr vieles auf diesem Gebiet in deutscher Sprache publiziert wurde, somit im dominierenden englischsprachigen Raum wenig bekannt ist, und dass die Fachausdrücke doch sehr verschieden sind („Epipolarkorrespondenz“ versus „Relative Orientierung“!).

Die photogrammetrischen Fachausdrücke begründen sich aus den Erfordernissen der Analogzeit und wurden von dort in die analytische bzw. nunmehr digitale Phase übernommen, während die CV ihre eigenen Bezeichnungen entwickelte. Aber dies kann und darf natürlich nicht heißen, dass unser Sprachgebrauch demgegenüber als geringerwertig anzusehen ist.

## 1. Definitionen

Es wird notwendig sein, zwischen orthonormierten (cartesischen) und affinen Koordinaten zu unterscheiden. Die letztgenannten werden sich auf sogenannte objektgebundene Grundpunkte beziehen, für welche der Begriff *Möbius*-Koordinaten – genauer eigentlich „baryzentrische Möbius-Koordinaten“ (GRAFAREND&SHAN 1999) – verwendet wird. Vektoren und Matrizen

---

<sup>1)</sup> o.Univ.Prof. Dr. Gerhard Brandstätter, Institut für Angewandte Geodäsie, Abteilung für Photogrammetrie und Fernerkundung, Technische Universität Graz, Steyergasse 30 A-8010 Graz, e-mail: [gerhard.brandstaetter@Tugraz.at](mailto:gerhard.brandstaetter@Tugraz.at)

<sup>2)</sup> Die Kalibrierung wurde in der Photogrammetrie nicht ganz korrekt als „innere Orientierung“ der Kamera bezeichnet. Dieser Terminus bezieht sich nun richtigerweise auf die Herstellung der Beziehung zwischen Bildkoordinaten und Koordinaten des analytischen oder digitalen Auswertesystems.

seien homogen (KLEIN 1909!), wenn sie nicht mit einem Querstrich versehen sind (z.B.  $\mathbf{x}$  homogen,  $\bar{\mathbf{x}}$  inhomogen)

Verwendete Symbole

$\mathbf{x}^T = (x \ y \ -c)$  ..... ideale (analytische) Bündelkoordinaten  
 $\tilde{\mathbf{x}}^T = (\tilde{x} \ \tilde{y} \ 1)$  ..... reale (homogene) Bündelkoordinaten  
 $\mathbf{h}^T = (h_0 \ h_1 \ h_2)$  ..... Koeffizientenvektor der Geradengleichung  $\mathbf{h}^T \mathbf{x} = 0$   
 $\mathbf{X}^T = (X \ Y \ Z \ 1) = (\bar{\mathbf{X}}^T : 1)$  .. homogene Koordinaten des Objektraumes  
 $\mathbf{R}$  ..... Rotationsmatrix,  $\mathbf{R}^T \mathbf{R} = \mathbf{I}$  (Einheitsmatrix)

$\mathbf{B} = \begin{pmatrix} 0 & -b_3 & b_2 \\ b_3 & 0 & -b_1 \\ -b_2 & b_1 & 0 \end{pmatrix}$  ..... schiefsymmetrischer „Basistensor“

$\mathbf{K} = \begin{pmatrix} 1 & \beta & -\tilde{x}_c \\ 0 & \alpha & -\tilde{y}_c \\ 0 & 0 & -c \end{pmatrix}$  ..... affine Kalibriermatrix

$\mathbf{M} = \{m_{jk}\}$ ,  $j = 1, 2, 3, k = 1, 2, 3, 4$  ..... singuläre projektive Transformationsmatrix  $3D \rightarrow 2D$

## 2. Die „Epipolarkorrespondenz“ als relative Orientierung

### 2.1 Die Komplanaritätsmatrix für ideale Bündelkoordinaten

Bezieht man sich auf *zentrierte* cartesische Bündelkoordinaten im Sinne der Gauß'schen Linsengleichung<sup>3</sup>) dann lautet die Komplanaritätsbedingung (weiterhin kurz KB) für die Stereorekonstruktion

$$\mathbf{x}'^T \mathbf{C} \mathbf{x}'' = 0 \quad \text{mit} \quad \mathbf{C} = \mathbf{R}'^T \mathbf{B} \mathbf{R}''.$$

Das ist die Grundgleichung der relativen Orientierung für die *kalibrierten* Messkammern der Aerophotogrammetrie und der (nicht mehr produzierten) terrestrischen Mess-Kameras. In diesem Fall enthält  $\mathbf{C}$  sieben Parameter, über die zweckgemäß disponiert werden kann (Bildrotation oder -anschluss), da bekanntlich nur *fünf* derselben für die Lösung der Aufgabe notwendig sind. Dies gilt allgemein auch für nichtkalibrierte Kameras *ohne* Einbeziehung der *Kalibrierung*.

Diese Komplanaritätsmatrix  $\mathbf{C}$  hat einige nette Eigenschaften:

- A)  $\det(\mathbf{C}) = 0$  und  $\text{rg}(\mathbf{C}) = 2$  weil  $\det(\mathbf{B}) = 0$  und  $\text{rg}(\mathbf{B}) = 2$
- B) Aus den linearen Gleichungen  $\mathbf{x}'^T \mathbf{C} = \mathbf{0}$  bzw.  $\mathbf{C} \mathbf{x}'' = \mathbf{0}$  folgen die Koordinaten der Kernpunkte (Epipole) (VON SANDEN 1908, THOMPSON 1968). Die Lösungen sind konsistent wegen Eigenschaft A.
- C) Die Beziehungen  $\mathbf{x}'^T \mathbf{C} = \mathbf{h}''$  und  $\mathbf{C} \mathbf{x}'' = \mathbf{h}'$  stellen duale Transformationen Punkt  $\mathbf{x}' \rightarrow$  Kernstrahl  $\mathbf{h}''$ <sup>4</sup>) bzw.  $\mathbf{x}'' \rightarrow \mathbf{h}'$  dar, das sind die geometrischen Örter  $\mathbf{h}^T \mathbf{x} = 0$  homologer Punkte.

<sup>3</sup>) Entspricht einer regulären projektiven 3D-Transformation

<sup>4</sup>) Kernstrahl = Epipolargerade

Da die fünf notwendigen Parameter höchst nichtlinear in  $\mathbf{C}$  enthalten sind, sucht man Näherungswerte, die aus einer „Linearisierung durch Überbestimmung“ folgen. Dafür sollte *eine* zusätzliche Gleichung genügen (KILLIAN&MEISSL 1977), aber der entsprechende Lösungsweg (HOF-MANN-WELLENHOF 1979) ist immer noch recht aufwendig. Daher hat sich die sogenannte 8-Punkte-Methode eingebürgert (RINNER 1963), die vorerst die acht Komponenten von  $\mathbf{C}$  ergibt, aus welchen Näherungswerte für die fünf Parameter der relativen Orientierung berechnet werden können (RINNER 1963, BRANDSTÄTTER 1991a,1991b). Die endgültigen (konsistenten) Werte sind aus einer iterativen Nachbehandlung (Ausgleichung) mit Hilfe der bekannten Linearformen der analytischen Photogrammetrie für die relative Orientierung zu schätzen und erfüllen dann die hier vorausgesetzte Orthonormierung. Die separate Berücksichtigung der o.a. Eigenschaft A ist nicht notwendig, da sie durch die Nachbehandlung implizit erfüllt ist.

## 2.2 Die Komplanaritätsmatrix für reale Bildkoordinaten

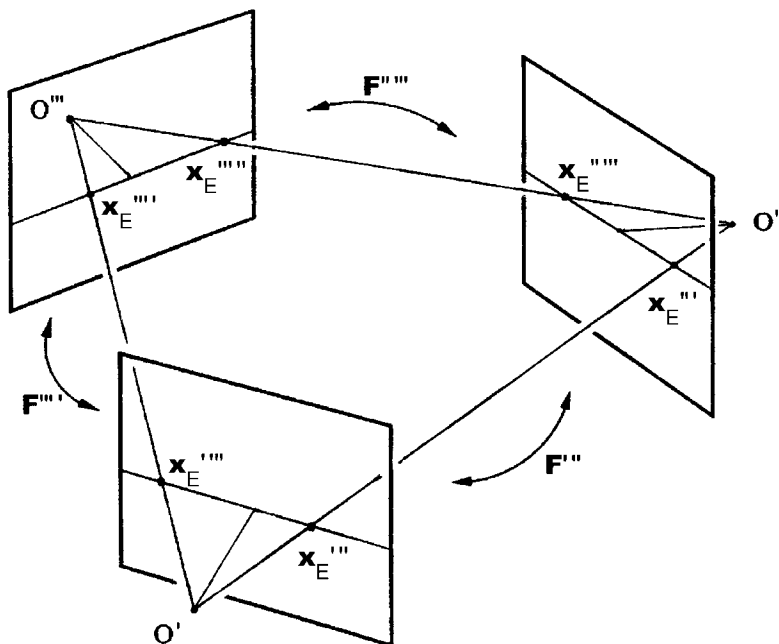
Reale Bildkoordinaten  $\tilde{\mathbf{x}}$  weichen durch Dezentrierung ( $\tilde{x}_c, \tilde{y}_c$ ), unbekannte Bildweite und Affindeformation von den idealen Bündelkoordinaten  $\mathbf{x}$  ab. Der Zusammenhang kann anhand der homogenen (relativen) affinen Kalibriermatrix mit

$$\mathbf{x} = \mathbf{K}\tilde{\mathbf{x}}$$

beschrieben werden. Damit lautet die KB, wenn die beiden Bilder aus verschiedenen Kameras stammen

$$\tilde{\mathbf{x}}'^T \mathbf{K}'^T \mathbf{C} \mathbf{K}'' \tilde{\mathbf{x}}'' = \tilde{\mathbf{x}}'^T \mathbf{F} \tilde{\mathbf{x}}'' = 0.$$

$\mathbf{C}$  wird in der CV als *Essentialmatrix* bezeichnet, während  $\mathbf{F}$  *Fundamentalmatrix* heißt. Sie ist die KM für dezentrierte und affin deformierte Bündelkoordinaten. Mit anderen Worten: wenn man mit diesen Koordinaten nach dem 8-Punkte-Verfahren schematisch  $\mathbf{F}$  berechnet, dann



enthält diese KM auch die Kalibrierdaten. Die Eigenschaften A, B, und C gehen aber nicht verloren. Kernpunkte und Kernstrahlen erhält man dann eben in diesen Koordinaten. Werden aber die Kalibrierdaten gesucht, dann enthält  $\mathbf{F}$  für ein Stereopaar zu viele Unbekannte (zehn wenn  $\mathbf{K}' = \mathbf{K}'' = \mathbf{K}$ ), welche aus diesen allein nicht bestimmbar sind. So gelangt man zwangsläufig zur Drei-Kamera-Anordnung („trifocale“ Messdisposition), bei welcher die Projektionszentren *und* die Kernpunkte als Bilder derselben in einer gemeinsamen Ebene liegen müssen

Fig. 2.2: Trifokale Komplanarität nach I. NIINI (2000), p.33

(Fig. 2.2). Diese „erweiterte“ KB lautet

$$\tilde{\mathbf{x}}_E'^T \mathbf{F}'' \tilde{\mathbf{x}}_E'' = 0, \quad \tilde{\mathbf{x}}_E''^T \mathbf{F}''' \tilde{\mathbf{x}}_E''' = 0, \quad \tilde{\mathbf{x}}_E'''^T \mathbf{F}'''' \tilde{\mathbf{x}}_E'''' = 0$$

(NIINI 2000), da sich das jeweils dritte Projektionszentrum in die Kernpunkte der mit ihm gebildeten Stereokombinationen abbildet.

I.a. werden die Kalibrierelemente  $\tilde{x}_c, \tilde{y}_c, (1-\alpha),$  und  $\beta$  nahezu klein von erster Ordnung sein und für  $c$  wird ebenfalls eine Näherung ( $c$ ) bekannt sein. Man kann daher vorerst für jedes Bildpaar  $(\mathbf{F}) = \mathbf{C}$  setzen, daraus Näherungswerte  $(\mathbf{B})$  und  $(\mathbf{R})$  für die relative Orientierung (Bildanschluss mit  $\mathbf{R}' = \mathbf{I}, \mathbf{R}'' = \mathbf{R}$ ) berechnen und damit die KB's gemäss

$$\tilde{\mathbf{x}}'^T \mathbf{K}^T \{(\mathbf{B}) + d\mathbf{B}\} d\mathbf{R}(\mathbf{R}) \mathbf{K} \tilde{\mathbf{x}}'' = 0$$

linearisieren, womit schon aus zwei der drei Bildpaare genügend viele Gleichungen vorhanden wären. Für alle drei Bildpaare ist dann zu beachten, dass Basisvektoren und Orientierungen widerspruchsfrei ineinander übergehen müssen, d.h.

$$\mathbf{b}' + \mathbf{b}'' + \mathbf{b}''' = \mathbf{0} \quad \text{und} \quad \mathbf{R}' \mathbf{R}'' \mathbf{R}''' = \mathbf{I}.$$

Das wäre die pragmatische iterative Lösung des Problems. Ein strenger Lösungsweg (HARTLEY&ZISSERMAN 2001, NIINI 2000) führt zu den „KRUPPA-Gleichungen“, benannt nach dem schon erwähnten Wiener Geometrie-Ordinarius<sup>5</sup>), publiziert in (KRUPPA 1912).

Das trifocale Konzept veranlasste I. NIINI (2000), die Situation im Sinne einer Triangulation zu behandeln, um aus  $n$  Projektionszentren ein Netz von  $n-2$  optimalen Dreiecken für die Rekonstruktion zu bilden.

### 2.3 Komplanarität in Möbius-Koordinaten

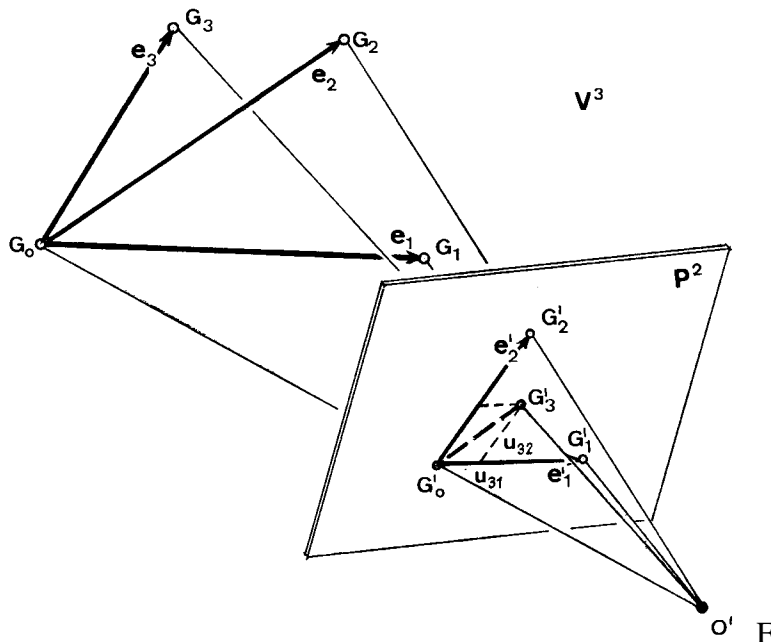


Fig. 2.3: System der (affinen) Möbius-Koordinaten im Objekt und in der Bildebene.

Im Objekt sind die Möbius-Koordinaten durch vier beliebige (deutlich erkennbare) nichtkomplanare sogenannte *Grundpunkte*  $G_i$  definiert, die ein affines Dreibein aufspannen (Fig. 2.3). Bildet sich dieses in die beiden Bilder ab, dann entstehen dort aus drei Grundpunkten des Dreibeins ebene affine Koordinatenachsen sowie ein allgemeiner Bildpunkt  $G'_3$  für  $G_3$ . Die homogenisierende Komponente in den Ortsvektoren  $\mathbf{u}^T = (1 \ u_1 \ u_2)$  steht dann aufgrund der geometrischen Herleitung (BRANDSTÄTTER 2000) an der ersten Position, die bei-

<sup>5</sup>) Erwin KRUPPA, \*1885, †1967, ab 1928 o. Prof. für Darstellende Geometrie an der TH Wien.

den inhomogenen Komponenten sind mit  $u_1$  ( $\approx x$  cartesisch) und  $u_2$  ( $\approx y$  cartesisch) bezeichnet und ergeben sich aus den realen Bildkoordinaten anhand der Affintransformation  $\mathbf{u} = \mathbf{A} \tilde{\mathbf{x}}$ . Ihr Zusammenhang mit den idealen Bündelkoordinaten lautet daher  $\mathbf{u} = \mathbf{A}\mathbf{K}^{-1}\mathbf{x}$ . Die KB nimmt dann die Form

$$\mathbf{u}'^T \mathbf{Z} \mathbf{u}'' = \begin{pmatrix} 1 & u'_1 & u'_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} z_{00} & z_{01} & z_{02} \\ z_{10} & z_{11} & z_{12} \\ z_{20} & 1 & z_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ u''_1 \\ u''_2 \end{pmatrix} = 0 \quad (2.3.1)$$

an, worin die Komponenten durch die voraussehbar größte derselben (d.i.  $c_{21}$ ) dividiert wurden. Sind die drei Grundpunktbilder Punkte des 8-Punkte-Verfahrens, dann sind die affinen Koordinatenachsen in den beiden Bildern zueinander homolog und ihre Koordinaten lauten dort

$$G_0 : \mathbf{u}_0^T = (1 \ 0 \ 0), \quad G_1 : \mathbf{u}_1^T = (1 \ 1 \ 0), \quad G_2 : \mathbf{u}_2^T = (1 \ 0 \ 1).$$

Drei der aus (2.3.1) folgenden Gleichungen für die Komponenten von  $\mathbf{Z}$  werden dadurch zu

$$z_{00} = 0, \quad z_{00} + z_{01} + z_{11} = 0, \quad z_{00} + z_{01} + z_{20} + z_{22} = 0$$

und zeigen, daß  $z_{01} = -z_{10} - z_{11}$  und  $z_{02} = -z_{20} - z_{22}$  sein muß. Somit lautet die KM

$$\mathbf{Z} = \begin{pmatrix} 0 & -z_{10} - z_{11} & -z_{20} - z_{22} \\ z_{10} & z_{11} & z_{12} \\ z_{20} & 1 & z_{22} \end{pmatrix}$$

und ist nur aus *fünf* unabhängigen Parametern zusammengesetzt. Als Nebenprodukt ein mühe- loser Beweis für den bekannten Satz der projektiven Geometrie, da von den *acht* Punkten drei für die Festlegung der homologen Koordinatensysteme verwendet werden.

Aus  $\mathbf{u}_E'^T \mathbf{Z} = \mathbf{0}$  und  $\mathbf{Z} \mathbf{u}_E'' = \mathbf{0}$  folgen die Kernpunkte und mit ihrer Hilfe sowie den vier Grund- punkten die relative Orientierung. Diese allerdings nur wie für unabhängige Bildpaare, weshalb z.B. eine trifocale Verknüpfung (Bildanschluss) noch nicht durchführbar ist. Leider wurde ein entsprechend weiterführender Projektsantrag (BRANDSTÄTTER 2000) beim öster- reichischen „Fonds zur Förderung wissenschaftlicher Forschung“ seitens der Gutachter mit etwas fadenscheinigen Argumenten torpediert, so dass diesbezüglich noch keine Aussagen gemacht werden können.

### 3. Rekonstruktion

#### 3.1 Projektive Abbildung

Die berühmte „Direkte Lineare Transformation“ (DLT) ist nichts anderes als eine singuläre projektive Transformation und sollte daher eigentlich „SPT“ heißen. Sie beschreibt den pro- jektiven Abbildungsvorgang  $3D \rightarrow 2D$  für den Idealfall mit

$$\mu \mathbf{x} = \mathbf{M} \mathbf{X} = (\mathbf{R} : -\bar{\mathbf{X}}_0) \mathbf{X}, \quad (3.1.1)$$

worin  $\bar{\mathbf{X}}_0$  der (inhomogene) Ortsvektor des Projektionszentrums ist. Berechnet man im Sinne der DLT die 11 signifikanten Komponenten aus  $5\frac{1}{2}$  Passpunkten, dann stellt (3.1.1) eine Linea-



risierung des räumlichen Rückwärtsschnittes (6 Unbekannte) durch starke Überbestimmung dar. Die Auflösung des homogenen Gleichungssystems  $\mathbf{M}\mathbf{X}_0 = \mathbf{0}$  liefert  $\bar{\mathbf{X}}_0$ , Komponentenvergleich die Orientierungsmatrix. Die Ergebnisse sind durch Nachiteration konsistent zu stellen.

Substitution von  $\mathbf{x}$  mit  $\mathbf{K}\tilde{\mathbf{x}}$  oder mit  $\mathbf{K}\mathbf{A}^{-1}\mathbf{u}$  liefert die Zusammenhänge zwischen Objektkoordinaten und realen bzw. Möbius-Koordinaten im Bild mit

$$\mu\tilde{\mathbf{x}} = \mathbf{K}^{-1}\mathbf{M}\mathbf{X} = \tilde{\mathbf{M}}\mathbf{X} \quad \text{bzw.} \quad \mu\mathbf{u} = \mathbf{A}\mathbf{K}^{-1}\mathbf{M}\mathbf{X}.$$

Für eine SPT-Matrix  $\tilde{\mathbf{M}}$  stimmt die Bilanz (6 + 5 = 11) hinsichtlich direkter Bestimmung aus Passpunkten,  $\mathbf{M}$  und  $\mathbf{K}$  könnten aber nur iterativ herausgeschält werden.



Fig. 3.1: Sturm Graz gegen Parma. Das unglückliche 2. Tor; nur ganz knapp drinnen!

Eine amüsante Anwendung der SPT(=DLT) auf ein Videobild zeigt Fig.3.1. Dabei ging es um die Frage, ob der Ball zum Zeitpunkt der Arretierung die Torlinie voll überschritten hatte. Eine solche 3D-Aussage ist natürlich aus einem Flachbild ohne zusätzliche Information nicht möglich. Als zweite, sozusagen *funktionale* Information, musste daher die durch das Flutlicht gegebene vertikale Schattenebene durch den Ball erhalten. Diese mit der Richtung zum Ballzentrum geschnitten ergab seine Raumposition und a posteriori die Diagnose, dass knapp aber doch auf Tor für Parma zu entscheiden war (BRANDSTÄTTER 2001).

### 3.2 Zur Stereo-Rekonstruktion

Aus zwei SPT's können in den Bildern homolog ausgemessene Objektpunkte rekonstruiert werden. Diese liefern (z.B. für reale Koordinaten  $\tilde{\mathbf{x}}$ ) jeweils zwei lineare Gln. der Form

$$\begin{aligned} (\tilde{\mathbf{m}}_1'^T - \tilde{\mathbf{x}}'\tilde{\mathbf{m}}_3'^T)\mathbf{X} &= 0 & (\tilde{\mathbf{m}}_2'^T - \tilde{\mathbf{y}}'\tilde{\mathbf{m}}_3'^T)\mathbf{X} &= 0 \\ (\tilde{\mathbf{m}}_1''^T - \tilde{\mathbf{x}}''\tilde{\mathbf{m}}_3''^T)\mathbf{X} &= 0 & (\tilde{\mathbf{m}}_2''^T - \tilde{\mathbf{y}}''\tilde{\mathbf{m}}_3''^T)\mathbf{X} &= 0, \end{aligned} \quad (3.2.1)$$

worin die  $\tilde{\mathbf{m}}_i^T$  die Zeilenvektoren von  $\tilde{\mathbf{M}}$  repräsentieren. Sie führen nur dann zu konsistenten Ergebnissen für die drei Unbekannten X, Y, Z, wenn die beiden Bildstrahlen die KB genau erfüllen. Fehler in der Modellierung der optischen Verzeichnung oder auch der atmosphärischen Refraktion können zu Widersprüchen führen, welche meist durch Mittelung behoben werden. Sinnvoller wäre es, eine Art Anpassungsparameter als vierte Unbekannte einzuführen, die auf einem physikalisch begründbaren Modell beruht. Bezüglich Verzeichnung kann das eine Anpassung des Koeffizienten des quadratischen Gliedes sein, bezüglich Refraktion die Anpassung des Krümmungsradius der Strahlbrechung (RINNER 1972).

Werden direkt die Ergebnisse der relativen Orientierung für die Rekonstruktion verwendet, dann erhält man im Falle von realen oder Möbius-Koordinaten ein *projektiv* verzerrtes 3D-Modell. Für dessen absolute Orientierung gegen einen cartesischen Objektraum benötigt man dann *fünf* Passpunkte, was für Nahbereichs- oder Architekturphotogrammetrie meist kein Problem ist. Kann man jedoch von idealen Bündelkoordinaten ausgehen, dann besteht die

Verknüpfung Modell→Objekt aus einer Drehstreckung (Ähnlichkeit) und die braucht bekanntlich nur 2⅓ Passpunkte sowie bei Verzicht auf absolute Lage und wahren Maßstab nur Informationen über die Verdrehung. Daher die Bemühungen, reale Koordinaten mittels automatischer Kalibrierung in ideale überzuführen, um externe Messungen so weit wie möglich zu vermeiden und ohne sonstigen Komplikationen ein cartesisches Modell zu erhalten. Fügt man nämlich den vier Gln. (3.2.1) zwei weitere Gln.

$$\left(\tilde{\mathbf{m}}_1^{\prime\prime\prime T} - \tilde{x}''\tilde{\mathbf{m}}_3^{\prime\prime\prime T}\right)\mathbf{X} = 0 \quad \left(\tilde{\mathbf{m}}_2^{\prime\prime\prime T} - \tilde{y}''\tilde{\mathbf{m}}_3^{\prime\prime\prime T}\right)\mathbf{X} = 0 ,$$

entsprechend der trifocalen Anordnung hinzu, dann können neben den drei cartesischen Koordinaten drei zusätzliche Unbekannte der in den  $\tilde{\mathbf{m}}_i$  enthaltenen Kalibrierdaten (ohne  $\alpha$  und  $\beta$ !) bestimmt werden. Dies ist - rein qualitativ - der schon erwähnte strenge Zugang zu den KRUPPA-Gleichungen, zwei quadratischen Gleichungen, welche die Kameradaten in Funktion der Komponenten der KM beinhalten (NIINI 2000).

#### 4. Schlussbetrachtung

Es wird aufgefallen sein, dass erst ganz zuletzt die Verzeichnung kurz erwähnt wird. Diese ist nur und ausschließlich mit idealen Bündelkoordinaten hinreichend gut modellierbar, da sie in radialsymmetrischer Form sozusagen eine natürliche Eigenschaft der optischen Abbildung ist. Die algebraisch-projektiven Methoden können dieser Anforderung i.a. nicht genügen und sind daher aus photogrammetrischer Sicht Lieferanten (sehr guter) Näherungswerte, die mit den bekannten analytischen Linearformen für relative Orientierung oder Einzelbildorientierung in meist wenigen Iterationsschritten - so wie in Abschnitt 2.1 angedeutet - nachzubessern sind. Erst dann können sie den streng metrischen Anforderungen der *Bildmessung* voll entsprechen. Aus diesem Grund wurde auch die bei der Ermittlung von Näherungswerten aus Redundanzen unwesentliche Berücksichtigung der Eigenschaft A von  $\mathbf{C}$  ( $\det\mathbf{C} = 0$ ) nicht weiter diskutiert. Sie kann ja aufgrund ihrer Nichtlinearität ebenfalls nur iterativ berücksichtigt werden und ist bei Reduktion der Unbekannten auf die *fünf* wesentlichen Parameter der Nachiteration automatisch erfüllt.

Gegenwärtig besteht der Unterschied zwischen Photogrammetrie und 3D Computer Vision wohl darin, dass diese in erster Linie die Darstellung von Objekten und nicht deren möglichst exakte Ausmessung zum Ziel hat. Das kann sich aber anhand einiger bereits weitgehend ausgereifter digital-photogrammetrischer Auswertesysteme sehr schnell ändern und die bisher unbestrittene Kompetenz des Vermessungswesens auf diesem Gebiet ist verloren! Es ist daher auch irgendwie kennzeichnend, dass in den meist exzellenten Büchern zur Computer Vision – aktuellstes Beispiel R. HARTLEY & A. ZISSERMAN (2001) – der Begriff Photogrammetrie faktisch nicht vorkommt. Allerdings ist er nicht vollständig verschwunden, da er in den Literaturhinweisen dieser Werke nicht zu umgehen ist, z.B. verbunden mit den Namen von H. VON SANDEN (1908) oder E. KRUPPA (1912), die sich mit photogrammetrischen Problemen auseinandersetzten. Vielleicht kann auf dieser Basis und in akademischer Fairness doch noch ein *modus vivendi* zwischen den beiden Disziplinen gefunden werden.

## Literaturverzeichnis

- FÖRSTNER W., 2001: Moderne Orientierungsverfahren. PFG 3, pp. 163 – 176.
- GRAFAREND E. & SHAN J. 1997: Closed-form solution of P4P or the three dimensional-resection problem in terms of Möbius barycentric coordinates. Journal of Geodesy 71, pp. 217 – 231.
- HARTLEY R. & ZISSERMAN A. 2001: Multiple View Geometry in Computer Vision. Cambridge University Press
- HOFMANN-WELLENHOF B. 1979: Die gegenseitige Orientierung von zwei Strahlenbündeln bei Überbestimmung, bei unbekanntem Näherungswerten und durch ein nicht-iteratives Verfahren. Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Nr. 257.
- KILLIAN K. & MEISSL P. 1977: Zur Lösung geometrisch überbestimmter Probleme. Österr. Zeitschrift f. Vermessungswesen, Nr. 3/4, pp. 81 – 86.
- KLEIN F. 1909: Elementarmathematik vom höheren Standpunkt aus, Teil II: Geometrie. Vorlesung gehalten im Sommersemester 1908 a.d. Univ. Göttingen. B. G. Teubner, Leipzig. pp. 175ff.
- KRUPPA E. 1912: Über einige Orientierungsprobleme der Photogrammetrie. Sitzungsbericht der kaiserlichen Akademie d. Wissenschaften, Bd. CXXI, Abtlg. IIA, 1. Halbbd., Wien, pp. 3-16.
- NIINI I. 2000: Photogrammetric Block Adjustment Based on Singular Correlation. Diss. TU Helsinki.
- RINNER K. 1963: Studien über eine allgemeine, voraussetzungslose Lösung des Folgebildanschlusses. Österr. Zeitschrift f. Vermessungswesen, Sonderheft 23.
- RINNER K. 1972: in Jordan/Eggert/ Kneissl Handbuch der Vermessungskunde, Band IIIa/1 Photogrammetrie, J.B. Metzlersche Verlagsbuchhandlung Stuttgart, pp. 191 ff.
- THOMPSON E. H. 1968: The Projective Theory of Relative Orientation. Photogrammetria 23, pp. 67 ff.
- VON SANDEN H. 1908: Die Bestimmung von Kernpunkten in der Photogrammetrie. Dissertation Univ. Göttingen.
- BRANDSTÄTTER G. 1991a: Notizen zur voraussetzungslosen gegenseitigen Orientierung von Messbildern. Österr. Zeitschrift f. Vermessungswesen, Nr. 4, pp. 273 – 280.
- BRANDSTÄTTER G. 1991b: Voraussetzungslose relative Orientierung mittels Bilddrehung durch Bildkorrelation. Österr. Zeitschrift f. Vermessungswesen, Nr. 4, pp. 281 – 288.
- BRANDSTÄTTER G. 2000: Projective Photogrammetry. Mitteilungen d. Geodätischen Institute d. TU Graz, Folge 87.
- BRANDSTÄTTER G. 2001: Videometrie als Fußballschiedsrichter. Eine amüsante Fallstudie. *GeoNews* Nr.2 der Firma rmData – Magazin für Vermessg. und Geoinformation A-7400 Oberwart, pp. 12/13

# Aufbau eines Digitalen Geländemodells vom Wasserlauf der Grenzoder

HERBERT BROCKMANN<sup>1</sup>, GOTTFRIED MANDLBURGER<sup>2</sup>

*Zusammenfassung: Für vielfältige Nutzungen war von der Grenzoder (ca. 180 km) ein Digitales Geländemodell des Wasserlaufes (DGM-W, hier zwischen den Oderdeichen) auf der Basis von Laser-Scanner- und Gewässerbettquerprofil-Daten aufzubauen. Für eine weitgehend automatisierte Ableitung des DGM-W war eine Methode zur Bestimmung der Wasser-Land-Grenze (WLG) zu entwickeln, mit dem Ziel, die Laser-Scanner-Daten in Bereiche des Geländes und der Wasseroberfläche klassifizieren zu können. Zur möglichst formtreuen Rekonstruktion des Gewässerbettes wurde ein im Programmsystem SCOP implementierter Algorithmus zur Verdichtung von Querprofilen eingesetzt. Darüber hinaus wurde das Potenzial zur Steigerung der Höhengenaugigkeit von Laser-Scanner-Daten mittels simultaner relativer Höheneinpassung von Laser-Scanner-Streifen erprobt.*

*Im Folgenden wird das Projekt „Wasserlauf-DGM der Grenzoder“ mit seinen speziellen Anforderungen vorgestellt. Besonders wird dabei auf die in diesem Zusammenhang zu entwickelnden Methodiken eingegangen.*

## 1 Veranlassung

Im Sommer 1997 entstanden durch das extreme Hochwasser an der Oder große volkswirtschaftliche Schäden in allen Anrainerstaaten, der: Tschechische Republik, Polen und Deutschland (LAUSCHKE & OPPERMAN, 1998). Ausgelöst durch dieses Ereignis sind in den letzten Jahren vielfältige präventive Maßnahmen (u.a. Baumaßnahmen zur Deichverstärkung und Erhaltung von Wasserbauwerken oder Entwicklung zukunftsorientierter numerischer hydraulischer Modelle für eine aktuelle Hoch- und Niedrigwasservorhersage) erfolgt oder zumindest begonnen worden.

Für sehr viele derartiger Präventivmaßnahmen mussten bzw. müssen wiederum aktuelle hochaufgelöste Geo-Basisdatenbestände aufgebaut werden. So wurde insbesondere zum Aufbau eines Wasserstandsvorhersagemodells sowie zur Aktualisierung der Bühnenbestandsunterlagen und Flussvorlanddaten ein aktuelles, hochaufgelöstes und genaues Digitales Geländemodell des Wasserlaufes (DGM-W) der Grenzoder seitens der Hauptnutzer angefordert. Bei den Hauptnutzern handelt es sich um das Landesumweltamt Brandenburg (Oberste Wasserwirtschaftsbehörde), das Wasser- und Schifffahrtsamt Eberswalde (Betrieb und Unterhaltung der Bundeswasserstraßen)

---

<sup>1</sup> Herbert Brockmann, Bundesanstalt für Gewässerkunde, Referat Geodäsie (Geo-Basisdaten, Fernerkundungsverfahren und -systeme), Kaiserin-Augusta-Anlagen 15-17, D-56068 Koblenz, Tel.: +49-261-1306-5214, Fax: +49-261-1306-5280, e-Mail: [brockmann@bafg.de](mailto:brockmann@bafg.de)

<sup>2</sup> Gottfried Mandlbürger, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, Technische Universität Wien, Gusshausstraße 27-29, A-1040 Wien, Tel.: +43-1-58801-12235, Fax: +43-1-58801-12299, e-Mail: [gm@ipf.tuwien.ac.at](mailto:gm@ipf.tuwien.ac.at)

und die Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG, wissenschaftliches Institut für die Forschung auf den Gebieten Gewässerkunde, Wasserwirtschaft sowie Gewässerschutz).

## 2 Projekt „Wasserlauf-DGM der Grenzoder“

### 2.1 Allgemeines



Abb.1: Übersichtsskizze – DGM-W der Grenz- und Westoder

Das Projekt „Wasserlauf-DGM der Grenzoder“ ist ein Teilprojekt im Zusammenhang mit der Bereitstellung aktueller, hochaufgelöster und genauer Geländedaten, u.a. für den Hochwasserschutz an der Oder (GIERK & SEYFERT, 2001). Die Hauptaufgabe dieses Projektes bestand im Aufbau eines DGM-W (DIN 4049-2, 1994) der Grenzoder (einschl. Westoder). Dieses DGM-W musste den abflusswirksamen Bereich einschließlich dem Gewässerbett auf polnischem und deutschem Territorium (s. Abb. 1) enthalten. Die zu bearbeitende Fläche, im Wesentlichen die Bereiche zwischen den Oderdeichen betrug ca. 273 km<sup>2</sup> auf einer Gewässerstrecke von 163 km Grenzoder und 17 km Westoder.

Die Geländedatenerfassung sollte aus wirtschaftlichen Überlegungen mittels Laser-Scanner-Technik erfolgen (BROCKMANN, 2000). Diese Technik wird inzwischen standardmäßig für derartige Projekte bei der BfG eingesetzt. Dabei wird seitens der Endnutzer häufig eine höhere Höhengenaugigkeit gefordert, als derzeit unter technischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten möglich ist. Aus diesem Grund sollte darüber hinaus anhand der erfolgten Laser-Scanner-Daten noch untersucht werden, inwieweit Höhengenaugkeitssteigerungen durch eine simultane relative Höheneinpassung von Laser-Scanner-Streifen möglich sind.

### 2.2 Anforderungen an das Wasserlauf-DGM

An die Erfassung der Geländehöhendaten wie auch an die Aufbereitung der Messdaten zum Aufbau des DGM-W wurden teilweise sehr hohe Anforderungen gestellt. Sie lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Messpunktdichte:  $F_p < 1 \text{ Punkt pro } 2m \cdot 2m$
- Klassifizierung (Filterung):
  - Flussvorlandgelände
  - abflusswirksame Bauwerke
  - Wasseroberfläche

- Hydrologische Rahmenbedingungen, d.h. Befliegung:
  - bei Niedrigwasser
  - in der vegetationsarmen Zeit, möglichst nach dem 1. Bodenfrost
  - bei Eis- und Schneefreiheit
- Abnahme- bzw. Kontrollkriterien; Grenzbeträge in der Höhe, einzuhalten mit einer Überdeckungswahrscheinlichkeit  $p=95\%$ :
  - flaches bis wenig geneigtes Gelände mit geringem Bewuchs:  $G_{Ah} = 0,20m$
  - flaches bis wenig geneigtes Gelände mit starkem Bewuchs:  $G_{Ah} = 0,40m$
  - stark geneigtes Gelände mit geringem Bewuchs:  $G_{Ah} = 0,50m$ .

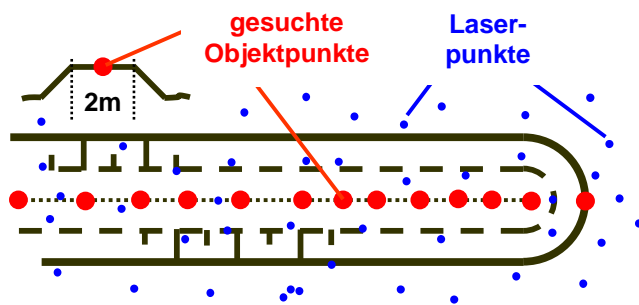


Abb.2: Regelquerschnitt der Grenzoder-Buhnen mit vorgesehener Laserpunktabdeckung (maßstäbig)

Im DGM sollten die Flussvorländer sowie die Grenzoder-Buhnen (Wasserbauwerke) möglichst hochauflösend abgebildet werden. Insbesondere sollten daraus hochwertige Buhnenlängsprofile abgeleitet werden können (s. Abb.2). Aus diesen Gründen sollte die Gitterweite des DGM 2m nicht überschreiten.

Die Modellierung des Gewässerbettes sollte achsorientiert auf der Basis von Querprofilen ohne Landanschlüsse erfolgen. Da diese Profile i.d.R. die Buhnenfelder nicht mit erfassen, waren diese Bereiche soweit möglich durch die Laser-Scanner-Daten zu beschreiben.

Das Wasserlauf-DGM war aus den Laser-Scanner-Daten des Flussvorlandes, der Buhnen und Teilen der Buhnenfelder (s. Abb. 3) sowie den Gewässerbettquerprofilen so aufzubauen, dass alle Bereiche so realistisch wie möglich wiedergeben werden. Somit kam die in der Hydrologie häufig eingesetzte Delaunay-Triangulation hier nicht in Betracht. Genutzt werden sollte das Programmsystem SCOP mit den Entwicklungen im Zusammenhang mit dem BfG-Pilotprojekt „HGIS-Saar“ (BROCKMANN, KRAUS & MANDLBURGER, 2001), die im Abschnitt 4 beschrieben werden.

### 3 Datenbasis

#### 3.1 Geländedaten

Die Laser-Scanner-Befliegung wurde im November 1999 entsprechend den o.g. Anforderungen mit einem Scanner Optech 1020 durchgeführt. Die tatsächlich erreichte mittlere Laserpunktabdeckung nach der Klassifizierung (s. Abb. 3) betrug  $F_P = 1$  Punkt pro  $6,25 \text{ m}^2$ . Dabei ist zu berücksichtigen, dass die wesentlich geringere Abdeckung auf der Wasseroberfläche (überschlägig mit einen  $\frac{1}{4}$ -Flächenanteil) in diesen Wert mit eingegangen ist.

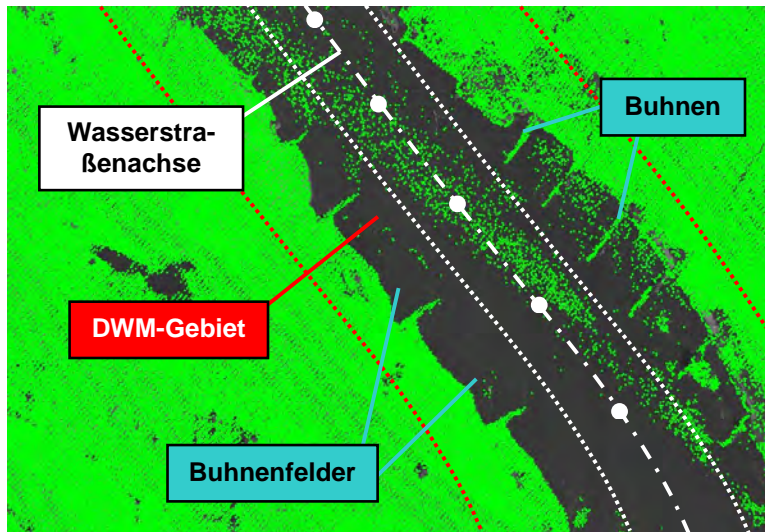


Abb. 3: Laserpunktdeckung / DWM-Berechnung

Vor dem eigentlichen Aufbau des DGM-W mussten die Laserpunkte der „festen“ Bereiche (Gelände, Bühnen, trockengefallene Bereiche der Bühnenfelder) noch von denen der Wasseroberfläche getrennt werden. Dies sollte möglichst automatisiert ablaufen. Da aufgrund unterschiedlicher Wasserstände keine anderweitigen Messdaten zur Bestimmung der Wasser-Land-Grenze (WLG) vorlagen und Ergebnisse von Wasserspiegelberechnungen an Fließgewässern (im Gegensatz zu staugeregelten Flüssen (BROCKMANN, KRAUS & MANDLBURGER, 2001)) nicht brauchbar

sind, sollte die WLG ausschließlich aus den Laserdaten der Wasseroberfläche abgeleitet werden (s. Abschn. 4.1).

### 3.2 Gewässerbett- und sonstige Basisdaten

Vom Gewässerbett wurden mittels Echolotaufnahme 1998 Querprofile im Abstand von 50 m, 100 m bzw. 200 m bei Mittel- und 1999 im 500 m Abstand bei Niedrigwasser aufgenommen. Zur Modellierung sollten letztendlich nur die 1998er Querprofile herangezogen werden. Bedingt durch die starke Morphodynamik kam die Verwendung beider Epochen zur Modellierung nicht in Betracht. Den 1998er Profilen wurde dabei wegen des geringeren Profilabstandes und der größeren Profilweite - die Profile reichen i.d.R. in die Bühnenfelder hinein - der Vorzug gegeben.

An sonstigen brauchbaren Basisdaten konnte für den DGM-Aufbau auf Orthophotos, aufgenommen allerdings bei einem wesentlich höheren Wasserstand als bei der Laser-Scanner-Befliegung, in den Maßstäben 1:34000 bzw. 1:10000, auf Transformationsparameter sowie auf Wasserstraßenachs- und festpunkte zurückgegriffen werden.

## 4 Modellierungen des DGM-W

### 4.1 Grundsätzliches

Die Verarbeitung der originalen Messdaten zu einem DGM-W erfolgte, wie im Abschn. 2.2 erwähnt, mit dem Programmsystem SCOP. Das Geländemodellsystem SCOP wurde in Wien (Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, I.P.F.) und in Stuttgart (INPHO GmbH) entwickelt. Wesentliches Merkmal von SCOP ist die Verwendung der linearen Prädiktion mit lokal an die Daten angepasster Kovarianzfunktion als Interpolationsmethode (Kraus, 2000). Dieser Ansatz erlaubt eine, auf statistischer Analyse beruhende, qualifizierte Filterung und Glättung des

Geländemodells, wodurch die zufälligen Höhenmessfehler weitgehend eliminiert und ein glatter Verlauf des Höhenlinienbildes erreicht wird. Weiterhin ist die Einbeziehung von Strukturlinien (Geländekanten, Gerippelinien, ...), die als notwendiger Bestandteil eines qualitativ hochwertigen DGMs angesehen werden, wesentlicher Bestandteil der Strategie von SCOP.

Voraussetzung für die Ableitung eines DGM-W ist die korrekte Klassifizierung in feste Bereiche (Vorland, Bühnen, trocken gefallene Bühnenfelder) und Gewässerbett. Diese Aufgabe läuft auf die Bestimmung der WLG hinaus. Ein Digitalisieren aus den digitalen Orthophotos war aufgrund der unterschiedlichen Wasserstände zwischen Laser-Scanner- und Orthophoto-Befliegung nicht möglich. Somit musste die WLG ausschließlich aus den vorhandenen Laser-Scanner-Daten ermittelt werden, wobei eine weitgehende Automatisierung angestrebt wurde. Die Ableitung der WLG wird im Abschnitt 4.2 detaillierter besprochen.

Für die erfolgreiche Anwendung der linearen Prädiktion ist eine einigermaßen homogene Stützpunktverteilung erforderlich. Während für die Laser-Scanner-Daten diese Voraussetzung in ausreichendem Maße erfüllt war, mussten die weitabständigen Echolot-Querprofil-Daten noch verdichtet werden. Dabei wurden mittels morphistischer Querprofilanpassung in regelmäßigen Abständen Zwischenprofile eingerechnet und zwar derart, dass die Form des Ausgangsprofils entlang der Gewässerachse sukzessive in die Form des nächsten Profils überführt wurde. Ein entsprechender Algorithmus wurde in (MANDLBURGER, 2000) vorgestellt und im Programmpaket SCOP implementiert.

## 4.2 Bestimmung von Wasser-Land-Grenzen

Zur Bestimmung der WLG wurde ein möglichst automatisiertes Verfahren gesucht. Grundsätzlicher Gedanke war dabei, dass sich die WLG aus einem Verschnitt des DGM-W mit einem digitalen Modell der Wasseroberfläche (DWM) ergibt.

Zur Bestimmung des DWM (s. Abb. 3) wurden zunächst alle Laserpunkte innerhalb eines Bandes von 30m links und rechts der Gewässerachse ermittelt. Diese Punkte wurden dann ins Profilkoodinatsensystem (Querabstand, Kilometrierung, Höhe) umgerechnet und nach aufsteigender Kilometrierung geordnet. Durch Mittelbildung konnten so alle 100m 1D-Wasserspiegellagen ermittelt werden. Aus diesen Wasserspiegellagen wurde in der Folge mit SCOP ein digitales Modell der Wasseroberfläche (DWM) berechnet, wobei etwaige Schrägstellungen oder Aufwölbungen der Wasseroberfläche vernachlässigt wurden.

Darauf aufbauend konnte die WLG nun in einen 2-stufigen Prozess bestimmt werden (s. Abb. 4):

- Stufe 1:
  - Bestimmung eines DGMs aus allen Laserpunkten (DGM-Laser; einschließlich der Wasseroberfläche)
  - Berechnung eines Differenzmodells DGM-Laser minus DWM mittels SCOP.INTERSECT
  - Ableitung der vorläufigen WLG als 0,00m- bzw. 0,20m-Höhenlinie aus dem Differenzmodell
- Stufe 2:
  - Elimination aller Laserpunkte innerhalb der vorläufigen WLG
  - Einsetzen der (verdichteten) Querprofilaten innerhalb der vorläufigen WLG



- Berechnung eines vorläufigen DGM-W
- Berechnung eines Differenzmodells vorläufiges DGM-W minus DWM
- Ableitung der endgültigen WLГ aus dem Differenzmodell.

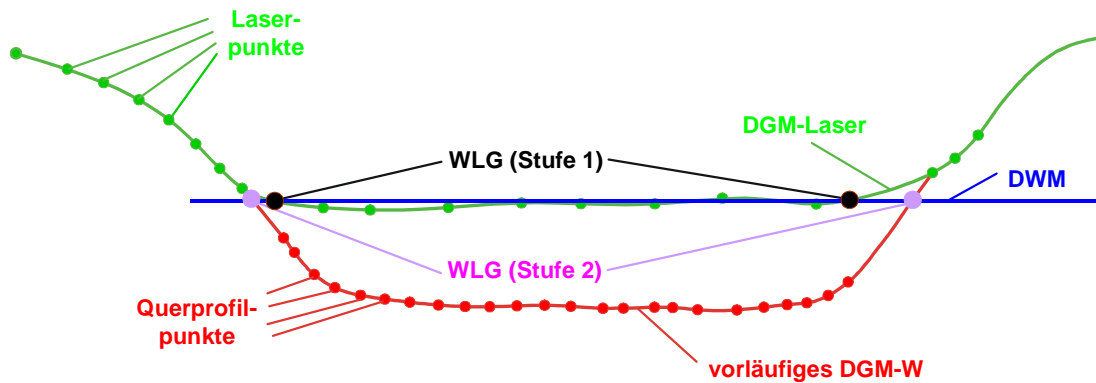


Abb. 4: Prinzipskizze zur Ableitung der Wasser-Land-Grenze

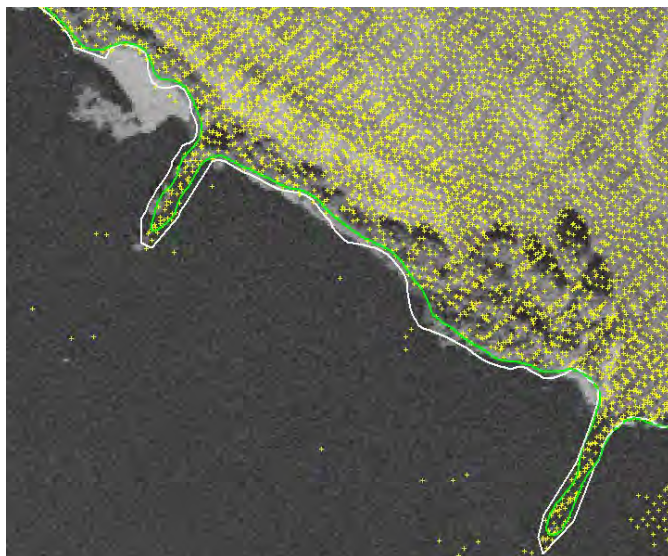


Abb. 5: Orthophoto, originale Laser-Scanner-Punkte (gelb), vorläufige (weiß) und endgültige (grün) Wasser-Land-Grenze

Da auf der Wasseroberfläche nur relativ wenig Laserpunkte existieren (s. Abb. 5) ist das DGM-Laser in diesen Bereichen nur sehr ungenau bestimmt (Stufe 1). Darüber hinaus ergeben sich beim Verschnitt mit dem DWM schleifende Schnitte in den Uferbereichen. Die 0,00m-Höhenlinie des Differenzmodells bestand oftmals aus unzusammenhängenden Liniestücken und zahlreichen kleinen geschlossenen Linien. Erst bei einem Höhenoffset von 0,20m ergab sich ein einigermaßen zusammenhängender Linienzug, welcher als vorläufige WLГ verwendet werden konnte (s. Abb. 5, weiße Linie). Diese war allerdings sehr unsicher bestimmt und somit war die Gefahr von Fehlklassifizierungen groß.

Daher wurden die Laserpunkte innerhalb der vorläufigen WLГ eliminiert und durch die Punkte des Gewässerbettes aus der Echolot Aufnahme ersetzt. Dies führt in der Folge (Stufe 2) zu verbesserten Schnittbedingungen im Bereich der Buhnen und Uferböschungen. Aus dem Verschnitt des vorläufigen DGM-W mit dem DWM konnte die endgültige WLГ nun mit größerer Genauigkeit bestimmt werden (s. Abb. 5, grüne Linie). Interessant ist dabei, dass die (weiße) WLГ der Stufe 1 weiter innerhalb des Gewässerbettes zu liegen kommt als die (grüne) WLГ der Stufe 2, obwohl diese Linie mit einem Höhenoffset von 0,20m bestimmt wurde. Der Grund dafür sind die o.g. schleifenden Schnitte im Uferbereich in der Stufe 1. Anhand der endgültigen WLГ erfolgte abschließend die endgültige Klassifizierung in Wasser- bzw. Landbereiche.

### 4.3 Berechnung des DGM-W und Ergebnisse

Nach der Elimination aller Laserpunkte innerhalb der WLK und der Verdichtung der Echolot-Querprofile konnte mittels SCOP ein DGM-W berechnet werden.

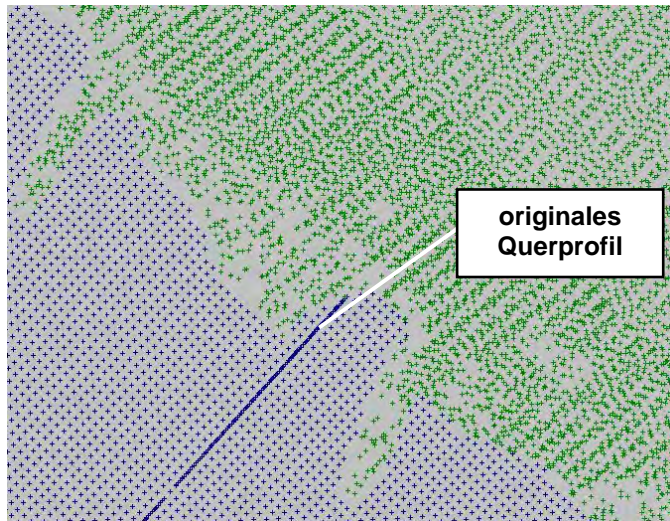


Abb. 6: Klassifizierte Laser-Scanner- (grün) und Gewässerbett-Daten (blau)

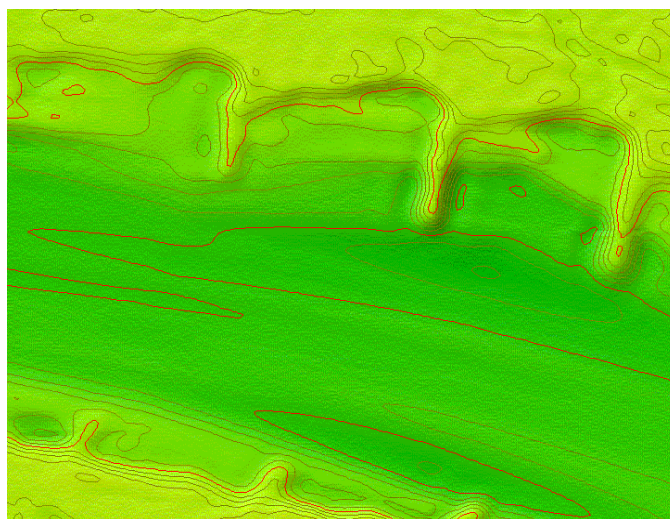


Abb. 7: Kombinierte Visualisierung des DGM-W (0,5m-Höhenlinien, Schummerung, Höhenkodierung)

spektivansichten, etc.), besteht nun für den Nutzer die Möglichkeit, Bühnen, die sich in schlechtem Zustand befinden, zu lokalisieren.

Die Abb. 6 zeigt einen solchen klassifizierten Datensatz, bestehend aus Laser-Scanner- und Gewässerbett-Daten, wobei das originale Echolot-Querprofil durch die höhere Punktdichte hervorsteht.

Die im Programmsystem SCOP verwendete lineare Prädiktion erlaubt eine Filterung der zufälligen Höhenmessfehler bei der Flächeninterpolation. Aufgrund von Genauigkeitsabschätzungen wurde für die Berechnung des DGM-W ein mittlerer Filterbetrag apriori von 0,15m angenommen. Bei der Berechnung ergab sich sogar ein Wert von 0,10m für den mittleren Filterbetrag aposteriori. Mögliche Gründe dafür sind das flache Gelände, welches sich günstig auf die Messfehler des Laser-Scanners auswirkt sowie der Umstand, dass die synthetische (glatte) Fläche des Gewässerbettes praktisch keinen Beitrag zum mittleren Filterbetrag leistet.

Um den Forderungen aller Nutzer gerecht zu werden, wurde das DGM-W mit einer Gitterweite von 1,25m berechnet. Reduzierte Auflösungen sind aus der Originalauflösung jederzeit ableitbar.

Der Abb. 7 kann entnommen werden, dass der tatsächliche Zustand der Bühnen keineswegs immer noch dem Idealzustand (s. Abb.2) entspricht. Anhand der aus dem DGM-W abgeleiteten Längsschnitte oder auch anderer Visualisierungen (höhenkodierte Darstellungen, Per-

## 5 Erprobung der simultanen Höheneinpassung von Laser-Scanner-Streifen

### 5.1 Grundsätzliches

Da mit vertretbarem Aufwand keine Passpunkte beschafft werden konnten, beschränkte sich die Erprobung von vornherein auf die simultane relative (ohne Einpassung in das Landeskoordinatensystem) Höheneinpassung von Laser-Scanner-Streifen, d.h. einer Homogenisierung der Streifenübergänge. Für diese Arbeiten standen nicht klassifizierte Laser-Scanner-Streifen im Landeskoordinatensystem eines Gebietes von ca. 15km<sup>2</sup>, erfolgten mit einem Scanner Optech 1020, mit folgenden Parametern für zwei zusammenhängende Teilgebiete zur Verfügung:

- mittlerer Punktabstand: 3m, Streifenbreite: 460m; Streifenüberlappung: 160m
- mittlerer Punktabstand: 2,3m, Streifenbreite: 520m; Streifenüberlappung: 320m.

Die Bearbeitung sollte mit der photogrammetrischen Triangulationssoftware ORIENT (KAGER, 1989) erfolgen.

### 5.2 Vorgehensweise

Die Hauptaufgaben waren die Entwicklung eines Prozessierungsablaufs einschl. der Algorithmen zur Verbesserung der Laserpunkthöhen im Landeskoordinatensystem mittels streifenweiser Korrekturpolynome sowie die Beurteilung der erreichten Ergebnisse. Die Grundidee der Ermittlung der Korrekturpolynome kann der Abb. 8 entnommen werden. Des Weiteren wird auf KAGER & KRAUS (2001) verwiesen.

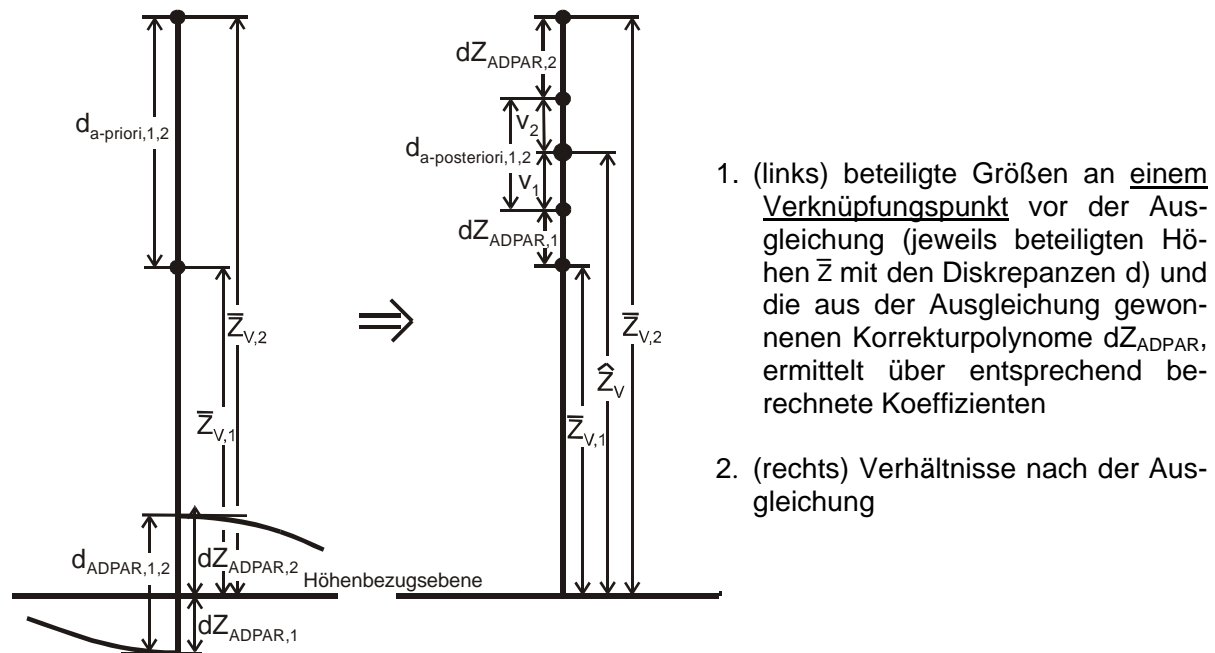


Abb 8: Anpassung überlappender Laser-Scanner

Auf dieser Basis ergibt sich folgender Arbeitsablauf:

- Automatisierte Ermittlung der Höhen der Verknüpfungspunkte
- Ausgleichung zur Ermittlung der Polynomkoeffizienten mit „ausgewählten“ Verknüpfungspunkten in konstanten Profilabständen
- streifenweise Verbesserung aller Laser-Scanner-Punkte im Landeskoordinatensystem.

### 5.3 Ergebnisse

Die Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- zur Ermittlung der Polynomkoeffizienten über „ausgewählte“ Verknüpfungspunkte sind Profilabstände von 1000 m ausreichend
- die Diskrepanzen (1495 Verknüpfungspunkte) betragen im Mittel vor der Ausgleichung  $\pm 10,7\text{cm}$  und danach  $\pm 5,6\text{cm}$ ; die Homogenität hat sich somit durch die simultane Anpassung nahezu um den Faktor 2 verbessert
- die entsprechenden Verbesserungen betragen im Mittel  $\pm 3,1\text{cm}$ , wobei keine größeren Restsystematiken erkennbar waren
- unter Einbeziehung der nicht bei der Ausgleichung berücksichtigten Verknüpfungspunkte (ca. 14500) verschlechterten sich die Diskrepanzen im Mittel von  $\pm 5,6\text{cm}$  auf  $\pm 7,3\text{cm}$ , d.h., es sind noch grobe Fehler im Datenmaterial zu vermuten
- die Polynomkorrektur betrug im Mittel  $\pm 6,0\text{cm}$  (zusätzlich zum Anteil von  $\pm 3,1\text{cm}$  auf die Verbesserungen)
- die Korrekturpolynome in benachbarten Streifen unterliegen keinen gleichen Tendenzen.

Abschließend wurden die korrigierten Laser-Scanner-Daten automatisch klassifiziert und gefiltert. Diese Ergebnisdaten werden seitens der BfG noch mit terrestrisch gemessenen Geländedaten und den klassifizierten Laser-Scanner-Daten vom identischen Gebiet - prozessiert durch die Befliegungs-Ing.-Firma - verglichen.

## 6 Ausblick

Das Grenzoderprojekt ist inzwischen, auch aus Nutzersicht, erfolgreich beendet. In absehbarer Zukunft werden zur Bearbeitung vielfältiger hydrologisch/hydraulischer Aufgaben an Fließgewässern weitere Digitale Geländemodelle von Wasserläufen benötigt. Z.Z. werden z.B. bei der BfG zwei größere Projekte - ähnlich dem Grenzoderprojekt - an der Elbe einschl. der Havelniederung (ca. 365km Bundeswasserstraße, 1000km<sup>2</sup>) und am Rhein einschl. der Lahn (ca. 210km Bundeswasserstraße, 255km<sup>2</sup>) bearbeitet. Dabei wird derzeit seitens der BfG davon ausgegangen, dass die beschriebenen Methodiken insbesondere zur Bestimmung von Wasser-Land-Grenzen auch aus wirtschaftlichen Überlegungen weiter zu entwickeln sind. Dies gilt insbesondere vor dem Hintergrund der neueren Möglichkeiten im Zusammenhang mit dem Einsatz der Laser-Scanner-Technik, der parallelen Aufzeichnung der „last- and first-pulse“-Informationen, der Rückstrahlungsintensität und der mehrkanaligen digitalen Bilddatenaufnahme, u.a. zur Erstellung von Orthophotos. Bei dem o.g. Rhein-Projekt, mit sehr hohen Anforderungen an die Höhengenaugigkeit, wird die simultane relative Höheneinpassung von Laser-Scanner-Streifen schon im Rahmen der Leistungsanfrage berücksichtigt. Ob diese Methodik letztendlich zum Einsatz kommt, ist derzeit noch eine Kosten-/Nutzen-Frage.

Darüber hinaus werden bei der BfG weitere Chancen zum Einsatz der Laser-Scanner-Technik gesehen. Verbunden mit einem entsprechenden Entwicklungsbedarf sollten zukünftig Rauheitenparameter (Fließwiderstände) und abflusswirksame Bruchkanten in ausreichender Auflösung und Genauigkeit zur Nutzung bei der hydrologisch/hydraulischen Modellierung bzw. zur Verbesserung der DGM-Qualität ableitbar sein. Das Thema Ableitung von Bruchkanten aus Laser-Scanner-Daten ist neben anderen Aspekten der Laser-Scanner-Technik weiterhin Gegenstand der Forschungsarbeiten am I.P.F..

## 7 Literaturverzeichnis

BROCKMANN, H., 2000: Einsatz flugzeuggestützter Fernerkundungstechniken zur Bearbeitung hydrologischer Fragestellungen. - Wasserwirtschaft, Zeitschrift für Wasser und Umwelt, 90. Jahrgang, Heft 1.

BROCKMANN, H., KRAUS, K. & MANDLBURGER, G., 2001: Modellierung digitaler Höhendaten zur Bearbeitung hydrologisch/hydraulischer Fragestellungen an Wasserläufen – Am Beispiel des Projektes „HGIS-Saar“ –. - Zeitschrift: Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, 45. Jahrgang, Heft 3.

DIN 4049-2, 1994: Hydrologie, Teil 3: Begriffe zur quantitativen Hydrologie. - DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin.

GIERK, M. & SEYFERT, E., 2001: Bereitstellung eines Digitalen Geländemodells für den Hochwasserschutz an der Oder. - Publikation der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung, Band 20, Vorträge zur Dreiländertagung Konstanz „Geodaten schaffen Verbindungen“.

KAGER, H. , 1989: ORIENT: A Universal Photogrammetric Adjustment System. In Grün, A. and Kahmen, H., editors, Optical 3-D Measurement, pages 447-455, Karlsruhe, Germany. Herbert Wichmann Verlag.

KAGER, H. & KRAUS, K., 2001: Simultaneous fitting of areal Laser-Scanner-Strips, Proceedings of the 5<sup>th</sup> Conference on Optical 3-D Measurement Techniques, Vienna 2001, Wichmann Verlag, im Druck

KRAUS, K., 2000: Photogrammetrie, Band 3 (Topographische Informationssysteme). Dümmler Verlag, Köln.

LAUSCHKE, C. & OPPERMAN, R., 1998: Das Sommerhochwasser 1997 im Odergebiet. - Zeitschrift für Binnenschifffahrt, Nr.1/2.

MANDLBURGER, G., 2000: Verdichtung von Echolot-Querprofilen unter Berücksichtigung der Flussmorphologie. - Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation, Heft 4/2000.

# Statistische Detektion von Gebäuden in multisensoriellen Daten

**ANSGAR BRUNN<sup>1</sup>**

*Zusammenfassung: In diesem Artikel wird ein neues statistisches Verfahren für die Detektion von Objekten in multisensoriellen Daten vorgestellt und exemplarisch für die Detektion von Gebäuden dargestellt. Das Verfahren basiert auf dem statistischen Werkzeug der Bayesnetze. Die Verwendung des Bayesnetzes ermöglicht die Kombination unterschiedlicher Informationsquellen für die Detektion. Dabei können die Informationsquellen sowohl von unterschiedlichen Sensoren stammen, als auch Information unterschiedlicher Auflösungen bieten. Das Verfahren wird anhand von Luftbild- und Höhendaten demonstriert.*

## 1 Einleitung

Zur 3D-Erfassung von Gebäuden werden oft Luftbilder oder Laserscannerdaten eingesetzt. Die Detektion von Gebäuden in diesen Datensätzen ist der erste Schritt für die Rekonstruktion der Gebäude und damit für die Erfassung von 3D-Stadtmodellen. Durch das Ergebnis der Detektion lässt sich dann die manuelle oder automationsunterstützte Neuerfassung einer Szene steuern.

Gebäude sind nur ein Beispiel für interessierende Objekte innerhalb eines Datensatzes, der sich auf einen Bereich der Topographie bezieht. Die Detektionsaufgabe ist allgemeiner: Grundsätzlich ist die Detektion von Objekten in bildhaften und symbolischen Sensordaten in vielen geobasierten Anwendungen die Voraussetzung für die Rekonstruktion der Objekte, die dann in Informationssysteme abgelegt oder für weitere Analysen genutzt werden können. Sensordaten können hier sowohl terrestrisch, vom Flugzeug oder Satellit aufgenommene Bild- oder Höhendaten als auch Vektordaten sein. Innerhalb von urbanen Gebieten können den Anwender z.B. die Vegetation, Straßen oder Gebäude zum Zwecke der Generierung von 3D Stadtmodellen oder zum Zwecke der Erstellung eines Baumkatasters (STRAUB & HEIPKE 2001) interessieren.

In diesem Artikel wird ein adaptives Verfahren zur Lösung der allgemeinen Detektionsaufgabe auf Basis bildhafter Daten vorgestellt. Die Adaptivität bezieht sich auf zwei Aspekte:

1. Das Detektionsverfahren arbeitet auf beliebigen Kombinationen unterschiedlicher bildhafter Datenquellen.
2. Das Detektionsverfahren ist für unterschiedliche interessierende Objekte unter Auswahl entsprechender diskriminierender Kriterien adaptiv.

In der Literatur lassen sich zwei Typen von Detektionstechniken finden: a) Verfahren, die von der Rekonstruktion unabhängig arbeiten (z.B. BRUNN & WEIDNER 1997), und b) Verfahren, die mit der Rekonstruktion verknüpft sind (z.B. ZIMMERMANN 2001). Die Verfahren der ersten Gruppe lösen die Detektion mit Merkmalen, die nicht für die spätere Rekonstruktion verwendet werden, oder mit abstrahierten Merkmalen der späteren Eigenschaften; z.B. wenn Gebäude in der Rekonstruktionsphase als Polyedermodelle rekonstruiert werden, kann für der Detektion von Gebäudebereichen eine geringe Varianz der Normalenrichtungen angenommen werden. Die zweite Gruppe der Detektionsverfahren löst zur Detektion einen Teil der Rekonstruktionsaufgabe, um dann eine Aussage über die Existenz der Objekte zu machen.

---

<sup>1</sup> Dr.-Ing. Ansgar Brunn, Institut für Photogrammetrie, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, Nussallee 15, 53115 Bonn

Das zweite Verfahren ist das aufwendigere und bedarf i.d.R. eines höheren Modellierungsgrades.

Dieser Artikel beschreibt ein Verfahren der ersten Gruppe. Die Detektion soll effizient und automatisch erfolgen. Das Detektionsverfahren soll im einzelnen folgende Eigenschaften erfüllen:

- Die Detektion soll möglichst vollautomatisch, gegebenenfalls auch szenenabhängig nach einer interaktiven Lernphase, ablaufen.
- Die Detektion, inkl. der Lernphase, soll schnell zu einem Ergebnis führen, damit für den nachfolgenden Erfassungsprozess nur kurze Wartezeiten entstehen. Daher sind Merkmale zu wählen, die einfach zu berechnen sind.
- Das Detektionsverfahren soll unterschiedliche Datenquellen nutzen können.
- Das Wissen über die Objekte soll möglichst automatisch gelernt werden können.
- Durch zusätzliche Datenquellen soll die Lernphase verkürzt und gleichzeitig das Ergebnis des Erkennungsprozesses verbessert werden.
- Die Detektion soll dem nachfolgenden Erfassungsprozess ein Maß für die Sicherheit der Erkennung und Lokalisierung bieten, damit unsichere von sicheren Entscheidungen getrennt werden können (FÖRSTNER 1997).

Das Detektionsverfahren wird in diesem Artikel anhand der Gebäudedetektion dargestellt. Der Artikel gliedert sich in fünf Abschnitte. Nach der Einleitung folgen im zweiten Abschnitt die Grundlagen der Bayesnetze als Spezialisierung der Graphischen Modelle. Anschließend, in Abschnitt 3, wird ein Bayesnetz für die Klassifikation entwickelt. In Abschnitt 4 folgt ein reales Beispiel mit einer Diskussion des Verfahrens. Der Artikel endet mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick auf weitere Arbeiten.

## 2 Statistisches Modell

Das Detektionsproblem ist statistisch betrachtet ein Klassifikationsproblem: Es sollen die Bereiche des Datensatzes als interessant klassifiziert werden, die Gebäude enthalten. Wir lösen das Klassifikationsproblem in diesem Artikel mit einem Bayesnetz. Daher werden in diesem Abschnitt die Bayesnetze, die eine Spezialisierung der Graphischen Modelle sind, eingeführt.

### 2.1 Graphische Modelle

Die Nutzung Graphischer Modelle ist eine Möglichkeit, komplizierte Zusammenhänge in einer einfachen Form darzustellen. Sie wurden bereits häufig in der Physik, Biologie, Medizin und Mathematik verwandt (LAURITZEN 1998, PEARL 1988). Knoten des Graphen repräsentieren Zufallsvariable und Graphkanten Abhängigkeiten zwischen den Knoten des Graphen. Nicht verbundene Knoten sind konditional unabhängig. Die Graphenstruktur ist einfach erweiterbar. Eine Diskussion über die Struktur ist, auch mit nicht Fachleuten, einfach möglich.

In Abbildung 1 ist ein einfaches Graphisches Modell für die Repräsentation der Abhängigkeiten zwischen einem Gebäude, seinen Gebäudeteilen, dessen Segmenten und Kanten dargestellt. Das Gebäude besteht aus Gebäudeteilen, die sich aus 3D Kanten und 3D Segmenten zusammensetzen. Die Segmente werden in dem Beispiel nach Geometrie und Farbe getrennt repräsentiert.

### 2.2 Bayesnetze

Bayesnetze sind eine spezielle Form der Graphischen Modelle (PEARL 1988, KOCH 2001). Die Knoten stellen Zufallsvariable dar, die Kanten sind gerichtet und symbolisieren eine ge-

richtete Abhängigkeit. Die Abhängigkeit wird durch bedingte Wahrscheinlichkeiten beschrieben.

Das Bayesnetz repräsentiert als ganzes eine komplexe Wahrscheinlichkeitsverteilung. Der Graph beschreibt die Struktur der Verteilung. Die Belegung des Bayesnetzes, für die die Verteilung maximal wird, wird als Klassifikationsergebnis gesucht. Dazu werden die Wahrscheinlichkeiten aller Kombinationen der Belegungen aller Zufallsvariablen berechnet. Die Optimierung lässt sich jedoch auf die Optimierung in der Belegung einzelner Knoten zurückführen. Diese Eigenschaft nutzen wir für die Detektion aus.

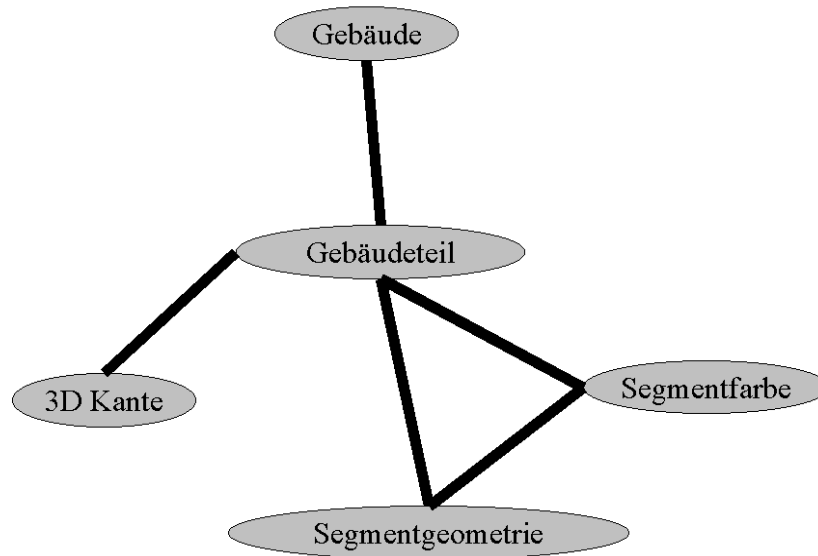


Abbildung 1 zeigt einen Ausschnitt eines Graphischen Modells für ein Gebäude, das in Gebäudeteile zerlegt werden. Die Gebäudeteile werden als Kanten und als Segmente repräsentiert. Der Repräsentation des Segments wird in die Segmentfarbe und die Segmentgeometrie unterteilt.

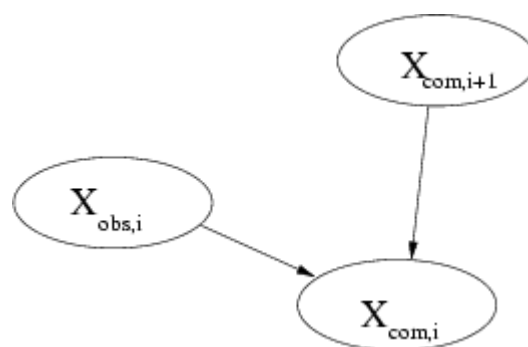


Abbildung 2 zeigt das lokale Bayesnetz zur Klassifikation. Die Wahrscheinlichkeiten des Vorhandenseins von Gebäuden  $X_{com,i+1}$  aus der vorhergehenden Ebene werden mit den aus den Beobachtungen generierten Wahrscheinlichkeiten  $X_{obs,i}$  zu einer verbesserten Wahrscheinlichkeit  $X_{com,i}$  kombiniert.



### 3 Gebäudedetektion

#### 3.1 Entwurf des Bayesnetzes

Wir definieren für die betrachtete Szene ein Raster mit einer maximalen Auflösung. Für jedes Rasterelement wird auf dieser Auflösungsstufe eine Zufallsvariable  $X_{com,0}$  definiert, die die Elementarereignisse „Gebäude“ und „Nicht-Gebäude“ annehmen kann. Wir definieren weitere Auflösungsstufen der Zufallsvariablen analog der Generierung einer Bildpyramide. Vier Zufallsvariablen der Ebene  $i$  werden zu einer Zufallsvariablen der Ebene  $i+1$  zusammengefasst. Die Zufallsvariablen  $X_{com,i}$  erhalten Informationen durch die Zufallsvariablen  $X_{com,i+1}$  der nächst höheren Ebene und durch Zufallsvariablen  $X_{obs}$ , die Beobachtungswissen einbringen (Abbildung 2).

Die Zufallsvariablen  $X_{obs}$  können ebenfalls die Elementarereignisse „Gebäude“ und „Nicht-Gebäude“ annehmen. Das Beobachtungswissen wird auf verschiedenen Auflösungsebenen in die Klassifikation integriert. Liegen ausschließlich Daten auf der untersten Auflösungsebene vor, aggregieren wir die Daten mittels einer Bildpyramide (Abbildung 3).

Die Detektion erfolgt von der Ebene mit der geringsten Auflösung beginnend in der Auflösungspryamide abwärts bis zur Ebene der höchsten Auflösungsstufe (Abbildung 4). Für die oberste Ebene wird eine priori Wahrscheinlichkeit vorgegeben. Für jeden Knoten im Bayesnetz (auf allen Ebenen) ergeben sich Klassifikationswahrscheinlichkeiten.

In jedem Knoten des Bayesnetzes kann die Detektion abgebrochen werden, wenn die Detektionswahrscheinlichkeiten bereits eindeutig sind; d.h. wenn die Wahrscheinlichkeiten das Finden eines Gebäudes in den höheren Auflösungen bereits ausschließen oder wenn bereits ein Gebäudebereich gefunden wurde. So ergeben sich unvollständige, baumartige Graphen.

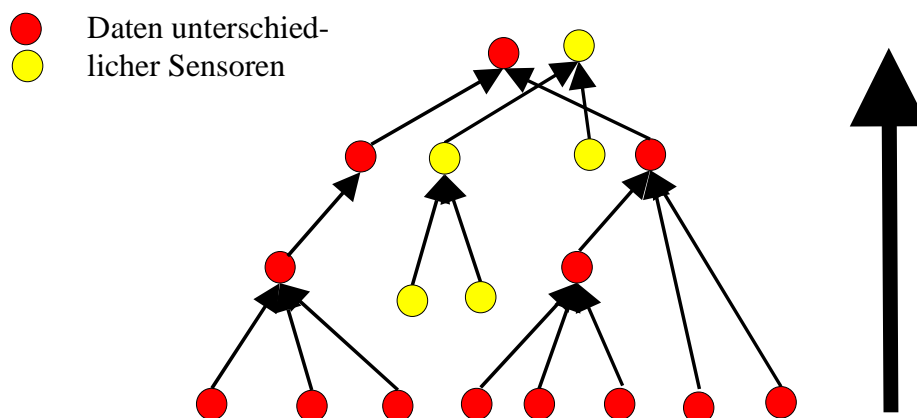


Abbildung 3 zeigt die Abstraktion der Daten von der größten Auflösungsstufe hin zu einer geringeren Auflösung.

#### 3.2 Lernen der bedingten Wahrscheinlichkeiten

Gebäude und „Nicht-Gebäuden“ haben in den Datenquellen bestimmte Erscheinungsformen. Diese werden mit Hilfe eines Beobachters mit einem Lernverfahren analog der überwachten

Klassifikation gelernt. Der Benutzer wird aufgefordert, in einem der Datensätze einzelne Punkte oder Bereiche anzugeben, und zu benennen, ob es sich um Gebäude oder „Nicht Gebäude“ handelt. Da die Zuordnung der ausgewählten Punkte oder Bereiche in die anderen Datensätze eindeutig ist, werden gleichzeitig in Datenquellen Informationen über die Erscheinungsform der Objekte gesammelt.

Wir erhalten empirische Verteilungen für beide Objekttypen in allen Datensätzen, die durch kontinuierliche Verteilungen approximiert werden sollen. Die empirischen Verteilungen werden dazu durch ein Clusterverfahren in eine Überlagerung von mehreren Normalverteilungen zerlegt. Betrachten wir nun einen einzelnen Datensatz  $d$ , so ergeben sich zwei Verteilungen:

$$f_d(u \mid \text{„Gebäude“}) = \frac{1}{n} \sum N(\mu_{d,i} \mid \text{„Gebäude“}, \sigma_{d,i}^2) \quad (1)$$

$$f_d(u \mid \text{„Nicht Gebäude“}) = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n N(\mu_{d,i} \mid \text{„Nicht Gebäude“}, \sigma_{d,i}^2) \quad (2)$$

Die Normierung  $1/n$  ergibt sich nach dem zweiten Axiom für Wahrscheinlichkeiten, nachdem das Integral der Wahrscheinlichkeitsdichten sich zu eins ergeben muss.

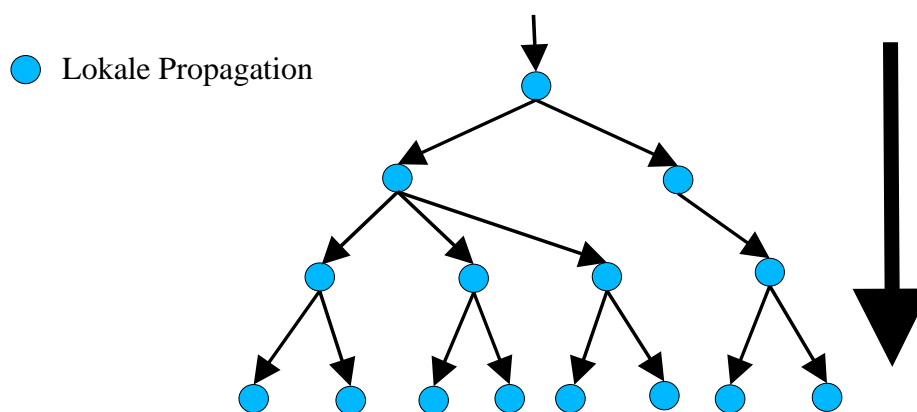


Abbildung 4 zeigt die Propagation durch die verschiedenen Auflösungsstufen. In dem Knoten des Bayesnetzes wird die Information der vorhergehenden Ebene mit der in dieser Auflösung vorhandenen Information entsprechend Abbildung 2 kombiniert. In der Abbildung ist das vollständige Bayesnetz dargestellt.

## 4 Beispiel

In diesem Kapitel soll das Verfahren anhand des Hoengg-Datensatzes der ETH Zürich diskutiert werden. Der Datensatz war Testdatensatz des ASCONA-Workshops 2001.

### 4.1 Datensatz

Für die Gebäudedetektion stehen in diesem Fall vier überlappende Luftbilder im Maßstab 1:5000 (Abbildung 5) und ein Digitales Oberflächenmodell mit unregelmäßig verteilten

Punkten zur Verfügung. Das Digitale Oberflächenmodell wurde aus einem der Luftbildpaare automatisch generiert wurde.



Abbildung 5 zeigt eines der 4 verwandten Luftbildausschnitte.



Abbildung 6 zeigt das interpolierte Digitale Oberflächenmodell (links), das durch morphologische Filterung approximierte Digitale Geländemodell (mittig) und das normalisierte Digitale Oberflächenmodell (rechts).



Abbildung 7 zeigt das berechnete Orthophoto im RGB-Farbraum und im normalisierten RGB-Farbraum.

## 4.2 Generierung von Detektionsmerkmalen

Das Digitale Oberflächenmodell wurde als Raster mit einer Auflösung von  $0.25 \times 0.25 \text{m}^2$  interpoliert (Abbildung 6). Aus dem Digitalen Oberflächenmodell leiten wir zunächst das nor-

malisierte Digitale Oberflächenmodell ab. Dieses codiert die Objekthöhen über dem approximierten Gelände. Aus dem normalisierten Digitale Oberflächenmodell werden die Normalenrichtungen und die Varianz der Normalenrichtung berechnet, die wir ebenfalls für die Klassifikation verwenden.

Vier Farbornthophotos wurden in der gleichen Auflösung wie das Oberflächenmodell berechnet (Abbildung 7). Anstelle der Farben im RGB-Farbraum verwenden wir die Farben im normierten RGB-Farbraum. Dazu wird die Summe der Farbwerte auf eins normiert.

$$\begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix}_n = \frac{1}{R+G+B} \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} \quad (3)$$

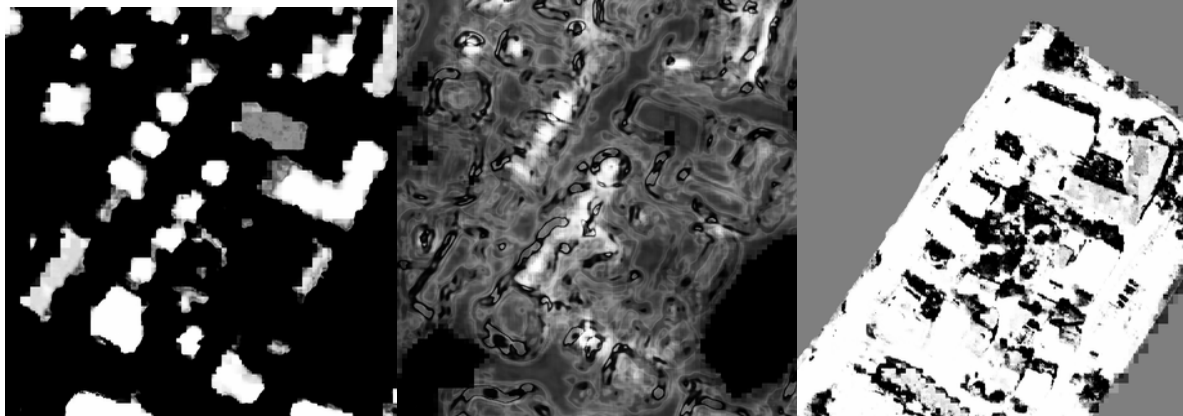


Abbildung 8 zeigt die Ergebnisse der Detektion bei Verwendung ausschließlich eines Kriteriums. Es sind die Wahrscheinlichkeiten für das Vorhandensein von Gebäuden unter Nutzung ausschließlich der Höheninformation über dem Gelände (links), der Varianz der Normalenvektoren (mittig) und der normalisierten Farbinformation aus den 4 Luftbildern.

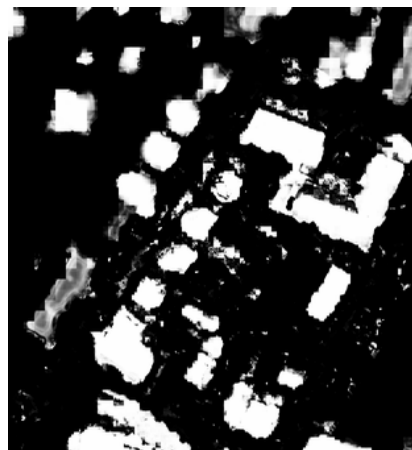


Abbildung 9 zeigt die Wahrscheinlichkeiten der Detektion von Gebäuden bei Nutzung der Höheninformation über dem Gelände, der Varianz der Normalenvektoren und der Farbinformation.

### 4.3 Ergebnisse

Die Abbildungen 8 und 9 zeigen die Ergebnisse der Detektion durch das Bayesnetz. Wird nur eines der Detektionsmerkmale (Höhe, Normalenvarianz, Farbe) verwendet, reicht die Unterscheidbarkeit zwischen Gebäuden und Nicht-Gebäuden nicht aus. Erst die Kombination aller drei Datensätze führt zu einem akzeptablen Ergebnis (Abbildung 9).

Die meistens Gebäude sind erkannt worden. In Schattenbereichen der Gebäude wie im Schatten auf den Dächern finden Fehlinterpretation statt. Ist für die Klassifikation in einem Datensatz keine Unterscheidung möglich, führt dieses Klassifikationsmerkmal nicht zu einer Verschlechterung des Gesamtergebnisses. Das Ergebnis zeigt, dass der Lernprozess verbessert werden sollte und gleichzeitig mehr als die hier verwandten zwei Cluster für jede Objekt-Datensatz-Kombination zugelassen werden sollten.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Artikel wurde ein Verfahren zur Detektion von Gebäuden vorgestellt, das auf einer hierarchischen Klassifikation unter Verwendung der Bayesnetze basiert. Es ermöglicht die Integration unterschiedlicher Datenquellen. Die notwendigen bedingten Wahrscheinlichkeiten werden anhand von Beispielen automatisch gelernt. Anhand des Hoengg-Datensatzes wurden die Eigenschaften des Verfahrens diskutiert.

Die Vorteile des Verfahrens liegen in seiner Fähigkeit unterschiedliche Datenquellen zu kombinieren. In diesem Artikel wurde die Kombinationsfähigkeit anhand von Höhendaten und Bilddaten demonstriert. Beide Datenquellen beziehen sich auf den gleichen Maßstab und die gleiche Repräsentationsform, das Raster.

Die aktuellen Entwicklungen am Institut für Photogrammetrie gehen in vier Richtungen. Die vier Erweiterungen nutzen die Offenheit der Modellierung:

1. Die Lernstrategie soll verbessert werden, indem mehr Cluster bei der Analyse der empirischen Verteilungen zugelassen werden. Gleichzeitig soll die resultierende Mischverteilung untersucht werden, ob sie die empirische Verteilung genügend genau approximiert. Die Behandlung von Ausreißern soll integriert werden.
2. Die verwandten Bayesnetze ermöglichen die Integration von unterschiedlichen Daten auf unterschiedlichen Maßstabsebenen; z.B. lassen sich Satellitendaten auf einer kleineren Maßstabsebene mit Bilddaten auf einer größeren Maßstabsebene gemeinsam auswerten.
3. Durch die Integration von vektorbasierten Daten in die bisherige Rasterklassifikation würde die Nutzung von Kanteninformation aus den Bildern und Digitalen Oberflächenmodellen, aber auch von Karteninformation ermöglicht.
4. Die Rasterrepräsentation soll in eine adaptive segmentorientierte Repräsentation überführt werden. Dadurch erwarten wir Effizienzsteigerungen in der Erkennung.

## 6 Literatur

- BRUNN, A.; WEIDNER, U. (1997): Extracting Buildings From Digital Surface Models. In: 3D Reconstruction and Modeling of Topographic Objects, Band 32. IAPRS.
- FÖRSTNER, W. (1996): 10 Pros and Cons Against Performance Characterization of Vision Algorithms. In: Christensen, H. I.; Förstner, W.; Madsen, C. B. (Hrsg.), Workshop "Performance Characteristics of Vision Algorithms". Verfügbar unter <http://www.ipb.uni-bonn.de/ipb/lit/abstracts96/foerstner96.procon.html> (nachgeprüft am 1. Juli 2001)
- KOCH, K. R. (2000): Einführung in die Bayes-Statistik. Springer Verlag.
- PEARL, J. (1988): Probabilistic Reasoning in Intelligent Systems. Morgan Kaufmann Publishers.
- STRAUB, B. M.; HEIPKE, CH. (2001): Automatic Extraction of Trees for 3D City Models from Images and Height Data. In: Grün, A. (Hrsg.), ASCONA-Workshop 2001. Balkema-Verlag.
- WEIDNER, U.; FÖRSTNER, W. (1995): Towards Automatic Building Extraction from High Resolution Digital Elevation Models. ISPRS Journal, 50(4):38-49.
- ZIMMERMANN, P. (2001): Automatic Building Detection Analysing Multiple Cue Data. In: Grün, A. (Hrsg.), ASCONA-Workshop 2001. Balkema-Verlag.

# Möglichkeiten der Fernerkundung zur Bilanzierung des terrestrischen Kohlenstoffbudgets

STEFAN DECH<sup>1</sup>, KURT GÜNTHER<sup>1</sup>, GÜNTER STRUNZ<sup>1</sup>

*Abstract: The terrestrial biosphere plays an essential role in the global carbon balance. Gross primary productivity, net primary productivity, and heterotrophic respiration and their corresponding spatial and temporal variations are key components in the terrestrial carbon cycle. Many research activities are therefore focussing on the development and refinement of global terrestrial ecosystem models. The models range in their complexity from simple regressions between climatic variables and trace gas fluxes to complex modelling of biophysical and ecophysiological processes. Essential input data are various parameters describing the status and change of climate, soil, and vegetation. Remote sensing data can provide information on the spatial and temporal variation of several vegetation and climate related parameters.*

*The paper gives an overview on the contributions of remote sensing to the calculation of the terrestrial carbon cycle. The basic structure of some ecosystem models is given. Then the relevant parameters FAPAR and PAR are explained. An example is shown, where a FAPAR time series over Germany is derived from satellite data. Finally, an outlook is given on a project, which aims at the quantification of terrestrial carbon fluxes using a sophisticated ecosystem model and vegetation parameters derived operationally from remote sensing data.*

## 1 Einleitung

Die terrestrische Biosphäre nimmt eine wichtige Rolle im globalen Kohlenstoffzyklus ein. Eine Reihe von Forschungsarbeiten haben sich daher in den letzten zwei Jahrzehnten intensiv damit beschäftigt, den Beitrag der terrestrischen Ökosysteme zum globalen Kohlenstoffbudget zu beschreiben (z.B. MOORE ET AL., 1981, SCHIMEL, 1995) und die Aufnahme von CO<sub>2</sub> durch die Photosynthese bzw. die Abgabe von CO<sub>2</sub> durch die Atmung der Vegetation (autotrophe Atmung) und die mikrobielle Bodenaktivität (heterotrophe Atmung) zu quantifizieren. Die aus diesen Parametern berechneten Größen, die Netto-Primärproduktion (NPP) bzw. die Netto-Ökosystemproduktion (NEP), sind die für den globalen Kohlenstoffzyklus entscheidenden Parameter. Dabei gibt NPP an, wieviel atmosphärisches CO<sub>2</sub> in einer Pflanze gebunden wird und damit für den Zuwachs an Biomasse zur Verfügung steht. Sie stellt die Differenz zwischen der Bruttoprimärproduktion (GPP), d.h. die Gesamtaufnahme von Kohlenstoff aus der Atmosphäre durch die Photosynthese, und der autotrophen Atmung dar. NEP dagegen berücksichtigt auf einer längeren Zeitskala, wieviel atmosphärisches CO<sub>2</sub> in einem Ökosystem gebunden wird. Absterbende Pflanzenteile gehen nämlich in die Laubschicht und nachfolgend in den Boden ein, wo sie sich zersetzen und Kohlenstoff an die Atmosphäre abgeben. Die Differenz zwischen NPP und dieser heterotrophen Atmung, gegebenenfalls vermindert um die Vernichtung von Biomasse durch Feuer, wird als NEP bezeichnet.

---

<sup>1</sup> Priv. Doz. Dr. rer. nat. Stefan Dech, Dr. rer. nat. Kurt Günther, Dr.-Ing. Günter Strunz, Deutsches Fernerkundungsdatenzentrum (DFD), DLR Oberpfaffenhofen, 82234 Wessling

Verschiedene Modelle mit unterschiedlicher Komplexität wurden in den letzten Jahren entwickelt, die sich sowohl für globale als auch lokale Untersuchungen eignen. Die einfachsten Modelle beruhen auf empirischen Korrelationen zwischen klimatischen Größen und biophysikalischen Variablen (LIETH, 1975), während komplexere Modelle versuchen, die biophysikalischen und ökophysiologischen Prozesse auf Blattebene detailliert zu beschreiben und auf Bestands- oder Landschaftsebene zu skalieren (RUNNING & GOWER, 1991; VEROUSTRAETE ET AL. 1994; THORNTON 1998). Eine umfangreiche Studie wurde im Rahmen des „Potsdam NPP Model Intercomparison Workshop“ durchgeführt, bei der insgesamt 17 Modelle verglichen wurden. Die wesentlichen Ergebnisse sind in CRAMER et al. (1999) veröffentlicht.

Der vorliegende Beitrag gibt einen Überblick zu möglichen Beiträgen der Fernerkundung zur Bilanzierung des terrestrischen Kohlenstoffbudgets. Zunächst werden die grundsätzlichen Ansätze zur Modellierung terrestrischer Ökosysteme angegeben. Danach werden die Parameter FAPAR und PAR erläutert und ihre Ableitung aus Fernerkundungsdaten beschrieben. Anhand eines Beispiels wird gezeigt, wie die Ableitung von FAPAR anhand einer Zeitserie von Satellitendaten über Deutschland durchgeführt wurde. Abschließend erfolgt ein Ausblick auf ein Projekt, das die routinemäßige Erstellung einer jährlichen Bilanz von Kohlenstoffflüssen auf der Basis eines Ökosystemmodells unter Einbeziehung von Fernerkundungsdaten zum Ziel hat.

## 2 NPP – Modelle

Eine der Natur möglichst gut angepasste Modellierung von Austauschvorgängen zwischen Biosphäre und Atmosphäre benötigt Transfermodelle für

- die einfallende und emittierte Strahlung (Absorption von kurzwelliger Strahlung im Bestand und Emission langwelliger Strahlung),
- die Aufnahme von Wasser, Nährstoffen und CO<sub>2</sub> in die Pflanzen,
- die Evapotranspiration,
- die Turbulenz (zur Beschreibung der Austauschvorgänge in und über dem Bestand),
- den Fluss von Wasser aus und im Boden und
- die Respiration der Pflanzen (autotroph) und des Bodens (heterotroph).

Die Modellierung der Pflanzenphysiologie von Blatt und Bestand (Wassertransport, Photosynthese, stomatare Regulation) ist bis heute noch nicht abschließend formuliert, obwohl eine Reihe von Ansätzen entwickelt wurde. Im wesentlichen kann man zwei Modellansätze für die Formulierung der Photosynthese unterscheiden. Die eine Gruppe von Modellen beschreibt die Photosynthese unter Berücksichtigung der biochemischen und pflanzenphysiologischen Reaktionen auf Blattebene, um dann die Kohlenstoff- und Wasserbilanz auf Bestandsebene zu integrieren. Die andere Gruppe von Modellen betrachtet den Bestand als eine Einheit („big leaf model“), in der die Photosynthese durch eine sog. Licht-Effizienz (light use efficiency, LUE) charakterisiert werden kann. Die LUE gibt an, wieviel Prozent der absorbierten Sonnenenergie in chemische Energie oder Kohlenstoff umgesetzt werden.

Neben der Unterscheidung, wie die Photosynthese modelliert wird, kann man die meisten Modelle auch danach charakterisieren, ob sie diagnostisch oder auch prognostisch arbeiten. Die diagnostischen Modelle (z. B. C-Fix) benötigen als wesentlichen Parameter die LUE, um aus Satellitendaten wie z.B. dem Anteil der absorbierten Strahlung auf den aktuellen Kohlenstoffumsatz zu schließen. Die prognostischen Modelle sind in der Regel sog. biogeochemi-

sche Prozessmodelle (Production Efficiency Model, PEM), mit deren Hilfe unter Hinzunahme von zukünftigen Klimadaten die Entwicklung der globalen Vegetation berechnet werden kann.

Eines der zur Zeit führenden biogeochemischen Modelle ist das „**Lund-Potsdam-Jena Dynamic Global Vegetation Model**“ (LPJ-DGVM), das maßgeblich vom Potsdam Institut für Klimafolgenforschung (PIK), dem Max-Planck-Institut für Biogeochemie in Jena und der Universität Lund, Schweden, entwickelt worden ist (SITCH ET AL. 2000). Dieses für globale Anwendungen optimierte Modell teilt die bewachsene Landoberfläche in funktionelle Pflanzentypen ein, deren gekoppelte Prozesse von Photosynthese und Evapotranspiration prozesshaft als Funktion von Temperatur, Niederschlag und einfallender Sonnenstrahlung (photosynthetic active radiation, PAR) beschrieben werden. Das transiente Verhalten der Kohlenstoffvorräte in den verschiedenen Speichern (Holz, Blattwerk, Wurzeln, Streuschicht, Boden) kann mit einer zeitlichen Auflösung von Tagen modelliert werden und gleichzeitig die globale Jahresbilanz des Kohlenstoffkreislaufs erstellt werden. Beim LPJ-Modell können innerhalb jeder Gitterzelle (50 x 50 km) verschiedene funktionelle Pflanzentypen vorkommen, so daß damit die kleinräumige Struktur der europäischen Landoberfläche berücksichtigt werden kann.

Ein anderes, biochemisches Prozessmodell ist das „**Biome Bio Geochemical Cycles**“ - Modell (Biome-BGC), das an der Schule für Forstwissenschaften der Universität von Montana entwickelt worden ist (THORNTON 1998; RUNNING ET AL. 1991). Dieses Modell berechnet die Flüsse und die Speicherung von Wasser, Kohlenstoff und Stickstoff innerhalb eines terrestrischen Ökosystems. Dabei werden die Kompartimente Boden (unter Berücksichtigung des Wurzelraums) und Pflanze (inklusive Blätter und Holz) unterschieden und die verschiedenen Wechselwirkungen modelliert. Das Modell benötigt meteorologische Eingangsdaten wie Temperatur, Niederschlag, Luftfeuchte und eingestrahlt Licht als Tagesmittelwerte sowie die Tageslänge. Für die Beschreibung der physiologischen Vorgänge in der Vegetation wird eine große Zahl an Parametern benötigt, die anhand von Literaturangaben und statistischen Analysen beschafft wurden. So gehen z.B. in das Modell Größen wie Vegetationstyp, das C/N - Verhältnis der Biomasse, die maximale stomatäre Leitfähigkeit oder die Allokationsverhältnisse ein. Auch der Boden jedes Ökosystems wird im „Biome-BGC“-Modell detailliert beschrieben. Parameter wie z.B. die Duchwurzelungstiefe, die Bodentextur, der Kohlenstoff- und Stickstoffgehalt, die Bodenalbedo und die atmosphärische Stickstoffdeposition werden als Startwerte vom Modell benötigt.

Ein einfacheres Modell zur großräumigen Beschreibung der Netto-Primärproduktion ist das diagnostische C-Fix Modell (VEROUSTRAETE ET AL., 1994), das unter Hinzunahme von NOAA-AVHRR Daten (VEROUSTRAETE ET AL., 1996) zur Abschätzung der Nettoprimärproduktion von Europa für die Periode 1992 –1993 genutzt wurde (SABBE ET AL., 1999). Einen ähnlichen Ansatz der Kopplung von diagnostischem Modell und Nutzung von Fernerkundungsdaten verfolgten MAISONGRANDE ET AL. (1995). Im Folgenden werden kurz die grundlegenden, vereinfachten Formeln des C-Fix Modells vorgestellt, die auf dem Ansatz von KUMAR & MONTEITH (1988) basieren.

Für die Bruttoprimärproduktion (GPP) gilt:

$$GPP = LUE * APAR \quad (1)$$



mit:  
GPP: Brutto Primärproduktion [gC / Tag / m<sup>2</sup> ]  
LUE: Light Use Efficiency [gC / MJ ]  
APAR: Absorbierte Photosynthetisch Aktive Strahlung [MJ / Tag / m<sup>2</sup> ]

Für die Netto-Primärproduktion (NPP) gilt:

$$NPP = GPP - R_a \quad (2)$$

mit:  
NPP: Netto Primärproduktion [gC / Tag / m<sup>2</sup> ]  
R<sub>a</sub>: Autotrophe Atmung [gC / Tag / m<sup>2</sup> ]

Die absorbierte photosynthetisch aktive Strahlung APAR lässt sich definieren als:

$$APAR = FAPAR * PAR \quad (3)$$

wobei FAPAR der Anteil der von der Vegetation absorbierbaren Strahlung ist (gegeben als dimensionslose Grösse zwischen 0 und 1) und PAR die photosynthetisch aktive Strahlung beschreibt. Im einfachsten Fall lässt sich die „Licht-Effizienz“ (LUE) schreiben als:

$$LUE = stress * conv \quad (4)$$

wobei der Term „conv“ die Umsetzung der absorbierten Energie in Kohlenstoff unter optimalen Umweltbedingungen beschreibt (z.B. optimale Temperatur, kein Nährstoff- oder Wasserstress). Zur Berücksichtigung von wachstumslimitierenden Einflüssen wird allgemein ein Stressfaktor „stress“ eingeführt, der als dimensionslose Grösse zwischen 0 und 1 skaliert werden muss. Ohne auf weitere Einzelheiten einzugehen, sei angemerkt, dass „stress“ z.B. auch die Abhängigkeit der „Licht-Effizienz“ von der Umgebungstemperatur, vom CO<sub>2</sub> – Gehalt der Atmosphäre oder dem eingestrahlenen Licht enthält.

Die Parameter, zu denen Fernerkundungsdaten wesentliche Beiträge liefern können, sind in erster Linie FAPAR und PAR. Diese soll in den nächsten beiden Kapiteln näher erläutert werden.

### 3 Ableitung von FAPAR

#### 3.1 Berechnung auf der Basis von Vegetationsindices

Der absorbierte Anteil der photosynthetisch aktiven Strahlung FAPAR ist ein zentraler Parameter in der Ökosystemmodellierung. In der Literatur finden sich zahlreiche Arbeiten, in denen die Zusammenhänge zwischen spektralen Vegetationsindices und FAPAR untersucht wurden. Als wesentliches Ergebnis dieser Analysen zeigt sich, dass zwischen beiden Größen ein nahezu linearer Zusammenhang besteht, der für verschiedene Vegetationsklassen jeweils spezifisch ist (z.B. ASRAR ET AL., 1984, SELLERS, 1985, MYNENI & WILLIAMS, 1994, SELLERS ET AL., 1996). In Abbildung 1 ist dieser Zusammenhang exemplarisch dargestellt.

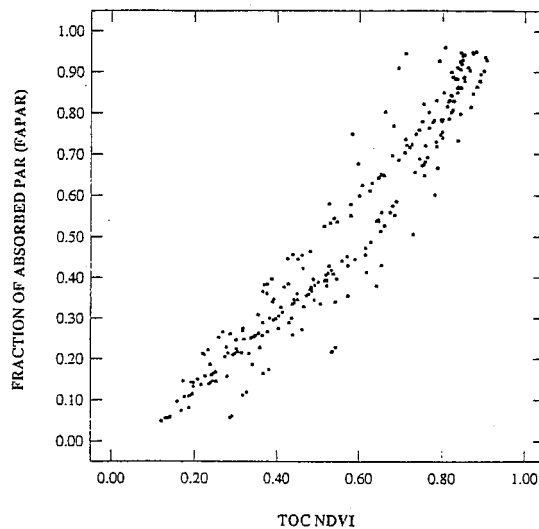


Abb. 1: Beziehung zwischen FAPAR und NDVI (Quelle: MYNENI & WILLIAMS, 1994)

Nach SELLERS ET AL. (1996) besteht zwischen FAPAR und NDVI folgender Zusammenhang:

$$FAPAR = \frac{\left( \frac{1 + NDVI}{1 - NDVI} - \frac{1 + NDVI_{2\%,i}}{1 - NDVI_{2\%,i}} \right) (FAPAR_{\max} - FAPAR_{\min})}{\frac{1 + NDVI_{98\%,i}}{1 - NDVI_{98\%,i}} - \frac{1 + NDVI_{2\%,i}}{1 - NDVI_{2\%,i}}} + FAPAR_{\min} \quad (5)$$

mit:

NDVI<sub>98%,i</sub> = 98%-Quantil der NDVI-Verteilung für die Vegetationsklasse i;  
repräsentiert maximale Vegetationsdichte und -aktivität

NDVI<sub>2%,i</sub> = 2%-Quantil der NDVI-Verteilung für die Vegetationsklasse i;  
repräsentiert keine Aktivität der Vegetation

FAPAR<sub>max</sub> = 0,950 (FAPAR-Wert für dichte Vegetationsdecke und maximale Aktivität)

FAPAR<sub>min</sub> = 0,001 (FAPAR-Wert für fehlende Vegetationsaktivität)

Dabei werden auf der Basis einer Landbedeckungsklassifikation statistische Kenngrößen berechnet, die für die jeweiligen Vegetationstypen spezifisch sind. Die Ermittlung von FAPAR beruht auf der Bestimmung der minimalen bzw. maximalen NDVI-Werte, die statistisch über das 2%- bzw. 98%-Quantil der NDVI-Verteilung je Landbedeckungsklasse ermittelt werden. Da die Vegetationsdecke in der Regel nicht mehr als ca. 95% der einfallenden PAR zum Betreiben der Photosynthese absorbiert, wird der Wertebereich für FAPAR auf 0 bis 0.95 festgelegt.

### 3.2 FAPAR-Ableitung aus NOAA/AVHRR

Seit Anfang 1994 wird am Deutschen Fernerkundungsdatenzentrum (DFD) der NDVI operationell aus NOAA/AVHRR-Daten abgeleitet (Abbildung 2). Neben den sogenannten Tageskompositen, die sich aus den drei Tagesüberflügen des AVHRR-Sensors zusammensetzen, werden auch Wochen- und Monatssynthesen des NDVI berechnet. Aufgrund der konti-

nuierlichen Prozessierung und Archivierung der NDVI-Daten kann inzwischen auf eine lang-jährige Datenreihe zurückgegriffen werden.

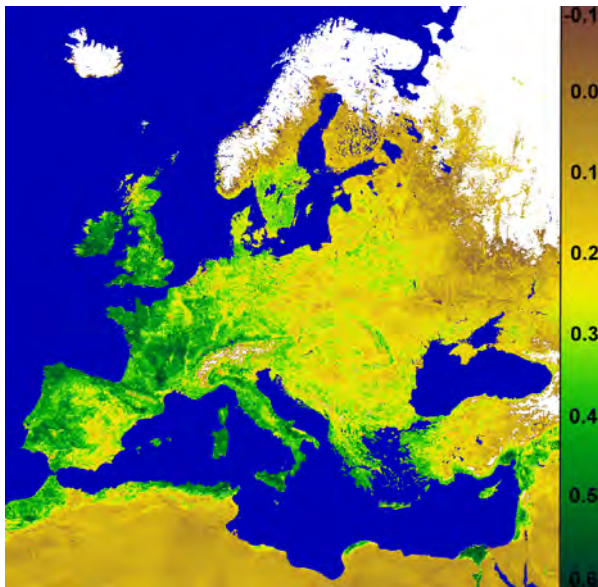


Abb. 2: NDVI-Karte von Europa für März 1997

Im Folgenden wird die Ableitung von FAPAR für das Gebiet von Deutschland beschrieben. Die Ergebnisse basieren auf Arbeiten, die am DFD durchgeführt wurden (PREUSSER, 1998, PREUSSER ET AL., 2000) und neben der Bestimmung von FAPAR die Ableitung des Blattflächenindex als Eingabegröße für ein biogenes Emissionskataster zum Ziel hatten.

Als Datenbasis wurde eine NDVI-Zeitreihe (Tageskomposite) von 1996 verwendet. Bei der Ableitung von FAPAR aus dem NDVI sind verschiedene Korrekturen durchzuführen. Zu diesen Störgrößen, die die Qualität der NDVI-Datenbasis teilweise erheblich beeinträchtigen können, zählen v.a. der Einfluss spektraler Eigenschaften des Bodens, bedingt durch seine Beschaffenheit und seinen Feuchtigkeitsgehalt, Winkelbedingungen zwischen Sonne, Sensor und betrachtetem Objekt, Wolken und Wolkenschatten, atmosphärische Einflüsse, verursacht durch Absorptions- und Reflexionseffekte an Ozon, Wasserdampf, Aerosolen und Molekülen, anisotropes Reflexionsverhalten der Erdoberfläche (BRDF) sowie die endliche Positioniergenauigkeit des Sensors. Diese Fehlerquellen lassen sich mit Hilfe eines Atmosphären- und BRDF-Korrekturverfahrens, das jedoch im Untersuchungszeitraum nicht verfügbar war, reduzieren. Aus diesem Grund wurden in einem ersten Schritt die NDVI-Tageskomposite unter Berücksichtigung ähnlicher Aufnahmegeometrien synthetisiert. Um Datenlücken aufgrund von Bewölkung zu schließen und Störeffekte in der NDVI-Zeitreihe zu minimieren, wurde ein Spektralanalyseverfahren zur Dateninterpolation eingesetzt. Ausserdem wurde eine Sonnenwinkelkorrektur durchgeführt, die die im Jahresverlauf variierenden Beleuchtungsverhältnisse angleicht.

Die für die weiteren Berechnungen erforderlichen Informationen zur Landbedeckung wurden aus den NDVI-Monatskompositen der Jahre 1995-1997 abgeleitet. Der Datensatz ist in Abb. 3 dargestellt (HERMANN, 1998).

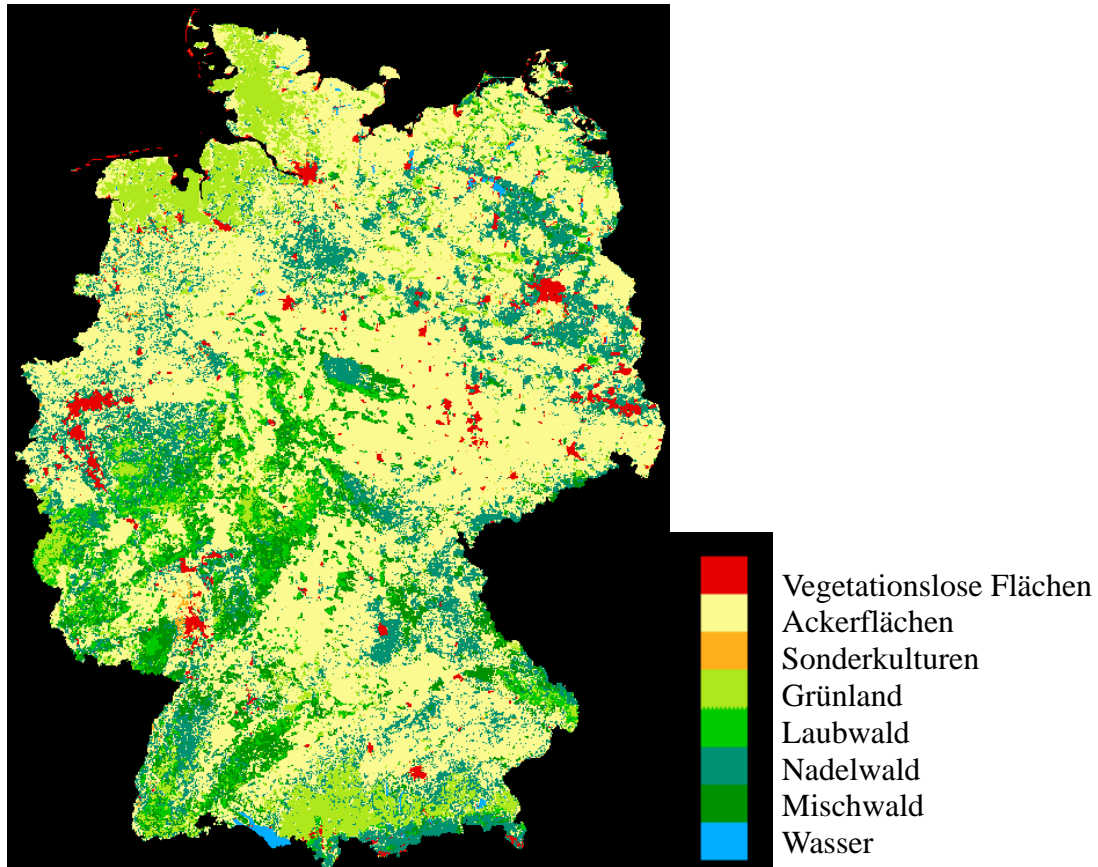


Abb. 3: Landbedeckungsklassifikation von Deutschland

Basierend auf dem Verfahren nach SELLERS ET AL. (1996) wurde daraus eine FAPAR-Zeitreihe für die Vegetationsperiode des Jahres 1996 für das Gebiet von Deutschland berechnet. In Abbildung 4 ist exemplarisch eine FAPAR-Karte für einen Zeitabschnitt wiedergegeben.

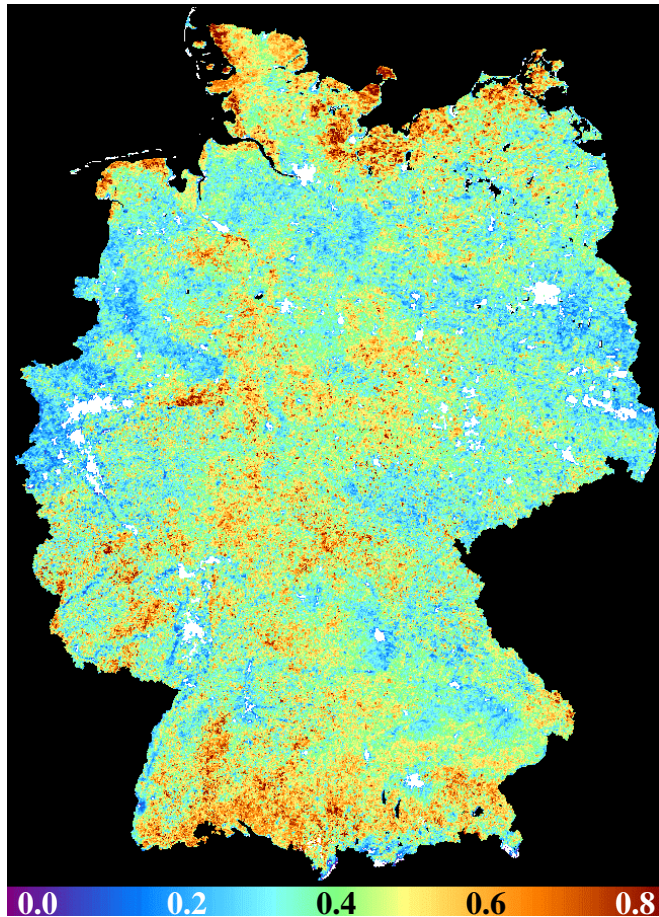


Abb. 4: FAPAR-Karte von Deutschland, 28. Mai – 5. Juni 1996. Jedes Pixel repräsentiert 1x1km. Städte und vegetationslose Flächen sind weiß und Seen sind schwarz dargestellt.

## 4 Ableitung der photosynthetischen Strahlung PAR

Die Eigenschaften der Vegetation und das zeitliche Verhalten der Kohlenstoffspeicher in Pflanzen und Boden hängen entscheidend von den meteorologischen Bedingungen ab. Selbst bei konstanter grüner Blattmasse hängt der Umsatz von  $\text{CO}_2$  von Temperatur, Niederschlag und einfallender Strahlung ab. Aus diesem Grunde sind meteorologische Daten sehr wichtige Antriebsdaten für Ökosystemmodelle.

Wie schon erwähnt, ist die photosynthetisch aktive Strahlung (PAR) ein bestimmender Parameter für die Abschätzung der Netto-Primärproduktion. PAR ist definiert als die abwärts gerichtete diffuse und direkte kurzwellige Strahlung, die von Pflanzen absorbiert werden kann. PAR ist im Wellenlängenbereich von 400 nm bis 700 nm definiert.

Bei vielen Modellen wird PAR aus der Globalstrahlung berechnet, die im Wellenlängenbereich von 400 nm bis 2.7  $\mu\text{m}$  definiert ist. Dabei wird häufig angenommen, dass PAR zu etwa 50% zur Globalstrahlung beiträgt (MCCREE 1972). Detailliertere Untersuchungen zeigen jedoch, dass dieser „konstante“ Faktor z.B. vom Sonnenstand, von den atmosphärischen Bedingungen wie Ozon-, Wasserdampf- und Aerosolgehalt oder der Bewölkung abhängt.

Daneben gehen viele prognostischen Modelle davon aus, dass der Tagesgang der einfallenden Strahlung einen sinusförmigen Verlauf hat, dessen gesamte, eingestrahlte Energie aus den Daten der minimalen, maximalen und mittleren Temperatur sowie der Tageslänge skaliert werden kann. Es wird in vielen Modellläufen daher keine Bewölkung berücksichtigt. Erst SUPIT & VAN KAPPLER (1998) haben ein einfaches Verfahren zur Ableitung der Globalstrahlung entwickelt, das neben der minimalen und maximalen Temperatur eines Tages auch den mittleren Bewölkungsgrad eines Tages berücksichtigt.

Es wird das Ziel der künftigen Arbeiten sein, die aktuellen atmosphärischen Bedingungen aus Fernerkundungsdaten abzuleiten, um die Genauigkeit des aktuellen PAR zu erhöhen. Nach Start des operationellen Wettersatelliten METEOSAT Second Generation (MSG) mit dem Sensor SEVIRI an Bord wird es voraussichtlich ab 2003 möglich sein, alle 15 Minuten mit einer räumlichen Auflösung von etwa 5 km für Europa PAR zu bestimmen.

## 5 Ausblick

In Zusammenarbeit mit dem Potsdam Institut für Klimafolgenforschung (PIK) ist ein Projekt geplant, das die routinemäßige Erstellung einer jährlichen Bilanz der deutschen und europäischen Landoberfläche zum Ziel hat. Dieses Vorhaben basiert zum einen auf dem biogeochemischen Prozessmodell LPJ der Vegetation und des Bodens, das am PIK weiterentwickelt und auf die europäische Landoberfläche angepasst werden soll. Zum anderen liefern die operationellen Datenströme der Satellitenfernerkundung, die am DFD empfangen werden, die wesentliche Grundlage für die Ableitung der erforderlichen Vegetationsparameter und ihrer räumlichen und zeitlichen Variation. Damit soll die Basis für ein operationelles System zum fortlaufenden Monitoring der Kohlenstoffflüsse der Landoberfläche entwickelt werden.

Die Ableitung der Vegetationsparameter soll dabei auf mehreren Sensoren basieren. Die zentrale Rolle für die Bestimmung der jahreszeitlichen Entwicklung der Vegetation in Form von FAPAR-Zeitserien kommt dabei dem Sensor MODIS auf dem Satelliten Terra zu. Seit Januar 2001 empfängt und verarbeitet das DFD täglich operationell diese Daten mit einem Überdeckungsbereich von Europa. Ergänzend hierzu sollen im weiteren Verlauf des Projekts die Daten des Sensors MERIS auf der ENVISAT-Plattform eingesetzt werden, deren Start für den Oktober 2001 vorgesehen ist. Für die Berechnung der Vegetationsparameter aus den zurückliegenden Jahren soll auf die Archivdaten des AVHRR zurückgegriffen werden und eine entsprechende Aufbereitung erfolgen. Schließlich soll in Teilgebieten auch hochaufgelöste Daten von Landsat 7 in das System einbezogen werden, um eine detaillierte Klassifikation der Landnutzung vorzunehmen.

Es wird angestrebt, mit diesem Projekt eine Basis für ein operationelles System zu schaffen, das zur Erfüllung der deutschen und europäischen Berichtspflicht im Rahmen des Kyoto-Protokolls und seiner Nachfolgevereinbarungen beitragen kann. Produzierte Daten sind u.a. die jährliche Nettoprimärproduktion, die Respiration des Bodens und die Nettoökosystemproduktion. Ausserdem sind neue Einsichten zu erwarten, was die räumlichen und zeitlichen Strukturen und die interannuelle Variabilität der Kohlenstoffflüsse der europäischen Landoberfläche betrifft.

## 6 Literaturverzeichnis

- ASRAR, G., FUCHS, M., KANEMASU, E.T. & J.L. HATFIELD (1984): Estimating absorbed photosynthetic radiation and leaf area index from spectral reflectance in wheat. - *Agronomy Journal*, **76**, p. 300-306.
- CRAMER, W. & FIELD, C. B. (1999): The Potsdam NPP model intercomparison. - *Global Change Biology*, **5**, Supp. 1, Blackwell Science Ltd., 76 pp.
- HERMANN, N. (1998): Verfahren zur Ableitung der Landbedeckung von Deutschland aus NDVI-Zeitreihen. Diplomarbeit an der Johannes-Gutenberg Universität Mainz.
- KUMAR, M. & MONTEITH, J. L. (1981): Remote sensing of crop growth. - In: *Plants and the Daylight Spectrum*, Smith, H., eds., Academic Press, San Diego, California, p. 133-144.
- LIETH, H. (1975): Modelling the primary production of the world. - In: *Primary Productivity of the Biosphere*; Lieth, H. & Whittaker R.H. eds., Springer-Verlag, Berlin, p. 237 – 263.
- MAISONGRANDE, P., RUIMY, A., DEDIEU, G. & SAUGIER, B. (1995): Monitoring seasonal and interannual variations of gross primary productivity, net primary productivity and ecosystem productivity using a diagnostic model and remotely sensed data, - *Tellus* **47(B)**, p. 178 - 190.
- MCCREE, K.J. (1972): Test of current definitions of photosynthetically active radiation against leaf photosynthesis data. - *Agricultural Meteorology*, **10**, p. 442-453.
- MOORE, B., BOONE, R.D., & HOBBI, R.A. (1981): A simple model for analysis of the role of terrestrial ecosystems in the global carbon budget. - In: *Carbon Cycle Modelling*; Bolin, B. ed., Wiley & Sons, New York, p. 365-385.
- MYNENI, R. B. & WILLIAMS, D.L. (1994): On the relationship between FAPAR and NDVI. - *Remote Sensing of Environment*, **49**, p. 200-211.
- PREUSSER, C. (1998): Ermittlung des Blattflächenindex aus AVHRR-NDVI-Zeitreihen – Ein Beitrag zur Entwicklung eines biogenen Emissionskatasters. Diplomarbeit an der Kath. Universität Eichstätt.
- PREUSSER, C., DECH, S., TUNGALAGSAIKHAN, P., ERBERTSEDER, T. & MEISNER, R. (2000): Ableitung biophysikalischer Parameter aus NOAA/AVHRR-Daten. *Petermanns Geographische Mitteilungen*, **144**, 2000/3, p. 28-35.
- RUNNING, S.W. & GOWER, S.T. (1991): FOREST BGC, A general model of forest ecosystem processes for regional applications II. Dynamic carbon allocation and nitrogen budgets. - *Tree Physiology*, **9**, p. 147-160.
- SABBE, H., EERENS, H. & VEROUSTRAETE, F. (1999): Estimation of the carbon balance of European terrestrial ecosystems by means of the C-Fix model. - In: *Proceedings of 'The 1999 EUMETSAT Meteorological Satellite Data Users' Conference*, p. 271-278, Copenhagen, 6 –10 September 1999.
- SCHIMMEL, D.S. (1995): Terrestrial ecosystems and the carbon cycle. *Global Change Biology*, **1**, p. 77-91.
- SELLERS, P.J. (1985): Canopy reflectance, photosynthesis and transpiration. - *International Journal of Remote Sensing*, **15**, p. 123-143.
- SELLERS, P.J., TUCKER, C.J., COLLATZ, G.L., LOS, S.O., JUSTICE, C.O., DAZLICH, D.A. & D.A. RANDALL (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**, p. 706-737.
- SITCH, S., PRENTICE, I.C., SMITH, B., CRAMER, W., KAPLAN, J., LUCHT, W., SYKES, M., THONICKE, K., & VENEVSKY, S. (2000): LPJ - A coupled model of vegetation dynamics and the terrestrial carbon cycle, - In: *Sitch, S., The role of vegetation*

- dynamics in the control of atmospheric CO<sub>2</sub> content, Dissertation, Lund University, Lund, Sweden, 2000.
- SUPIT, I. & VAN KAPPLER, R. R. (1998): A simple method to estimate global radiation. - *Solar Energy*, **63**, 3, p. 147-160.
- THORNTON, P. E. (1998): Regional ecosystem simulation: combining surface- and satellite-based observations to study linkages between terrestrial energy and mass budgets. - Ph.D. Thesis, The University of Montana, Missoula, 280 pp.
- VEROUSTRAETE, F., PATYN, J. & MYNENI, R. B. (1994): Forcing of a simple ecosystem model with FAPAR and climatic data to estimate regional scale photosynthetic assimilation. - In: *Vegetation, Modelling and Climate Change Effects*, eds. Veroustraete F. et al., p. 151-177, The Hague, The Netherlands, (Academic Publishing).
- VEROUSTRAETE, F., PATYN, J. & MYNENI, R. B. (1996): Estimating net ecosystem exchange of carbon using the Normalised Difference Vegetation Index and an ecosystem model. - *Remote Sensing of Environment*, 58, p. 115-130.



# Visuelle Interpretation von Fernerkundungsdaten, neu ergriffen

RALF DONNER<sup>1</sup>

*Der Beitrag beschäftigt sich mit der visuellen Wahrnehmung von Fernerkundungsdaten. Zunächst wird die beherrschende Rolle Wahrnehmungsmustern hervorgehoben. Dies hat auch Konsequenzen für die eigenen Untersuchungen. Im Hauptteil wird die Integration der verschiedenartigen Sinnesvorgänge zu einer Gesamtgestalt dargestellt. Als Konsequenz wird gefordert, zwischen wahrnehmen und urteilen zu differenzieren und Wahrnehmung und Messung als Zugänge zur begrifflichen Erfassung der Wirklichkeit anzusehen, die sich ergänzende Seiten dieser Wirklichkeit offenbaren.*

## 1 Einleitung

Die visuelle Interpretation ist Ausgangspunkt und Gültigkeitskriterium der Methode Fernerkundung. Das allein ist Grund genug für ihre methodische Untersuchung. So, wie zu jedem Maß eine Genauigkeitsangabe gehört, ist jede wissenschaftliche Methode hinsichtlich ihrer Eignung kritisch zu prüfen. Diese Untersuchung soll hier für die Wahrnehmung stellvertretend am Beispiel der für die Fernerkundung zentralen Gesichtswahrnehmung erfolgen.

## 2 Denkmuster

Die bekannten Umkehrbilder (ein Beispiel ist in Abbildung 1 gegeben) machen deutlich, dass das, was wir sehen, abhängig ist, von dem Interpretationsmuster, das wir an die Sinnesempfindung herantragen. Im Beispiel lässt sich das physikalisch identische Objekt sowohl als Vase als auch als zwei gegenüberstehende Gesichter interpretieren. Das Wahrnehmungs- oder Interpretationsmuster ist also für das, was wahrgenommen wird *konstitutiv*. Im Alltag wird zweckmäßigerweise auf in der vergangenen Lebensgeschichte gebildete Wahrnehmungsmuster zurückgegriffen. Dadurch wird es möglich, sehr schnell von ihrer sinnlichen Erscheinung her bekannte Objekte zu erkennen. Solange das Interpretationsmuster fehlt, kann nichts erkannt werden. Dies kann an dem in Abbildung 2 gegebenen Bild erfahren werden. Beim erstmaligen Betrachten wird es eine Weile dauern, bis das Dargestellte erkannt wird. Auch in Abbildung 3 finden Sie nichts, solange Sie keine Orientierung haben, was Sie suchen sollen. Erst wenn zumindest hypothetisch eine Suchfigur angenommen wird, kann - vermittelt durch das Vorstellungsvermögen - das Gesuchte gefunden werden.

---

<sup>1</sup> Technische Universität Bergakademie Freiberg Fakultät für Geowissenschaften, Geotechnik und Bergbau, Agricolastraße 1, 09599 Freiberg, Email: [Ralf.Donner@mabb.tu-freiberg.de](mailto:Ralf.Donner@mabb.tu-freiberg.de)

Zielt die Interpretation von Fernerkundungsdaten auf die Erfassung von Daten (Was ist wo?) werden die zu suchenden Objekte anhand von Interpretationsschlüsseln oder anhand von aus Mustern abgeleiteten Parametersätzen vorgegeben. Durch diese Formalisierung wird eine Vergleichbarkeit der von verschiedenen Interpreten erzeugten Ergebnisse erreicht.

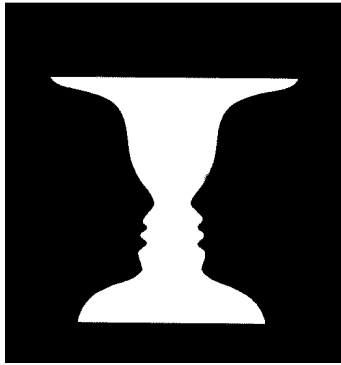


Abbildung 1 Umkehrbild: Vase oder Gesichter? (oben)

Abbildung 2 Versuchen Sie zunächst, das Bild ohne Hilfestellung zu erkennen!. Wenn es nicht gelingt, suchen Sie einen Frühlingsmonat auf Englisch. (unten)

Abbildung 3 Vexierbild. Suchen Sie – zunächst ohne zu wissen, was Sie suchen sollen! Wenn Sie nichts finden, suchen Sie den Bauern. (rechts)

### 3 Neue Denkmuster bilden

Die Fernerkundung bietet den Vorzug, Gebiete in großen räumlichen Zusammenhängen abzubilden. Um nun mit Hilfe dieser neuen Möglichkeit tatsächlich *Neues* zu beobachten, genügt es nicht, die vom Boden her bekannten Phänomene aus der Höhe wiederzuerkennen. Neue Wahrnehmungsmuster müssen gebildet, erlernt werden. Andernfalls sieht man nur, was man schon weiß. Die Bildung des zur aktuellen Wahrnehmung passenden Begriffes steht im Mittelpunkt des folgenden Abschnittes.

### 4 Wie kann Wahrnehmung heute gedacht werden?

Beim Betrachten eines Bildes tastet die Gesichtslinie das Beobachtungsobjekt ab. Zwischen den sprunghaften Bewegungen des Auges, den Sakkaden, fällt das Licht des für Bruchteile einer Sekunde fixierten Punktes durch die Pupille auf die Mitte der Netzhautgrube (*fovea centralis*), der Stelle des deutlichsten Sehens. Die Reize stammen von kreuz und quer verteilten Orten des Objektes. Die Reizwahrnehmung, Perzeption genannt, bleibt als erste Stufe der

Erkenntnis ohne Bewusstwerdung. Sie regt einen Denkprozess an, der die Steuerung der Aufmerksamkeit, die Gliederung der Empfindungen in Vorder- und Hintergrund, die Hervorhebung von Einzelheiten sowie die Anordnung der Einzelempfindungen zu einer geschlossenen Gestalt insgesamt übernimmt. Das Denken setzt sofort mit den ersten Sinnesreizen ein, so dass von einer Gleichzeitigkeit von Empfinden und Denken gesprochen werden muss. Der Prozess endet mit dem Bewusstwerden (Apperzeption) eines klaren Erlebnis-, Wahrnehmungs- oder Denkinhaltes. Das Ergebnis dieses Gliederungs- und Ordnungsprozesses ist die *Erkenntnis* des Wahrgenommenen. Sie ist das Resultat der Verknüpfung des vom Denken bereit gestellten Interpretationsmusters mit den entsprechend diesem Muster zu einer ganzen Gestalt geordneten Empfindungen. Sucht man in der wahrnehmungspsychologischen Literatur nach Erklärungsansätzen, stößt man auf eine kaum zu überschauende Vielfalt. Folgt man dem Lehrbuch von GOLDSTEIN (1998), lässt sich als Gemeinsamkeit erkennen, dass einzelne Sinnesreize zu einer ganzen Gestalt zusammengesetzt werden.

Anhand des Umkehrbildes (Abbildung 1), man erkennt eine Vase oder zwei Gesichter in Abhängigkeit des verwendeten Wahrnehmungsmusters, wurde bereits dargestellt, dass das zur Interpretation verwendete Wahrnehmungsmuster starken Einfluss auf das Ergebnis nimmt. Ideal wäre aus dieser Sicht eine Wahrnehmung, die frei wäre von im Voraus gesetzten Denkmustern, Vor-Urteilen, da das Verhältnis von Wahrnehmung und Theorie nicht komplementär ist, sondern konstitutiv, wie das Beispiel der Umkehrbilder zeigt. Dies gilt nun nicht nur für die visuelle Objekterkennung, sondern für den Erkenntnisvorgang schlechthin<sup>2</sup>. Um Fehlinterpretationen, die durch die Übertragung eines sachfremden Denkmusters hervorgerufen werden, auch in Bezug auf den Wahrnehmungsvorgang selbst gering zu halten, beziehe ich mich auf die in zweiter Auflage erschienene Dissertation von HANS-JÜRGEN SCHEURLE (1984), da er von einem voraussetzungsfreien Ansatz ausgeht. Die Voraussetzungslosigkeit seines Ansatzes führt neben anderem zu Abgrenzungen der Sinneserfahrungen des Sehens, Hörens, Tastens, Schmeckens, der Wärme, des Wohlbefindens, der Bewegung, des Gleichgewichtes. Die genannten Sinneserlebnisse lassen sich nicht gegenseitig ersetzen: Die Erfahrung der Farbe Rot kann nicht durch andere Wahrnehmungsmodalitäten ersetzt werden.

Das Vermögen, aus den Sinnesvorgängen eine (bisher nicht gedachte) begriffliche Ganzheit zu bilden, also anlässlich einer Wahrnehmung einen (neuen) Gedanken zu bilden, fußt auf den in den folgenden Unterabschnitten dargestellten Fähigkeiten.

## 4.1 Synästhesie

Aus den nacheinander abgetasteten Teilen des Sehraumes wird unter Auswahl, Hervorhebung, Teilung in Vorder- und Hintergrund ein konsistenter Gesamteindruck gebildet. Für das Zustandekommen des Gesamteindruckes sind nicht nur, wie vielfach angenommen, die von den Augen vermittelten Sinnesvorgänge miteinander verwoben, sondern Vorgänge der verschiedenen Sinnesmodalitäten wie Hören, Sehen, Tasten, Wärme empfinden beteiligt. Die Grundlage der Verbindung der verschiedenartigen, ganz einmaligen Sinneserfahrungen sind

---

<sup>2</sup> THOMAS S. KUHN (1962) hat den Einfluss von Denkmustern auf die Erkenntnis im Verlauf der Wissenschaftsgeschichte dargestellt. Die Denkmuster bezeichnet er als Paradigmen.

Korrespondenzen (oder Synästhesien) zwischen ihnen. Einige, der für das Sehen relevanten Synästhesien sind:

- Sehen – Tasten: Der Sehstrahl tastet das Objekt nacheinander ab.
- Sehen – Hören: Damit ist eine Ähnlichkeit der Empfindung des Seh- und des Hörsinnes angesprochen, wie sie beispielsweise mit dem Wort von „schreienden Farben“ bezeichnet werden.
- Sehen – Wärme empfinden: Bekanntlich korrespondieren bestimmte Blautöne mit einer Kälteempfindung, Rottöne eher mit einer Wärmeempfindung.
- Sehsinn – Gleichgewichtssinn: Um etwas als waagrecht oder als aufrecht zu sehen, bedarf es des Gleichgewichtssinnes.
- Sehen – Lebenssinn. Der Lebenssinn ermöglicht die Erfahrung des Wohlbefindens oder des Schmerzes. Die Korrespondenz zwischen Wohlbefinden und Sehen wird bei der Betrachtung schöner Dinge nachvollziehbar. Die Farbtherapie nutzt diese Synästhesie für die Heilung.
- Sehen – Bewegung wahrnehmen: Der Sehen von Formen bedarf der Augenbewegung. Eine eigene Erfahrung dieses Zusammenhanges ist mit Abbildung 4 zu gewinnen.

Wie sehr die in das Bewusstsein tretende Erkenntnis aus einer echten *Neuschöpfung* der einzelnen Sinnesvorgänge hervorgeht, zeigt ein bei LUTZKER (1996) wiedergegebener Versuch. Den Probanden wurde ein Gesicht gezeigt, das den Buchstaben „B“ spricht. Gleichzeitig war das „G“ zu hören. Die Probanden waren sich sicher, ein „D“ wahrgenommen zu haben. Das Wahrnehmungsvermögen schuf aus den Sinnesvorgängen eine neue, nicht aus den Teilen ableitbare Ganzheit. Andere Versuche legen nahe, dass Synästhesie eine Grundvoraussetzung von Wahrnehmung überhaupt ist, dass Wahrnehmung einer einzigen Sinnesmodalität nicht möglich ist. Die Vielzahl der mit dem Sehen verbundenen Sinnesmodalitäten lässt weiterhin vermuten, dass an Wahrnehmung *alle* Sinne beteiligt sind. Allein die Ausrichtung der Aufmerksamkeit auf das Sehen oder Hören oder auf die Veränderung usw. hebt besondere Aspekte deutlicher gegenüber anderen hervor.

## 4.2 Relativität der Wahrnehmung

Die Abhängigkeit eines Farbeindrucks von der Umgebung ist genauso bekannt, wie die unterschiedliche Wärmeempfindung der in lauwarmes Wasser gehaltenen Hände, nachdem zuvor eine Hand im warmen, die andere im kalten Wasser war. Wahrnehmung, das kann aus den Beispielen deutlich werden, ist relativ und auf den Kontext bezogen. Sowohl räumlich als auch zeitlich. Keine Wahrnehmung, die punkthaft wäre, ist möglich. Diese Kontextbezogenheit der Wahrnehmung führt beispielsweise zum Effekt der farbigen Schatten: Wenn der Schatten eines farbig beleuchteten Gegenstandes von neutralem Licht beleuchtet wird, erscheint der Schatten in einer anderen Farbe. Edwin Land fand für diesen Effekt eine überzeugende Begründung anhand eines Versuches, bei dem weißes Papier grün beleuchtet und grünes Papier weiß beleuchtet wurde. Beides konnte von Versuchspersonen jeweils richtig wahrgenommen werden, obwohl die Messung der Wellenlänge des reflektierten Lichtes keine Unterscheidung zeigt. Land erklärt das Phänomen so, „dass das Sehen in den drei Systemen für die Wahrnehmung der Farben Violett, Grün und Gelbrot jeweils die hellste (intensivste) Stelle findet und aus dem Verhältnis dieser drei Stellen Unbunt festlegt. Bei einer rein grünen Beleuchtung steht dem intensiven Grün des einen Systems in den beiden anderen Sys-

temen kaum etwas gegenüber; daher ist hier Grün mit Unbunt identisch. Trotz der farbigen Beleuchtung erscheint ein weißes Blatt daher weiß. Die übrigen Farben werden als Abweichungen zu der jeweiligen Kombinationen für Unbunt bestimmt.“ SCHUHU (2000)

### 4.3 Erkennen als spielerischer Vorgang

Die von den Augen empfangenen Reize lassen für sich betrachtet keine sinnvolle Anordnung erkennen, da der Sehstrahl das Objekt kreuz und quer abtastet. Indem die Anordnung noch nicht bekannt ist, können andererseits auch die Einzelempfindungen nicht in ihrer Bedeutung ermessen werden: Welcher Punkt zum Vorder- oder Hintergrund, welcher Fleck zu einer Kante gehört, oder ob er unwichtig für die Erkenntnis des Objektes ist. Das Dilemma besteht gerade darin, die einzelnen Sinnesvorgänge nicht ordnen zu können, solange das Ganze nicht bekannt ist. Der Gesamtzusammenhang, erscheint erst im Verlauf der Wahrnehmung, sukzessiv oder plötzlich durch Intuition. Andererseits kann das Ganze nicht erfahren werden, wenn die Teile nicht zusammensetzt werden. SCHEURLE vergleicht diese Situation mit der eines Anfängers zu Beginn eines Spieles, der zwar die Spielregeln kennt, beginnen soll zu spielen, aber die Spielsituation nicht hinsichtlich ihrer möglichen Auswirkungen übersehen kann. Er ist gehalten zu handeln, obwohl er die Bedeutung der Situation erst im Nachhinein erfährt. In diesem Prozess der Objekterkennung kann versucht werden, in der Vergangenheit gebildete Wahrnehmungsmuster so zu modifizieren, dass sie mit der aktuellen Erfahrung übereinstimmen. Aus der Vielzahl der bisher bekannten Häuser kann das aktuelle, einmalige Haus ebenfalls als Haus erkannt werden. Es bleibt im konkreten Fall immer offen, ob sich die Wirklichkeit mit den bereits bekannten Wahrnehmungsmustern interpretieren lässt. Ist dies nicht der Fall, tritt eine neue Situation auf, die bekannten Wahrnehmungsmuster müssen verlassen und frei ein neues erstmals gebildet werden. Dieser Vorgang, des erstmaligen Bildens eines neuen Gedankens kann als echtes Lernen bezeichnet werden. Das Ergebnis ist völlig offen, auch Fehlerfolg muss einkalkuliert werden. Ganzheit und Abgrenzung der Teile entstehen *gleichzeitig*. Dieses spielerische Vorgehen ist eine wesentliche Voraussetzung für das Bilden neuer Erkenntnisse.

### 4.4 Polarität der Wahrnehmung

In enger Verbindung mit der dargestellten Relativität der Wahrnehmung steht das Setzen einer Mitte, von der aus die Phänomene als gegensätzliche Pole erscheinen. Die in der Natur erkannten Pole von Anziehung, Abstoßung, oben und unten, warm und kalt usw. gehen einher mit der Polarisierung während der Wahrnehmung. Um einen der beiden Pole als solchen zu erkennen, bedarf es des Gegenübers. Die Bedeutung dieser Fähigkeit für die Wahrnehmung wird ersichtlich, wenn die Trennungen von Vordergrund und Hintergrund, zum Gegenstand gehörig oder nicht, zum Objekt oder zum Subjekt gehörend bedacht werden. Die Erfahrung der Wahrnehmung als polarisierenden Vorgang kann an farbigen Nachbildern besonders gut offensichtlich werden: Die intensive Betrachtung einer blauen Fläche über einige 10 Sekunden wird beim anschließenden Betrachten einer weißen Fläche zu einem Farbeindruck in der Komplementärfarbe, Gelb, führen.

### 4.5 Gestaltwahrnehmung

Die vielleicht aus der Gestalttheorie bekannte Vorstellung, dass die bruchstückhafte aktuelle Wahrnehmung zu einer vollständigen Figur ergänzt wird (Beispiel in Abbildung 5) ist inso-

weit bereits angesprochen, als dass der Begriff die Verflechtung der einzelnen Sinnesvorgänge steuert und eben auch vervollständigt. Ein verdeckter Stuhl kann zu einem ganzen vervollständigt werden, aber auch natürliche Gebilde, wie ein teilweise nicht luftsichtbarer Fluss durchgängig kartiert werden kann. Das Zusammenfügen zu einer Gestalt schließt, wie bereits deutlich werden sollte, die Erfahrungen mehrerer Sinnesmodalitäten ein.

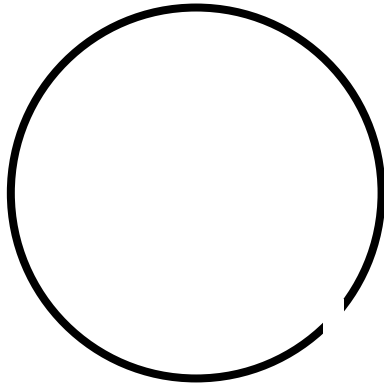


Abbildung 4 Bedeutung der Augenbewegung für die Erfahrung der Formen. (links)

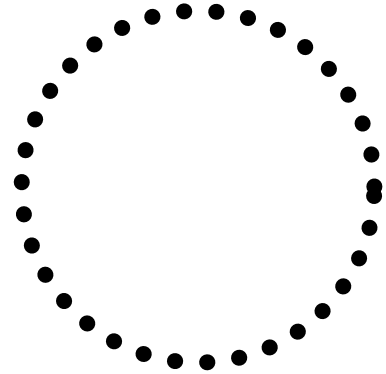


Abbildung 5 Der gedachte Kreis: Der Begriff des Kreises lässt einen Kreis erkennen, wo physikalisch nur Punkte sind. (rechts)

## 4.6 Wahrnehmung als Prozess

In den vergangenen Abschnitten ist die aktive Rolle des Betrachters beim Zustandekommen der Wahrnehmung dargestellt worden. Wahrnehmung ist daher eher als Prozess der Entstehung von Etwas anzusehen als eine (meist nachrichtentechnisch gedachte) Übertragung eines feststehenden Inhaltes. Der zeitliche Aspekt der Wahrnehmung lässt sich bei der Betrachtung einer farbigen Fläche besonders gut erfahren: Das Erleben der Farbfläche befindet sich in ständiger Wandlung. Dieser Prozess wird bei jedem Wechsel der Aufmerksamkeit neu angestoßen und bricht mit der Zuordnung eines Begriffes ab; der Prozess der Wahrnehmung mündet in einer begrifflichen Feststellung. Er wird erst bewusst, wenn etwas nicht sofort Verständliches beobachtet wird, wie beispielsweise ein abstraktes Gemälde in der Kunstaussstellung; oder wenn die *Wirkung* von etwas erkundet werden soll. Diese Art der Betrachtung, auf die Wirkung von etwas zu achten, ist künstlerisch Tätigen tägliche Gewohnheit.

## 4.7 Zusammenfassung

Der sinnliche Eindruck ergibt sich als Ergebnis eines äußerst komplexen Zusammenwirkens verschiedenartiger Sinnesvorgänge. Auch die Gesichtswahrnehmung – beispielsweise eines Luftbildes – wird nicht allein aus den rezeptiven Eigenschaften der Augen verstanden. Für ihr Zustandekommen werden fortwährend Farbempfindung, Bewegungsempfindung, Gleichgewichtsempfindung, Lust- oder Unlustempfindungen, Begriffe, Vorstellungen zu einem sinnvollen Ganzen verknüpft. Das spielerische Herstellen der Ganzheitlichkeit der Wahrnehmung erscheint als Schlüssel für das unvoreingenommene Erkennen neuer Zusammenhänge.

## 5 Ähnlichkeit

Erkennen kann als Zuordnung eines Begriffes zu einer Wahrnehmung angesehen werden. Obwohl ideeller Begriff und sinnliche Wahrnehmung zwei verschiedene Dinge sind, werden sie aufeinander bezogen. Die Grundlage dafür ist die Ähnlichkeit. Ob ein Begriff ein zur Wahrnehmung passendes Interpretationsmuster ist, wird danach entschieden, ob beide in gewisser Hinsicht ähnlich sind. Beim Sehen beispielsweise werden die aktuellen Sinneserfahrungen fortwährend mit aus dem Inneren kommenden Vorstellungen oder Empfindungen verglichen. Das Ergebnis des Vergleichens ist das Feststellen einer Ähnlichkeit oder deren Ablehnung. Das Feststellen der Ähnlichkeit ist ein willentlicher Vorgang, denn stets werden verschiedene Dinge bewusst und vorsätzlich, willentlich, in einem bestimmten Aspekt, miteinander identifiziert.

Der Aspekt, dessen Ähnlichkeit betrachtet wird, ist dabei nicht wie im rationalen Bereich des Denkens formaler Natur, sondern sinnlich-ästhetischer Art. Der Maler Gotthard Graubner beispielsweise vergleicht in seinem tiefroten, gegenstandsfreien Ölbild „vulcano di amore“ die Liebe mit dem Ausbruch eines Vulkans und mit dem Erscheinen der Farbe Rot. Voraussetzung des Vergleichens ist die Ähnlichkeit. In dem Gemälde werden die Wahrnehmungen von Begriffen, Erinnerungen oder Vorstellungen (Liebe und Vulkanausbruch) mit der aktuellen Wahrnehmung der Farbe Rot miteinander identifiziert. Sie werden als einander ähnlich gesetzt. Das, was als Wahrnehmung jeweils erlebt wird, die Empfindungen der drei Dinge, wird miteinander in Beziehung gesetzt. Da zwei Dinge niemals vollständig identisch sind, wird stets Verschiedenartiges miteinander verglichen. Diese Fähigkeit des gestischen, sinnlichen Vergleichens ermöglicht den Vergleich verschiedenartiger Dinge, wie das Beispiel zeigt. Das Setzen der Ähnlichkeit ist auch Voraussetzung für einen formalen Vergleich, denn bevor etwas miteinander verglichen werden kann, muss die Ähnlichkeit hinsichtlich des zu vergleichenden Merkmals festgestellt werden: Äpfel und Birnen können verglichen werden, wenn es um die Anzahl der Früchte geht. Für die Wahrnehmung spielt das Für-ähnlich-halten eine herausragende Rolle.

## 6 Wahrnehmung und Urteil, Wahrnehmung und Messung unterscheiden!

Der nächste, hier zu besprechende Aspekt der Wahrnehmung kann auch als Beispiel dafür gelten, wie sehr die Übernahme nicht ausreichend geprüfter Denkmuster die Wahrnehmung beeinflusst. Sehen wir uns die Bogenstücke in Abbildung 6 an. Sie sind durch Kopieren auseinander hervorgegangen. Sie scheinen, jedes für sich betrachtet, die selbe Größe und Form zu haben. Sehen wir uns zwei direkt untereinander liegende Bogenstücke an, und achten nur auf dieses Paar, gegebenenfalls durch Abdecken der anderen, dann stellt sich der Eindruck ein, die Bögen würden differieren. In Abbildung 7 sehen wir oben einerseits ein Paar etwa gleich langer paralleler Geraden und zwei Teile einer unterbrochenen Geraden. Ändern wir nun die Anordnung des Parallelenpaares gegenüber der unterbrochenen Gerade, stellt sich der Eindruck ein, die zwei Teile der unterbrochenen Gerade wären gegeneinander verdreht worden, sie lägen nicht auf einer gemeinsamen Gerade. Zahlreiche weitere, gleichermaßen bekannte, vor allem geometrische oder farbliche Beispiele könnten folgen. Wir können zwischen den verschiedenen Anordnungen Differenzen beobachten. Und, wenn zur Kontrolle gemessen werden würde, müssten wir eine Differenz zwischen der Wahrnehmung (bei Ab-

bildung 6: ungleiche Bogenlängen, bei Abbildung 7 Abweichung von der Geraden) und der Messung (gleich große Bogenlängen, zwei Teile einer Geraden) konstatieren. Wir könnten in Anlehnung an das Psychologische Wörterbuch von DORSCH (1991), bezogen auf Abbildung 7 schließen: Ursache der Versetzung dieses Geradenstückes ist die Einordnung des versetzten Teiles in den figuralen Zusammenhang, der die Wahrnehmung des Ganzen bestimmt.<sup>3</sup> Aufgrund der Wiederholung der Erfahrung bei zahlreichen anderen Bildern verallgemeinere ich: Es besteht, zumindest in einigen Fällen, eine Differenz zwischen dem Wahrnehmungseindruck eines figuralen Ensembles und ihren getrennt beobachteten Teilen. Eine Bedingung, solche Differenzen aufzufinden ist es, dass die Gültigkeit eines Begriffes auf verschiedene Weise beurteilt werden kann, beispielsweise wahrnehmend und messend. Weil ich sowohl visuell wahrnehmen kann, ob die beiden Geradenstücke in Verlängerung zueinander liegen, ob die Bögen gleich groß sind, als ich auch messend die Geradlinigkeit und die Größe der Bögen bestimmen kann, ist es überhaupt erst möglich, eine Differenz zwischen der Wahrnehmung des figürlichen Zusammenhanges und der Messung der Teile zu bemerken.

Die Wahrnehmung des Versatzes der beiden Geraden ist unabhängig vom Beobachter, sie ist wiederholbar, sie, die Wahrnehmung, ist eine Wirklichkeit. Anders verhält es sich mit dem vielleicht aus der Wahrnehmung gezogenen Urteil, es handele sich nicht um Geradenstücke einer Geraden. Das Wahrnehmungsurteil kann der Täuschung unterliegen, die Wahrnehmung selbst nicht. Beide sind daher sauber zu unterscheiden.

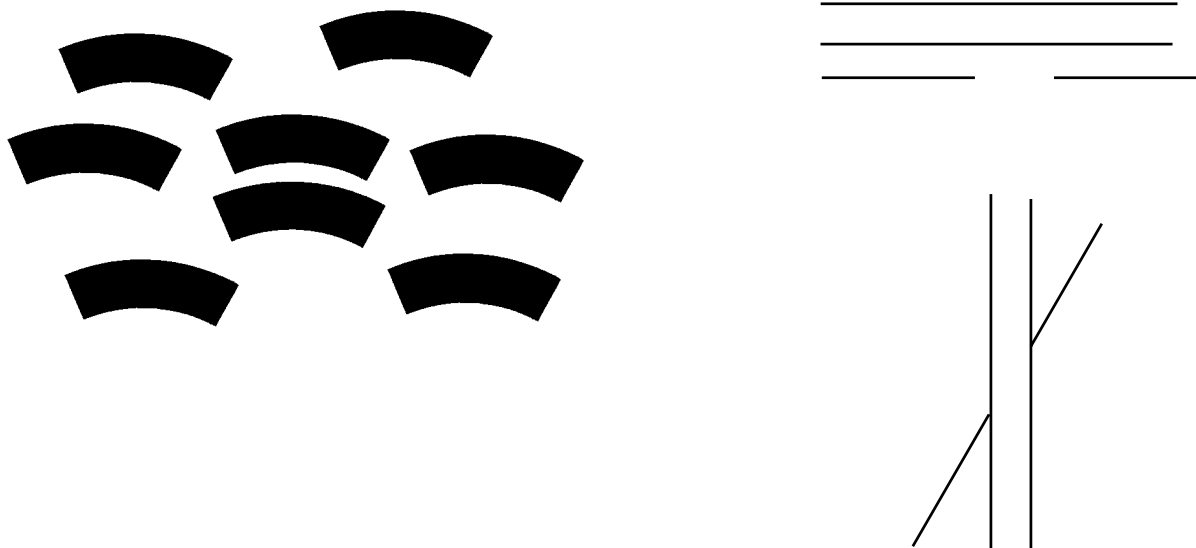


Abbildung 6 Gleiche Bogenstücke, oder nicht? Betrachten Sie das mittlere Paar indem Sie die anderen Bogenstücke abdecken.

Abbildung 7 Unterbrochene Gerade und Parallele. Im unteren Bild erscheint das rechte Geradenstück versetzt.

<sup>3</sup> „Ursache der Täuschung ist meist die Einordnung des der Täuschung unterliegenden Teiles in den gesamten figuralen Zusammenhang, der die Wahrnehmung des Ganzen bestimmt.“ DORSCH (1987), S. 247. Gegenüber diesem Zitat spreche ich nicht vorurteilend von Täuschung, sondern von Versetzung bzw. von Differenz zwischen den Teilen und dem Ganzen. Das Ganze ist hier der figurale Zusammenhang.



Die Differenz zwischen dem Wahrnehmungsurteil und dem Ergebnis der Messung wurde oft als „optische Täuschung“ bezeichnet. Das ist insoweit „dumm gelaufen“, weil damit einseitig nur das Bild der Natur für gültig genommen wird, welches durch Messungen erschlossen werden kann. Es ist ein regelrechtes Kennzeichen der ingenieurwissenschaftlichen Methode, nur diejenigen Parameter zu berücksichtigen, die die Konstruktion eines technischen Systems ermöglichen. Das sind in diesem Fall die Messungen. Dass Wahrnehmung und Messung verschiedene Seiten der Natur erschließen, die für die Naturerkenntnis und das Handeln in der Natur beide ihre Bedeutung haben, beginnt sich erst in der jüngeren Vergangenheit zu verbreiten. Daher sollte von Differenzen statt von optischen Täuschungen gesprochen werden.

## **7 Fazit**

Die Vorstellung, die menschliche Sinneswahrnehmung ließe sich als technischer Datenübertragungskanal verstehen, scheint überholt. Der Mensch ist aktiver Gestalter der Wahrnehmungen. Das Beispiel des Umkehrbildes zeigt, wie wir mit etwas Übung in der Lage sind, den Gesichtspunkt zu wechseln, die selben Phänomene aus einer anderen Sicht zu sehen, mit anderen Begriffen zu belegen, in ganz andere Zusammenhänge einzuordnen, kritisch zu hinterfragen. Wegen der entscheidenden Bedeutung des Wahrnehmungsmusters für die begriffliche Aneignung ist es in die Untersuchung einzubeziehen, wenn Unvoreingenommenheit als Maßstab aufrecht erhalten werden soll, wenn die Übertragung sachfremder Vorstellungen zur Interpretation aktueller Erfahrungen vermieden werden soll. Die Ganzheitlichkeit der Wahrnehmung erscheint als Schlüssel für das unvoreingenommene Erkennen neuartiger Zusammenhänge. Sie stellt sich dar als nicht in nacheinander ablaufende Teilprozesse reduzierbar.

## **8 Literaturverzeichnis**

DORSCH, F., 1987: Psychologisches Wörterbuch. – 11. erg. Auflage 1991. Bern Stuttgart.

GOLDSTEIN, E. B., 1997: Wahrnehmungspsychologie: Eine Einführung. (Aus dem Amerikan.) Heidelberg.

Kuhn, Thomas S (1962): Die Struktur wissenschaftlicher revolutionen. 2., revidierte und deutschsprachige Ausgabe: Frankfurt am Main 1976. 230 Seiten

LUTZKER, P. 1996: Der Sprachsinne: Sprachwahrnehmung und Sinnesvorgang. Stuttgart (Logoi; 12) 325 S.

SCHEURLE, H. J. 1984: Die Gesamtsinnesorganisation: 2. Aufl., Stuttgart, 192 Seiten

SCHUHU, U. 2000: „Die Sinne trügen nicht“. Goethes Kritik der Wahrnehmung als Antwort auf virtuelle Welten. Stuttgart. 287 S.

# Automatische Detektion und Erfassung von Rissen in Fahrbahnoberflächen

MARCO DRECHSEL<sup>1</sup> & FRANK SCHREIBER<sup>2</sup>

*Zusammenfassung: Im Rahmen des Beitrages werden Bildverarbeitungsverfahren hinsichtlich ihrer Eignung für die automatische Detektion und quantitative Erfassung von Rissen in Fahrbahnbelägen untersucht. Verschiedene Verfahren werden in praktischen Tests anhand einer Reihe von Testaufnahmen demonstriert und diskutiert. Besonderes Augenmerk wurde auf die Eignung der Verfahren für die vollautomatische Verarbeitung langer Bildsequenzen und die größtmögliche Unabhängigkeit von Steuerparametern gelegt.*

## 1 Ziele und Motivation

Straßenbaubehörden haben einen permanenten Bedarf an aktuellen Informationen über die Güte von Straßenbelägen. Diese Informationen werden sowohl zur Veranlassung akuter Reparaturmaßnahmen als auch zur langfristigen Planung von Erhaltungsmaßnahmen benötigt. Aufgrund der Komplexität der Erkennung von Schäden werden die aufgenommenen Bildsequenzen jedoch bislang zeit- und kostenaufwendig interaktiv ausgewertet. Die Automatisierung der Analyse dieser Aufnahmen ist sowohl unter dem Gesichtspunkt der Wirtschaftlichkeit als auch unter dem Gesichtspunkt der Erfassung objektiver quantitativer Zustandsdaten von großem Interesse. Von einer interaktiven Analyse soll auf eine automatisierte Auswertung der aufgenommenen Bilder und Bildsequenzen übergegangen werden. Die Erfolgsquote der entwickelten Verfahren wird in dieser Arbeit mittels Vergleich mit durch interaktive Analyse gewonnenen Daten ermittelt. Die Auswertung von exemplarisch aufgenommenen Straßenschäden konzentriert sich auf die Anwendung, Adaptierung und Erweiterung vorhandener Bildverarbeitungstechniken unter der Verwendung von vordefinierten Funktionen der Software Halcon, Version 5.2, der MVTec Software GmbH. Aus den Ergebnissen der Untersuchungen (DRECHSEL, 2001) werden Schlüsse über die praktische Anwendbarkeit, Genauigkeit und Zuverlässigkeit von photogrammetrischen Verfahren in einem operationellen automatischen System zur Erfassung von Straßenschäden abgeleitet.

Um die gewonnenen Substanzmerkmale permanent verfügbar zu machen, müssen diese in Pavement-Management-Systems (PMS) eingebunden werden. Die zentrale Aufgabe eines solchen Straßenerhaltungsmanagementsystems ist es, sich für die geeignetste Erhaltungsmaßnahme zum richtigen Zeitpunkt zu entscheiden. Die Zustandsbeschreibung der Straßen in einem PMS erfolgt anhand von dimensionslose Zustandswerte mit den Noten 1 (sehr gut) bis 5 (sehr schlecht), (KNEPPER & SULTAN, 1997), (SCHMUCK, 1987).

---

<sup>1</sup> Dipl.-Ing. Marco Drechsel, Erlenweg 5, 09392 Auerbach, [md10@rcs.urz.tu-dresden.de](mailto:md10@rcs.urz.tu-dresden.de)

<sup>2</sup> Frank Schreiber, Lehrstuhl Photogrammetrie, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, TU Dresden, 01062 Dresden, [fschr@rcs.urz.tu-dresden.de](mailto:fschr@rcs.urz.tu-dresden.de)

## 2 Arbeitsschritte

### 2.1 Bildgewinnung und Bildvorverarbeitung



Abb. 1: Testbild 1

Die Untersuchungen umfassen fünf Testbilder mit unterschiedlichen Risskanten in unterschiedlichen Fahrbahnoberflächen, einen Testkörper und eine Bildfolge mit neun Teilbildern, die mit der Digitalkamera CASIO QV-3000 EX/Ir in Dresden aufgenommen wurden. Die Aufnahme der Bilder erfolgte aus der Hand aus ca. 1,50 m Höhe und möglichst horizontal. Im produktiven Einsatz befindliche Aufnahmesysteme werden andere Kameras (Videokameras) verwenden.

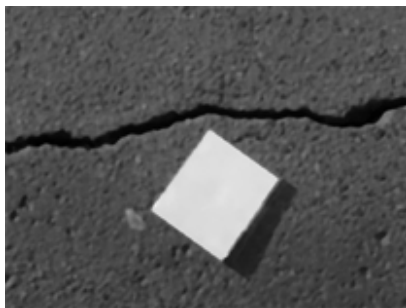


Abb. 2: Medianfilterung

Die Kombination der glättenden, aber weitestgehend kantenerhaltenden Medianfilterung (Abb. 2) mit der kantenverstärkenden Kontrastanhebung mittels Laplace-Operator beseitigt für die Segmentation störende Strukturen im Asphalt. Dabei bleiben die zur Segmentation wichtigen Grauwertkanten, vor allem im Rissbereich, erhalten.

### 2.2 Segmentation

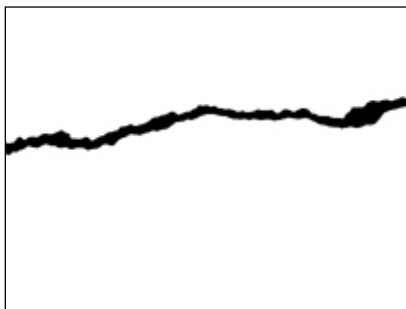


Abb. 3: Risssegment

Die Bildsegmentierung trennt das Objekt vom Hintergrund. Die Aufgabe der Segmentierung besteht darin, aus Bildern einzelne „Area of Interest“, hier ein Riss (Abb. 3), oder Teilbilder zu extrahieren, um diese einer weiteren Analyse zu unterwerfen. Es wurden vier Segmentationsverfahren untersucht: Schwellwertverfahren, Regionenwachstum, Segmentierung mittels Kantenoperatoren und Morphologische Operatoren.

### 2.3 Nachfolgeoperatoren

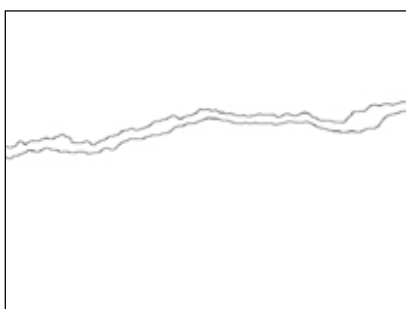


Abb. 4: Risskontur

Im Hinblick auf die Bildinterpretation und Merkmalsextraktion müssen zusammengehörige Regionen, die nach der Segmentierung noch getrennt oder unvollständig sind, vereinigt und geschlossen werden. Diese Operationen ermöglichen es, später eine Quantifizierung der Risse vorzunehmen. Dazu gehören die Morphologischen Operationen Öffnen und Schließen, Skelettierung und Vektorisierung (Abb. 4).

## 2.4 Merkmalsextraktion

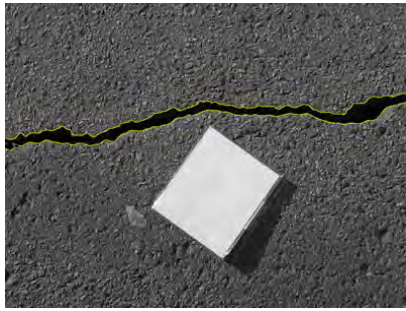


Abb. 5: Originalbild mit detektiertem Riss

Merkmale eines Bildobjektes geben seine Charakteristiken in Form von Zahlen, Matrizen oder Vektoren wieder. Für das Ziel der Rissextraktion sind geometrische Merkmale (Flächeninhalt, Umfang, Kompaktheit) und Texturmerkmale entscheidend. Auf der Basis von Merkmalen können qualitative und quantitative Aussagen über den Bildinhalt getroffen werden. Beispielsweise kann man Straßenmarkierungen als störende Objekte durch ihre geometrische Form oder ihren Grauwertbereich selektieren.

Literaturhinweise: (ABMAYR, 1993), (KÖHN, 1996), (ZAMPERONI, 1991), (JÄHNE, 1997)

## 3 Bildsegmentierungsverfahren

### 3.1 Schwellwertverfahren

Dieses Verfahren ist sinnvoll anwendbar, wenn sich der Bildinhalt schon im Vorfeld in „Hintergrund“ und „Area of Interest“ einteilt. Bei der bimodalen Schwellwertanalyse repräsentiert ein Schwellwert genau zwei Maxima innerhalb des Grauwertistogramms: das eine den Vordergrund und das andere den Hintergrund. Dazwischen wird der Schwellwert  $T$  gesetzt (Abb. 6). Die Festlegung der Schwellwerte bei bimodalen und multimodalen Anwendungen ist, kann durch entsprechendes Vorwissen erfolgen, welches in der Regel durch einen Bearbeiter eingebracht wird.

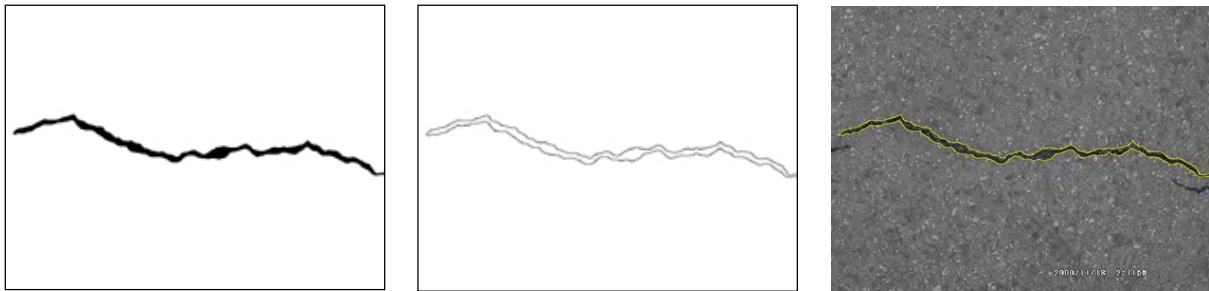


Abb. 6: Schwellwertanalyse: (links) binarisiertes Bild nach Schwellwertoperation mit  $T=90$ , (Mitte) Konturdarstellung der Risskante, (rechts) Originalbild mit detektiertem Riss

Literaturhinweis: (KÖHN, 1996), (HUANG, 1991), (WAHL 1989), (STEINBRECHER 1993)

### 3.2 Regionenwachstum

Das Regionenwachstum gruppiert ein oder mehrere Pixel durch ein Einheitskriterium in größere Regionen bzw. Segmente. Als Einheitskriterien zur Segmentation kommen Grauwertschwellen, Farbe oder Textur in Frage. Das Problem beim Regionenwachstum besteht darin, geeignete Startpunkte und Einheitskriterien für die zu bildenden Regionen zu finden. Der Vorteil des Verfahrens ist, dass die berechneten Regionen räumlich zusammenhängen. In

Abb. 7 wurde interaktiv ein Startpunkt in der Rissfläche gewählt. Als Einheitskriterium dient hier die Grauwerttoleranz.



Abb. 7: Regionenwachstum: (links) binarisiertes Bild nach Regionenwachstum, (Mitte) Konturdarstellung der Risskante, (rechts) Originalbild mit detektierten Risskanten

Literaturhinweise: (WAHL, 1989), (KÖHN, 1996), (GONZALEZ, 1993), (ZAMPERONI, 1991)

### 3.3 Kantenoperationen

Das Ziel der Kantenextraktion ist es, ein sogenanntes Kantenbild (Abb. 8 - links) des Eingabebildes zu erzeugen, d. h. ein Bild, das möglichst alle Konturlinien der Objekte bzw. inhaltlich homogenen Bildregionen beinhaltet. Im Idealfall erhält man dadurch ein Grauwert-Kantenbild, das mit Hilfe einer einfachen Binarisierung (Abb. 8 - Mitte) mit festen Schwellwerten in die beiden Regionen, Risskante und Hintergrund, segmentiert werden kann. Bei der Bearbeitung in Abb. 8 wurde der Sobel-Operator verwendet.



Abb. 8: Segmentierung mit Kantenoperatoren: (links) Kantenbild (Sobel-Operator), (Mitte) binarisiertes Kantenbild nach Schwellwertbildung (rechts) Originalbild mit detektiertem Riss

Literaturhinweise: (JÄHNE, 1997), (STEINBRECHER, 1993), (PRATT, 1991)

### 3.4 Morphologische Operationen

Das Ziel der Morphologischen Operatoren Erosion und Dilation ist die Extraktion relevanter Bildstrukturen. Mit Hilfe des Morphologischen Gradienten, der sich aus der Differenz eines dilatierten und eines erodierten Bildes ergibt (Abb. 9 - links), können die Kanten eines Bildes extrahiert werden. Wie bei den Kantenoperatoren hängt die Güte der Kantendetektion dabei vor allem von der Qualität des Bildes und der Art der Kanten ab.

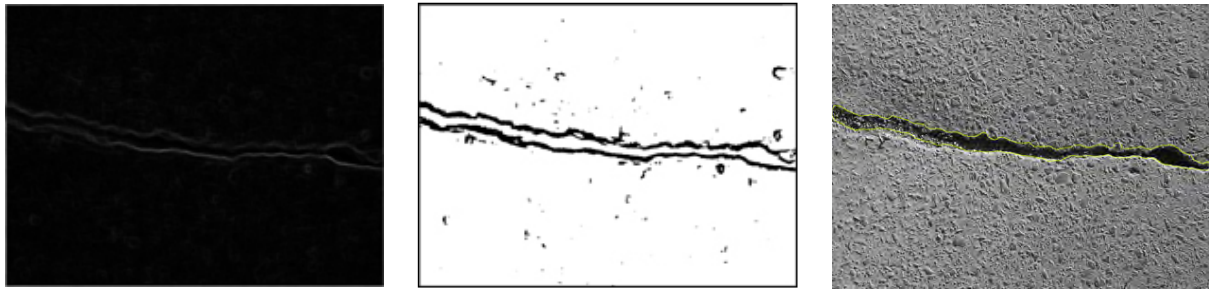


Abb. 9: Segmentierung mit Morphologischen Operatoren: (links) Differenzenbild, (Mitte) binarisiertes Bild nach Schwellwertbildung, (rechts) Originalbild mit detektiertem Riss

Literaturhinweise: (HABERÄCKER 1995), (SOILLE, 1989), (ABMAYR, 1993),

## 4 Ergebnisse

### 4.1 Testbilder

#### 4.1.1 Interaktive Bearbeitung

Bei der Bearbeitung der Testbilder zeigen die Verfahren sehr unterschiedliche Qualitäten. Dabei zeichnen sich Schwellwertverfahren und Regionenwachstum durch hohe Genauigkeit und Schnelligkeit aus. Die Bildsegmentierung mittels Kantenbilder von Kantenoperatoren und Morphologischer Operatoren bedarf einer Reihe von Nachbearbeitungsschritten, was die Automatisierung erschwert. Häufig müssen offene Kantenstellen nachträglich geschlossen werden. Die Störungsanfälligkeit und lange Rechenzeiten sind weitere Nachteile der kantenorientierten Methoden.

#### 4.1.2 Automatisierte Bearbeitung

Wenn man vom Regionenwachstum absieht, konzentriert sich die Automatisierung der interaktiv aufgestellten Bearbeitungsalgorithmen auf eine Histogrammauswertung zur automatischen Berechnung von Segmentationschwellen für das gesamte Bild. Beim Schwellwertverfahren wird das Grauwertistogramm des geglätteten Eingabebildes untersucht. Der Idealfall wäre die Berechnung genau eines Schwellwertes, der das Bild in Riss- und Hintergrundregion segmentiert. Mit dem automatisierten Schwellwertalgorithmus werden gute Ergebnisse erzielt. Die automatisierte Segmentierung mit Kantenoperatoren und Morphologischen Operatoren wertet die Grauwertistogramme der berechneten Kantenbilder aus. Mit den ermittelten Schwellen wird die Kantenregion vom Hintergrund getrennt. Die Kanten nutzt man anschließend, um das gesamte Bild in Regionen zu segmentieren. Aufgrund von ausgebrochenen, zerklüfteten oder unsauberen Rissen sind die detektierten Risskanten häufig unterbrochen. Dieses Verfahren ist damit sehr störungsanfällig gegenüber Unregelmäßigkeiten an der Risskante und im Riss. Zur Automatisierung des Regionenwachstums wird ein Verfahren verwendet, das ohne Vorgabe von Startpunktkoordinaten den Wachstumsprozess beim ersten Bildpunkt (0,0) beginnt. Dabei besteht das Problem, dass die Grauwerttoleranz für zusammengehörige Regionen variabel für alle Testbilder bleibt. Bei homogenen Verhältnissen, vor allem bei der Grauwertvarianz, erreicht auch dieses Verfahren gute Ergebnisse. Das Regionenwachstum eignet sich besonders gut für zeitkritische Anwendungen.

Bei der Erfassung von Straßenschäden, speziell Rissen, erweisen sich die regionenorientierten Verfahren (Schwellwertverfahren, Regionenwachstum) gegenüber den kantenorientierten Verfahren als besser geeignet. Am effektivsten arbeitet das Schwellwertverfahren.

Automatisierung bedeutet die Festlegung von Parametern für möglichst alle Bilder in gleicher Art und Weise. Kritisch sind dabei unter anderem die Filtergröße bei der Bildvorverarbeitung, verwendete Glättungsfaktoren bei der Bestimmung von Schwellwerten aus Histogrammen, die Größe von Strukturelementen bei morphologischen Operationen und die Wahl von Selektionsgrenzen bei der Generierung von Regionen bzw. Segmenten.

## 4.2 Testkörper

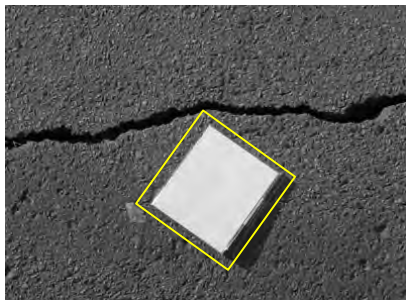


Abb. 10: Testkörper

Der Testkörper, Abb. 10, ist bei der Bildsegmentierung als „Area of Interest“ (nahezu) ideal geeignet. Durch seine klaren Kanten und seinen homogenen, vom übrigen Bild stark abweichenden, Grauwertbereich wird er von allen untersuchten Verfahren, siehe Abschnitt 3, ohne Probleme erfasst. Bei der Bestimmung der Fläche und der Konturlänge des Testkörpers ergibt sich eine Schwankung der Ergebnisse um den Mittelwert von etwa 2% für alle Verfahren, Tab. 1. Die kleinen Schwankungen wurden für die interaktive und automatisierte Bestimmung der Risse als Richtwerte benutzt.

Tab. 1: Fläche und Konturlänge des Testkörpers für alle vier Segmentationsverfahren

Verfahren Merkmal	Schwellwert- Verfahren	Regionen- wachstum	Kanten- operatoren	Morphologische Operatoren
Fläche [Pixel]	218076	216862	211187	208068
Konturlänge [Pixel]	1951	1952	1897	1893

## 4.3 Testsequenz, interaktive Bearbeitung

Abschließend zur Untersuchung der Segmentationsverfahren wird die Übertragbarkeit der Segmentationsparameter auf eine Bildfolge geprüft. Die Bildfolge aus neun Teilbildern wurde mit dem Schwellwertverfahren bearbeitet.



Abb. 11: Ergebnisse der interaktiven Bearbeitung der Testsequenz: (links) Teilbild 1, (Mitte) Teilbild 2, (rechts) Teilbild 9

Der Vergleich der geometrischen Merkmale aus der interaktiven und automatisierten (rekursiven) Bearbeitung ergab, dass die Automatisierung dieses Verfahrens auch bei der Anwendung auf eine Bildsequenz sehr gute Ergebnisse liefert. Tab. 2 zeigt die dabei entstandenen

prozentualen Abweichungen bei der Fläche, der Konturlänge und dem umschreibenden Rechteck aus allen Teilbildern. Diese Differenzen sind vernachlässigbar, wenn man bedenkt, wie großflächig Straßenschäden erneuert werden. Weitere Resultate sind in DRECHSEL, 2001 zu finden.

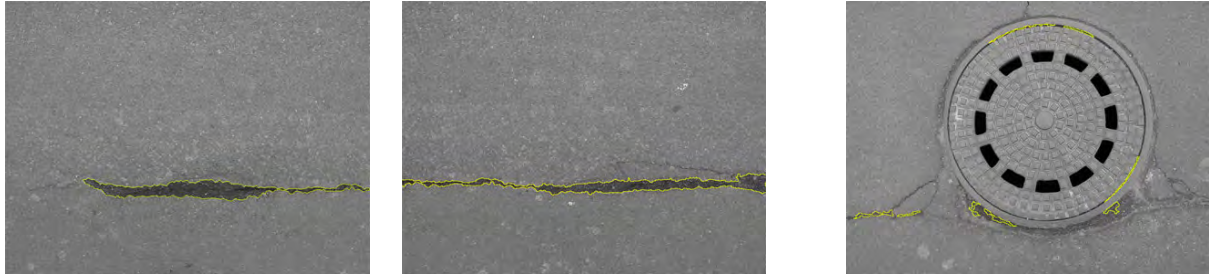


Abb. 12: Ergebnisse der automatisierten Bearbeitung der Testsequenz: (links) Teilbild 1, (Mitte) Teilbild 2, (rechts) Teilbild 9

Tab. 2: Vergleich der interaktiven und automatisierten Bearbeitung des Testkörpers

Merkmal	Abweichungen aus allen Teilbildern
Fläche [%]	2,3
Konturlänge [%]	1,2
Umschreibendes Rechteck [%]	1,4

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Zweifellos ist es nicht möglich, alle Formen und Varianten von Rissen mit einem der vorgestellten Verfahren zu erfassen. Die Qualität der Ergebnisse hängt stark von äußeren Einflüssen, wie Beleuchtungsverhältnisse oder der Verschmutzung in den Rissen, ab. Die Bildauflösung und die Aufnahmeentfernung sind entscheidende Faktoren. Vor allem die Elimination von Störflächen, wie z. B. Straßenmarkierungen wird aufgrund der verschiedenartigen Ausprägungen an ihre Grenzen stoßen. Die Orientierung des Aufnahmesystems mit Hilfe von GPS-Daten kann die positionsgenaue Detektierung der Schäden realisieren, um so eine Integration in ein PMS zu ermöglichen.

Neben der Erweiterung der erfassbaren Schadenspalette wird die Abstimmung zwischen den Aufnahmen mobiler Systeme, den Möglichkeiten der photogrammetrischen Auswertung (Georeferenzierung der aufgenommenen Bilder und der Risse) und den Genauigkeitsanforderungen des Auftraggebers den Schwerpunkt weiterer Untersuchungen bilden. Die Optimierung von Aufnahmesystemen in bezug auf die Bildauflösung und Objektausleuchtung und die Übertragung der Halcon-Programmabläufe in eine höhere Programmiersprache (C, C++) sind damit eng verbunden. Des weiteren sollte die Übertragbarkeit der untersuchten Verfahren auf weitere Anwendungsbereiche geprüft werden. Die Fassadenkontrolle im Bauwesen und verschiedenartige Qualitätskontrollen, z. B in der Automobilindustrie, wären denkbare Bereiche.

## 6 Literaturverzeichnis

ABMAYER, W., 1993: Einführung in die digitale Bildverarbeitung. München: B.G. Teubner Stuttgart

DRECHSEL, M., 2001: Photogrammetrische Techniken zur automatischen Erfassung von



- Fahrbahnschäden, Technische Universität Dresden, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, Diplomarbeit, unveröffentlicht
- GONZALEZ, R. & WOODS, R., 1993: Digital Image Processing. 2. Aufl., Addison-WESLEY Publishing Company, Inc.
- HABERÄCKER, P., 1995: Praxis der Digitalen Bildverarbeitung und Mustererkennung. München Wien: Hauser
- HUANG, Y., 1991: Segmentierung von landwirtschaftlichen Luftbildern nach strukturellen und statistischen Texturmodellen. Düsseldorf: VDI-Verlag
- JÄHNE, B., 1997: Digitale Bildverarbeitung. 4. Aufl., Berlin Heidelberg: Springer
- KNEPPER, S. & SULTAN, P., 1997: Auf dem Weg zu einer systematischen Straßenerhaltung. In: Straße und Autobahn. (11/97).
- KÖHN, C., 1996: Bildanalyse und Bilddatenkompression. München Wien: Carl Hauser Verlag
- PRATT, W., 1991: Digital Image Processing. 2. Aufl., USA : John Wiley & Sons, Inc.
- SCHMUCK, A., 1987: Straßenerhaltung mit System – Grundlagen des Managements. Bonn: Kirschbaum
- SOILLE, P., 1998: Morphologische Bildverarbeitung. Berlin Heidelberg: Springer
- STEINBRECHER, R., 1993: Bildverarbeitung in der Praxis. München: Oldenburg
- WAHL, F., 1989: Digitale Bildsignalverarbeitung. Berlin: Springer-Verlag
- ZAMPERONI, P., 1991: Methoden der Digitalen Bildsignalverarbeitung. 2. Aufl., Braunschweig: Vieweg

# Voruntersuchungen und Maßnahmen zur statischen Sicherung der Dreifaltigkeitskirche in Konstanz

Günter Eckstein<sup>1</sup>

Zusammenfassung: Die Dreifaltigkeitskirche in Konstanz ist das letzte sichtbare Zeugnis des 1268 gegründeten Augustiner-Eremiten-Klosters - das Kloster wurde 1802 aufgelöst, die Klostergebäude 1874/77 abgebrochen (Abb. 1). Die Kirche, von außen eher unscheinbar, bezieht ihren historischen Bezug in erster Linie aus den „Konzilfresken“ von 1417 und aus dem Spannungsfeld der barocken Überformung von 1740 in Bezug auf die gotische Säulenbasilika. Die Kirche hat Probleme im konstruktiven Bereich - die Arkadenwände des Mittelschiffes, und in abgeschwächter Form die Seitenschiffwände, haben sich jeweils in der Mitte nach Norden geneigt, der Chor hat sich auf der Ostseite gesetzt und insgesamt nach Osten geneigt. Die Kirche wurde 1989/90 photogrammetrisch untersucht; zur Ermittlung der Schadensursachen wurden die Messergebnisse mit den baugeschichtlichen Fakten korreliert. Durch weiterführende messtechnische Folgebeobachtungen und geotechnische Untersuchungen kam man zu dem Schluss, dass eine statische Sicherung, insbesondere eine Gründungsverbesserung, unerlässlich ist. Die Maßnahmen zur statischen Sanierung wurden 1999/2000 durchgeführt. Nach einer Ruhe- und Beobachtungsphase von einem Jahr soll eine Innenrestaurierung und eine Fassadenerneuerung erfolgen. In dem nachfolgenden Beitrag werden die Voruntersuchungen und Bauanalysen als Grundlage für das statische Sanierungskonzept zusammenfassend dargestellt.

## 1 Einführung

Statische Probleme, die sich auf die Struktur eines Bauwerkes oder Bauteiles beziehen, kündigen sich in der Regel durch geometrische Veränderungen an. Sie können auf den ersten Blick ersichtlich sein, wie Risse und Abplatzungen im Mauerwerk und gelöste Holzverbindungen im Dachwerk, oder sie sind nicht unmittelbar erkennbar wie einseitige Setzungen, Gesamtneigungen oder Gewölbeverformungen. Detaillierte Aussagen zu Verformungen – welche Bereiche haben sich verformt und wie groß sind die Verformungen – können nur durch exakte Vermessungen gemacht werden. Wichtig ist, dass Rückschlüsse nicht aus wenigen Einzelbeobachtungen, sondern aus der Summe vieler Beobachtungen geschlossen werden, zufällige Bauunregelmäßigkeiten könnten sonst das Ergebnis verfälschen.

Für die weiterführende Verformungsanalyse – was sind die Ursachen der Verformungen, in welchem Zeitraum sind sie entstanden und sind die Baubewegungen zum Stillstand gekommen oder nicht – genügen die geometrischen Informationen alleine nicht mehr. Hier müssen in erster Linie bauhistorische Untersuchungen folgen – Befunde sind in ihrem räumlichen und stilistischen Zusammenhang zu interpretieren, der Kernbestand der ursprünglichen Konstruktion ist zu lokalisieren, die weiteren Bauabfolgen sind chronologisch, relativ und wenn möglich absolut, zu erfassen. Literaturrecherchen und Archiverhebungen sind parallel zu den Befunderhebungen vor Ort durchzuführen. Dendrochronologische und restauratorische Untersuchungen sind bei komplexen Baubefunden mit einzubeziehen. Stellt sich bei den Verformungsbeobachtungen heraus, dass die Ursachen im Baugrund oder in der Fundamentierung liegen können, sind geotechnische Untersuchungen unerlässlich. Bauforschung ist hier

---

<sup>1</sup> Günter Eckstein, Landesdenkmalamt Baden-Württemberg, Referat 35, Photogrammetrie, Mörikestraße 20, 70178 Stuttgart, e-mail: Eckstein.Guenter@gmx.de

nicht Selbstzweck, sondern Voraussetzung für das Ausarbeiten eines statischen Sicherungskonzeptes.

Eine äußerst komplexe Situation zur Beurteilung des Tragverhaltens liegt zur Dreifaltigkeitskirche in Konstanz vor. Die Kirche neigt sich in der Mitte des Schiffes extrem nach Norden. Seit 1989 wird sie photogrammetrisch/messtechnisch, baugeschichtlich und geotechnisch untersucht, mit statischen Sicherungsmaßnahmen wurde 1999 begonnen<sup>2</sup>.

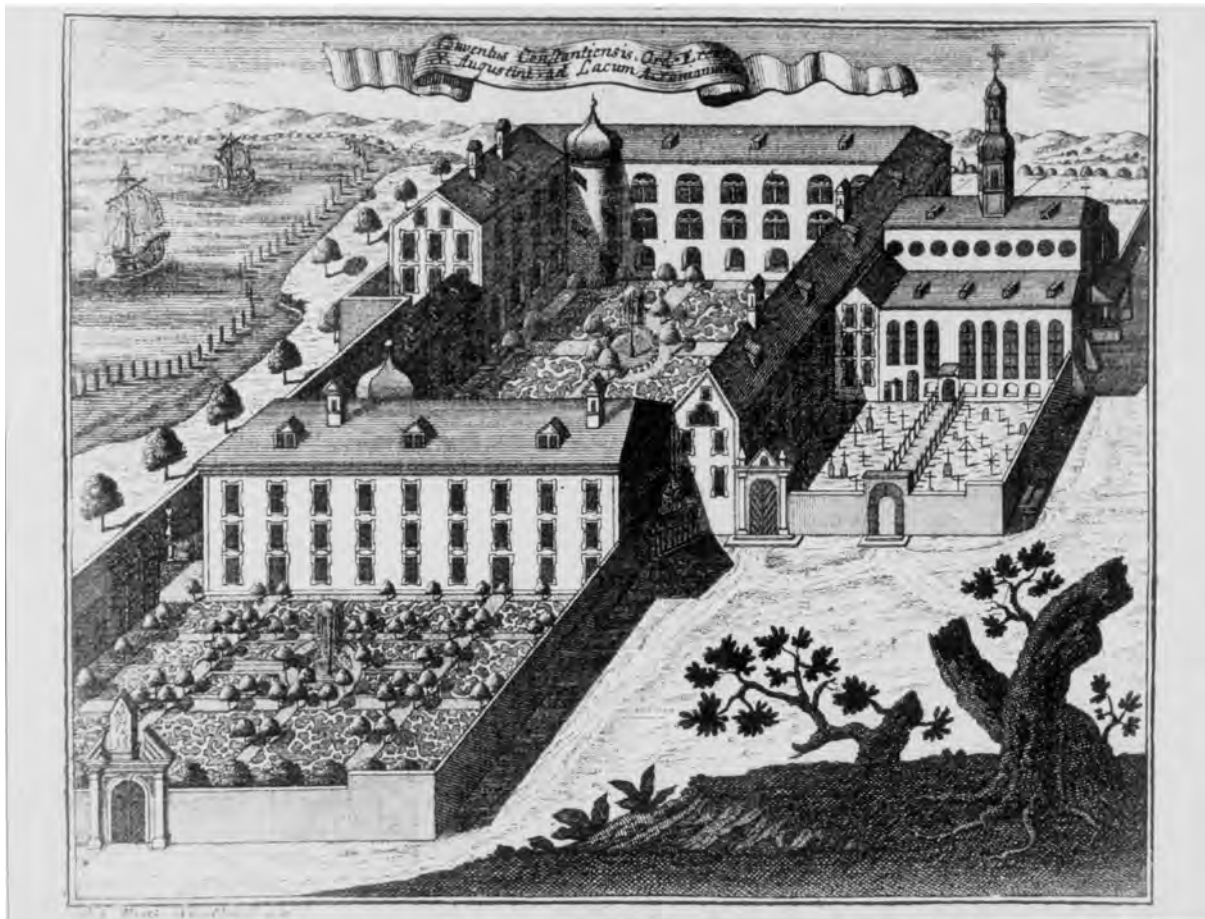


Abb. 1: Konstanz, die ehemalige Klosteranlage des Augustinerordens nach einem Stich von Joh. Matth. Streidlin zur Barockzeit. Die Kirche im Westen der Anlage zeigt schon Rundbogenfenster im Seitenschiff, aber noch die ursprünglichen Okuli im Obergaden. Die Klostergebäude wurden 1874/77 abgebrochen. Das ehemals in die Klosteranlage eingebundene Kirchengebäude wurde danach freigestellt. Das umliegende Gelände wurde im Zuge des Eisenbahnbaus aufgeschüttet und das Bodenniveau im Inneren der Kirche um ca. 1,34 m erhöht. (Stadtarchiv Konstanz)

<sup>2</sup> Die Arbeiten zur Dreifaltigkeitskirche in Konstanz sind ausführlich in dem Arbeitsheft des Landesdenkmalamtes Baden-Württemberg „Vom Messbild zur Bauanalyse“ dargestellt (erscheint im Sommer 2001 im Theiss Verlag, Stuttgart). Darin enthalten sind Beiträge von Eugen Schneble „Die Bauanalyse als Planungsgrundlage“, Günter Eckstein „Messtechnische Bauuntersuchung und Verformungsanalyse“, Lorenz Edelmann und Peter Amann „Geotechnische Untersuchung und messtechnische Überwachung der Gründungssanierung, Johann Grau „Maßnahmen zur statischen Sicherung und Frank Löbbcke „Bauarchäologische Untersuchungen und baugeschichtliche Auswertung während der Sanierung“. Im obigen Beitrag wird schwerpunktmäßig die Korrelation zwischen Messergebnissen mit baugeschichtlichen Fakten behandelt. Quellen werden hier nicht benannt, sie sind im Arbeitsheft zitiert. .

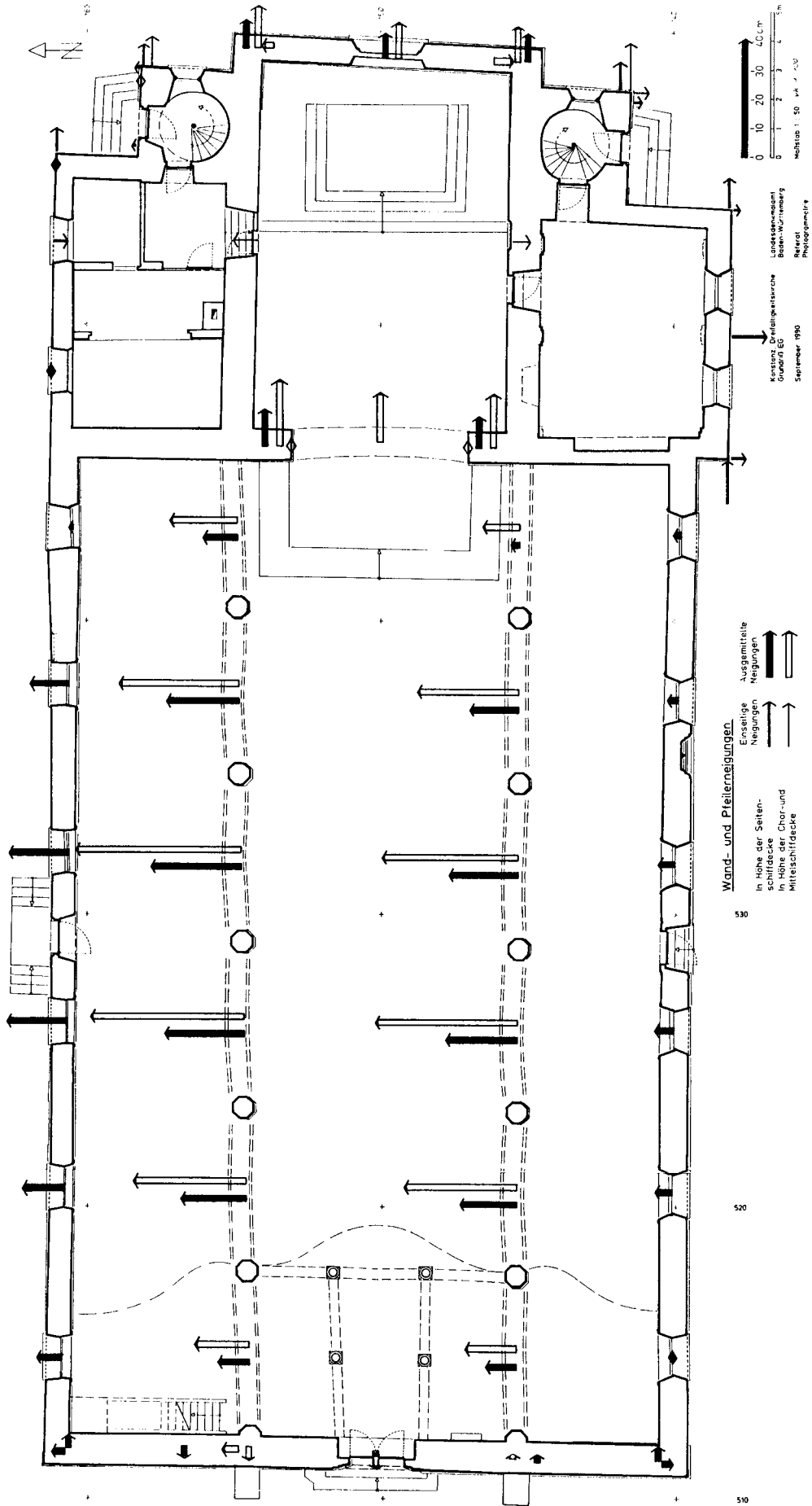
## 2 Bauaufnahme und messtechnische Bauuntersuchung

Im ersten Schritt wurde ein photogrammetrisch/messtechnisches Konzept ausgearbeitet, das eine Bauaufnahme mit Grundrissen Schnitten und Ansichten beinhaltete. Sämtliche Pläne basieren auf einem einheitlichen Messsystem, das parallel zur Kirchenachse aufgebaut wurde. Die Fassaden und der Kircheninnenraum wurden photogrammetrisch aufgenommen und ausgewertet – Stereoaufnahme mit analytischer Auswertung, zu der Zeit noch ohne Datenspeicherung, d. h. mit direkter maßstäblicher Kartierung. Die Nebenräume und der Dachstuhl wurden zunächst tachymetrisch durch eine dichte Anzahl von Punkten eingemessen; das Detailaufmaß erfolgte anschließend mit direkter Kartierung vor Ort. Insgesamt wurden 1 Grundriss, 1 Deckenspiegel zuzüglich der Außenkonturen, 2 Längsschnitte durch den Kirchenraum, wobei 1 Schnitt durch den Dachraum geführt wurde, 3 Querschnitte und 4 Ansichten gezeichnet. Ausgewertet bzw. gezeichnet wurde im Maßstab 1 : 33 1/3 entsprechend der Genauigkeitsstufe IV (Empfehlungen für Baudokumentationen), anschließend wurden die Pläne reprographisch auf den Maßstab 1 : 50 verkleinert, die photogrammetrische Auswertung und die Handvermessung zusammengefasst und eine Reinzeichnung in Tusche gefertigt.

Anhand der Bauaufnahme wurden Grundrissanomalien, Neigungen und Setzungen ermittelt sowie sonstige Schäden wie Risse, Abplatzungen oder schadhafte Holzverbindungen in den Plänen hervorgehoben oder beschrieben. Die Neigungswerte wurden sowohl aus den Schnitten, als auch aus der Überlagerung von Grundriss und Deckenspiegeln - auf Höhe der Seitenschiffdecken und der Mittelschiff- bzw. Chordecke - ermittelt. Horizontale und vertikale Wandausbauchungen wurden gleichfalls erfasst wie konisch verlaufendes Mauerwerk durch Außen- und Innenmessungen. Setzungen wurden anhand der Höhenunterschiede gleichartiger Bauteile ermittelt. Aus der Summe der Einzelbeobachtungen wurden Mittelwerte gebildet und in den Plänen numerisch angegeben oder wie bei den Wandneigungen in Form von überhöhten Vektoren aufgetragen.

Auf der Grundlage der messtechnischen Bauuntersuchung konnten zwei unterschiedliche Schadensphänomene nachgewiesen werden (Abb. 2, 3):

- Die Ostseite des Chores hatte sich bis zu 15 cm gesetzt. Dabei hatten sich der gesamte Chor und die nördlich und südlich angrenzenden Bauteile bis zu 22 cm (bis Deckenhöhe) nach Osten geneigt. Die Neigung bzw. Drehbewegung erfolgte gleichmäßig, denn an der Chordecke und den angrenzenden Bauteilen sind keine Risse erkennbar. Dagegen musste durch die Drehbewegung gegenüber dem Schiff in den oberen Zonen zwangsweise ein Abriss erfolgen. Die Bruchzone entstand am Übergang der Westwand des Chores zu den Mittelschiffwänden. Ausgeprägte Risse sind sowohl innen als auch an den Fassaden erkennbar.
- Im Bereich des Schiffes neigen sich sowohl die Mittelschiffwände als auch die Seitenschiffwände mit steigender Tendenz zur Mitte des Schiffes hin nach Norden. Dagegen sind die Querwände im Westen und im Bereich des Triumphbogens in Nord-Süd-Richtung stabil geblieben. Die Wände bauchen somit in den oberen Partien nach Norden aus. Die maximalen Neigungswerte betragen an der nördlichen Arkadenwand in Höhe der Seitenschiffdecke 30 cm und in Höhe der Mittelschiffdecke 56 cm. Die Seitenschiffwände neigen sich bis zu 6 cm auf der Südseite und bis zu 20 cm auf der Nordseite nach Norden. Die Nordseite des Schiffes hatte sich geringfügig, zwischen 2 – 6 cm gesetzt, worauf auch die Spannungsrisse in den Haupt- und Seitenschiffdecken hinweisen.



**Wand- und Pfeilerrneigungen**

In Höhe der Seitenschiffdecke  
 In Höhe der Chor- und Mittelschiffdecke

Ausgerahmte Neigungen  
 Einseitige Neigungen  
 Neigungen

530

520

510

0 10 20 30 40 cm

Maßstab 1:50 Ark. 1/2/3/0

Landschaftsamt  
 Baden-Württemberg  
 Referat  
 Photogrammetrie

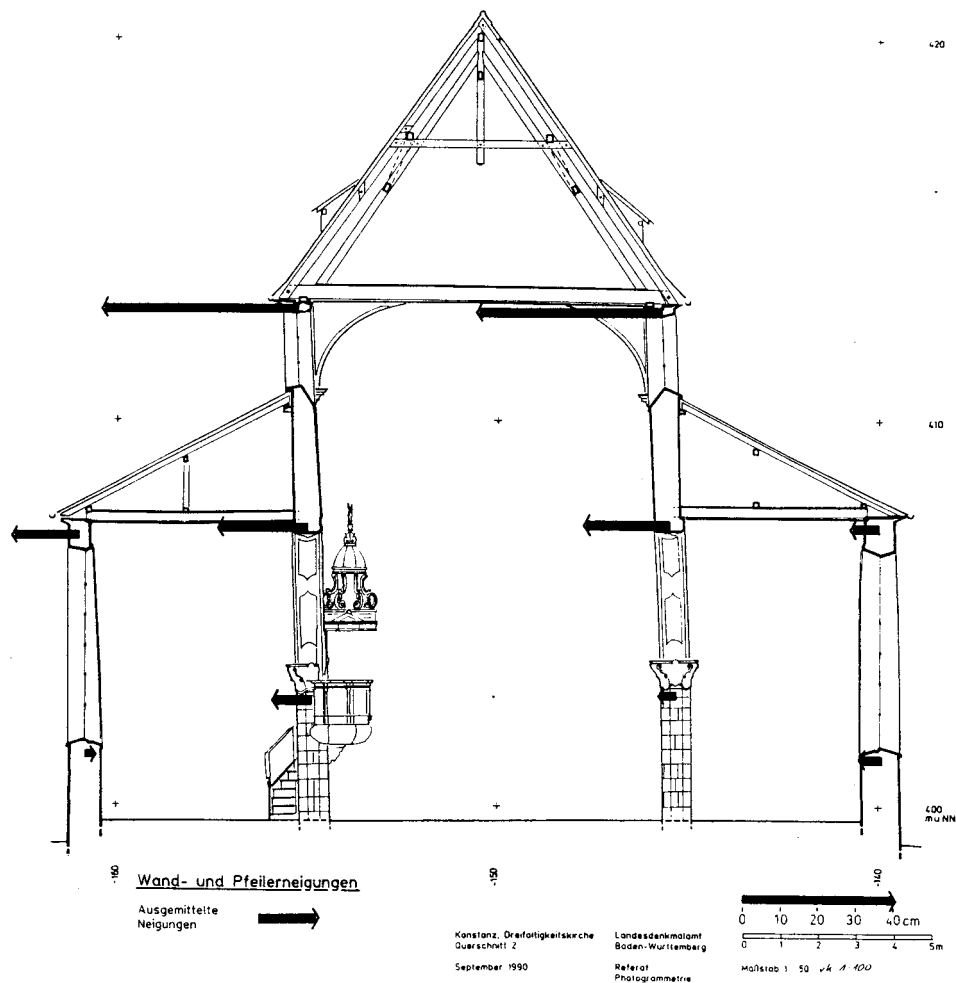


Abb. 2 und 3: Konstanz Dreifaltigkeitskirche, Grundriss und Querschnitt, Bauaufnahme 1989. Zusätzlich dargestellt sind die ausgemittelten Wand- und Pfeilerneigungen in Form von 10-fach überhöhten Vektoren. (Landesdenkmalamt Baden-Württemberg)

### 3 Verformungsanalyse

Die Setzung der Ostseite des Chores und die Neigung des gesamten Chores nach Osten ist mit Sicherheit auf Baumaßnahmen von 1874-77 zurückzuführen. Zu diesem Zeitpunkt wurden die Konventgebäude des Klosters abgebrochen und beidseitig am östlichen Ende des Chores massive Treppentürme angebaut (Abb. 1, 2) Die größeren Baumassen haben diesen Bereich in die Tiefe gezogen, denn der weiche Seeton (s. 4 Geotechnische Untersuchung) reagiert sehr empfindlich bei unterschiedlichen Belastungen. Dass die Setzungs- und Drehbewegung ein fortschreitender Prozess ist, kann durch folgende Aussagen belegt werden: 1906/07 wurden die Fresken aus der Konzilzeit an den Mittelschiffwänden freigelegt und danach fotografisch dokumentiert. An den Übergängen zur Chorwand sind auf den Fotos keine Risse erkennbar. Auf Dokumentationsfotos von 1963 sind hier deutliche Risse sichtbar, bei den Bauuntersuchungen 1989/90 wurden sie photogrammetrisch dokumentiert. Neue Risse sind an den Obergadenwänden am Übergang von Schiff und Chor sowie über den Scheiteln der Seitenschiffenster nach dem Neuverputzen von 1968 entstanden. Die Setzungen

und die damit verursachten Drehbewegungen sind offensichtlich fortlaufend und gleichmäßig erfolgt und dürften aufgrund der chronologisch belegten Nachweise noch nicht zum Stillstand gekommen sein.

Die Neigungen und Ausbauchungen der Mittelschiff- und Seitenschiffwände nach Norden stehen in keinem Verhältnis zu den geringfügigen Setzungen auf der Nordseite, hier mussten andere Ursachen eine Rolle gespielt haben. Zudem müssen diese Setzungen jüngeren Datums sein, denn die Deckenrisse dürften erst nach der letzten Innenrestaurierung von 1957/59 entstanden sein (s. auch 4 messtechnische Bauüberwachung). Verformungen durch Gewölbeschub scheiden aus, denn im Mittelschiff war bis 1740 eine flache Holzdecke vorhanden und die danach eingebaute barocke Spiegeldecke besteht aus einer verputzten Lattenkonstruktion, die an der Balkenlage des Dachwerkes aufgehängt und an den Seiten zu den modellierten Kämpfern mit Spanten abgerundet ist.

Um die Ursachen der Wandneigungen im Schiff zu ergründen, wurde die Dachkonstruktion in die Untersuchung mit einbezogen. Das mittelalterliche Sparrendach besteht aus Deckenbalken, Sparren, Fußstreben und Kehlbalken. Die Konstruktion ist in sich abgebunden und verursacht keinen Horizontalschub, da sowohl die Knotenpunkte von Deckenbalken und Sparren als auch Kehlbalken und Sparren nahezu vollständig intakt sind. Die Fußpunkte der Dachkonstruktion passen sich jeweils dem Wandverlauf an. Vermessungen entlang der Fußstreben auf der Nordseite zeigen, dass die Ausbauchung des Dachstuhls nahezu identisch mit dem Grundrissverlauf des Deckenspiegels in Höhe Mittelschiff- und Chordecke ist. Aus dendrochronologischen Untersuchungen geht hervor, dass der Dachstuhl 1398, nach einem Stadtbrand in Konstanz, errichtet wurde. Somit ist davon auszugehen, dass zu diesem Zeitpunkt, somit ungefähr 130 Jahre nach der Klostergründung, ein Großteil der Verformungen schon bestanden hatte, da sich ansonsten die Knotenpunkte durch die starken Verschiebungen verändert oder beschädigt hätten.

Zur Verformung des historischen Mauerwerks wird folgende Hypothese aufgestellt: Der beim Bau der Kirche verwendete Kalkmörtel erhärtet sich sehr langsam und verformt sich in einem jungen Stadium auch bei geringen Spannungen plastisch, d.h. die Wandneigungen dürften zumindest zum Teil unmittelbar nach der Bauzeit entstanden sein. Möglicherweise hatte sich das Mauerwerk nach dem Brand von 1398 weiter verformt. Möglich sind auch Verformungen nach den Umbauten in der Barockzeit – Rundbogenfenster anstelle von Okuli in den Obergaden und Rundbogenfenster anstelle von kleineren Spitzbogenfenstern in den Seitenschiffen.

Ein Aktenhinweis von 1901 gibt weitere Aufschlüsse zu den Verformungen: „Geometer Bosch stellt fest, dass die Längswände des Mittelschiffes eine Ausbuchtung von 45 cm gegen Norden ausweisen und das Überhängen der südlichen Mittelschiffwand von der Decke weg gegen Norden 34 cm beträgt“. Unklar ist, an welchen Stellen Geometer Bosch gemessen hatte, und ob er die Maximalwerte ermitteln konnte. Kalkuliert man diese Unwägbarkeiten ein, sind folgende Aussagen im Vergleich mit den Beobachtungen von 1989/90 möglich: Der größte Teil der Verformungen dürfte schon 1901 bestanden haben. Danach können weitere, jedoch geringfügige Neigungsvergrößerungen entstanden sein. Mögliche Vergleichswerte schwanken zwischen 0 und 7 cm.

## 4 Geotechnische Untersuchung und messtechnische Bauüberwachung

Die Dreifaltigkeitskirche liegt im Bereich von Endmoränen der Würmeiszeit. Über dem Geschiebemergel aus Sand und Kies befindet sich eine Schicht aus Seeton, tonige, z.T. auch sandige Schluffe von weicher bis breiiger Konsistenz.

Die örtlichen Baugrundverhältnisse und die Gründung wurden mit Kernbohrungen, elektrischen Drucksondierungen und Schürfgruben erkundet. Es zeigte sich, dass die Mächtigkeit des Seetons auf der Südseite der Kirche 11 m und auf der Nordseite 16 m beträgt. Weiterhin wurde die Südseite auf einer Schicht aus Kies und Sand gegründet, wogegen die Nordseite sich direkt auf der natürlichen und somit weichen Deckschicht befindet. Die Nordseite war dadurch wesentlich stärker setzungsgefährdet. Verschiedene Fundamentbreiten und unterschiedliche Lastabtragungen aus Pfeilern und Wänden führten zu unterschiedlichen Sohlspannungen, die z.T. den rechnerischen Sicherheiten gegen Grundbruch nicht mehr entsprachen.

Schon 1989 wurde im Zuge der Bauaufnahme ein messtechnisches Bauüberwachungssystem mit fest installierten Punkten aufgebaut. Setzungen wurden durch Feinnivellement und Neigungen durch Vorwärtsschnitte beobachtet. Anhand der photogrammetrischen Aufnahmen konnte das Rissbild kontrolliert werden; bei Bedarf hätte man die Risse mit zeitversetzten Aufnahmen messtechnisch vergleichen können. Die Abrisse zwischen Schiff und Chor wurden zusätzlich anhand markierter Stellen mit einer Schieblehre beobachtet. Fünf Folgebeobachtungen wurden bei den Setzungs- und Rissmessungen durchgeführt; die Neigungen wurden zweimal, zuletzt 1995, kontrolliert. Während bei den Neigungs- und Rissbeobachtungen mit Ausnahme der östlichen Chorwand keine eindeutigen Veränderungen festgestellt wurden, zeigten die in Abständen von ein bis zwei Jahren durchgeführten Höhenmessungen Bauwerksschwankungen bis zu 1,2 mm und einseitige Setzungen von Westen nach Osten und von Süden nach Norden bis zu 2,5 mm innerhalb von sechs Jahren.

Die Bauanalysen zeigen, dass bei der Dreifaltigkeitskirche in früheren Jahrhunderten ungleichmäßige Setzungen offensichtlich keine Rolle gespielt hatten. Bei den besonderen Baugrundverhältnissen in Konstanz droht immer dann Gefahr, wenn ein Gebäude unterschiedliche Baumassen aufweist, wie nach dem Anbau der Treppentürme, oder wenn Tiefbaumaßnahmen mit Grundwasserveränderungen einseitige Setzungen verursachen. Die Bauschwankungen und einseitigen Setzungen der letzten Jahre können somit auch mit den vielen Baumaßnahmen in der unmittelbaren Umgebung und den damit verbundenen tiefen Eingriffen in den Untergrund in Verbindung gebracht werden.

1995 wurden im Zuge der Baugrunderkundungen in die Kernbohrlöcher Systeme installiert, die die vertikalen und horizontalen Verschiebungen im Untergrund messen; zusätzlich wurden pneumatische Porenwasserdruckaufnehmer eingebaut. Weiterhin wurden, nachdem sich abzeichnete, dass Sicherungsmaßnahmen erforderlich werden, automatische Präzisionsniveleliere installiert, die in vorgegebenen Messzyklen die Höhen von vierzehn mit Strichcodelatten versehene Punkte kontrollieren. Zusätzlich werden die Neigungen von drei Pfeilern mit festinstallierten 8 m langen Pendeln gemessen. Alle Messdaten werden von einer automatischen Station abgefragt, gespeichert und ausgewertet. Sie stehen sowohl auf der Baustelle, als auch per Datenfernleitung den Sachverständigen zur Verfügung, sodass bei der Überschreitung von Grenzwerten unmittelbar eingegriffen werden kann.



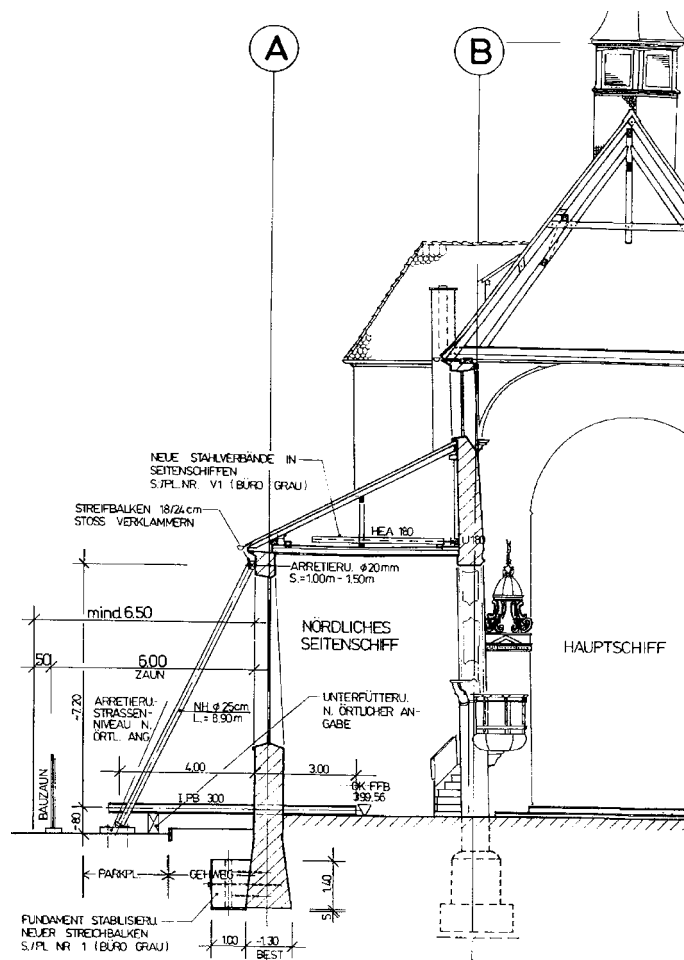


Abb. 4: Sanierungskonzept im Bereich des nördlichen Seitenschiffes mit Stahlverbänden über der Seitenschiffdecke und der Fundamentverbreiterung auf der Nordseite des Seitenschiffes. Während der Bauarbeiten mussten Stahlträger durch die Seitenschiffwand und hölzerne Streben zur Sicherheit installiert werden. (AICON Amann Infutec Consult AG)

## 5 Maßnahmen zur statischen Sicherung

Die Verformungsanalyse zur aufgehenden Konstruktion, die Analyse der bestehenden Bauwerksgründung und die Ergebnisse der messtechnischen Folgebeobachtungen führten zu dem Ergebnis, dass eine statische Sicherung zwingend erforderlich ist. Im Herbst 1998 konnte ein Konzept einschließlich einer Kostenaufstellung für einen ersten Bauabschnitt zur Stabilisierung der Kirche vorgestellt werden. Die Maßnahme ist Voraussetzung für eine nachfolgende Innenrestaurierung und Außenrenovierung.

Mit den Bauarbeiten wurde 1999 begonnen. Sie gliedern sich in die Gründungssanierung mit Verbreiterung der Fundamentsohlen durch vorgespannte Streichbalken am Westgiebel, an der westlichen Chorwand und an der nördlichen Seitenschiffwand sowie in aussteifende Stahl-

verbände über beiden Seitenschiffdecken zur Verhinderung weiterer Schiefstellungen der Arkadenwände.

Im Zuge der Aushubarbeiten zur Herstellung der Streichbalken wurde eine Fülle von historischen Befunden angeschnitten, die wichtige Schlüsse auf die Bau- und Siedlungsgeschichte zulassen. Die Arbeiten wurden deshalb systematisch von Archäologen, Restauratoren und Bauforschern begleitet.

2001 befindet sich die Kirche in einer Ruhe- und Beobachtungsphase. Zeigt sich danach oder auch in späterer Zeit, dass die Stabilisierungsmaßnahmen nicht ausreichen, müssen Bohrpfähle bis zur tragfähigen Schicht der Endmoräne eingebracht werden. In den Streichbalken zur Fundamentverbreiterung sind die entsprechenden Durchstoßpunkte mit Kunststoffrohren bereits vorbereitet. 2002 sollen die Arbeiten mit der Innenrestaurierung und Fassadenerneuerung fortgesetzt werden.

## **6 Fazit**

Die Verformungswerte der Dreifaltigkeitskirche in Konstanz wurden auf der Grundlage einer detaillierten photogrammetrisch/messtechnischen Bauaufnahme ermittelt. Parallel dazu wurden die baugeschichtlichen und bautechnischen Daten erhoben. Durch die Korrelation der messtechnischen und baugeschichtlichen Ergebnisse war es möglich, eine Verformungsanalyse auszuarbeiten. Dabei konnten die Ursachen der Verformungen und deren Zeitabläufe weitgehend ermittelt werden. Parallel zur Bauaufnahme wurde ein messtechnisches Bauüberwachungssystem aufgebaut, und es wurden geotechnische Untersuchungen durchgeführt. Das Konzept zur statischen Sicherung wurde nach einer Beobachtungsphase von nahezu 10 Jahren und nach sorgfältiger Abwägung aller Argumente aufgestellt. Die Baumaßnahmen erfolgen stufenweise mit der Möglichkeit interaktiv eingreifen zu können, sobald messtechnisch definierte Grenzwerte überschritten werden.

# Characterisation of Spatial and Temporal Vegetation Dynamics of drought affected arid and semi-arid Regions

A multi-temporal Analysis of NOAA - AVHRR data from Kenya

GERD EIDEN<sup>1</sup>

*Abstract:*

*Numerous studies show the potential application of NDVI data for monitoring purposes. However, only little is published on the analysis on long time series data. The present study examines what kind of methodological approach can be applied for the analysis of time series composed of 357 individual NDVI scenes from Kenya (GIMMS data set) and how the information can be used for deriving fundamental information about the vegetation dynamics in arid and semi-arid regions. The understanding of the spatial and temporal dynamics of vegetation dynamics can be regarded as essential for an improved range management.*

## 1 Introduction

The objective of this study is to gather information on the spatial and temporal dynamics of vegetation growth in the arid and semi-arid regions of Kenya by means of the analysis of long time series of NOAA AVHRR satellite data. The knowledge of the spatial and temporal dynamics of the vegetation dynamics and thus the available natural resources are indispensably preconditions for the development of sustainable resource management.

Biomass production in arid and semi-arid regions depends mainly on the rainfall conditions, which are extremely variable. This variability represents the minimum factor concerning the resource potential and determines the whole socio-economic nomadic system.

Conventional approaches for assessing the variability of production are based on rainfall records, which are of limited use (missing data, scattered network of rainfall stations).

Meaningful complementary information sources are NOAA-AVHRR satellite data, characterised by a high temporal resolution and their synoptic overview of extensive regions (EIDEN et al. 1990). The Normalised Difference Vegetation Index (NDVI), derived from NOAA-AVHRR data enables a detailed mapping of green biomass, which is mainly controlled by mesoscale rainfall processes and edaphic conditions. In the framework of this study 357 single NOAA-AVHRR-NDVI scenes are used, showing the vegetation development over a time period of more than 10 years (July 1981-June 1991). For the first time the consistent spatial information source enables the monitoring of periodic or episodic changes of the earth surface over a longer period of time.

The study tries to answer the following questions:

- Is it possible to use the NDVI data to analyse temporal variation and spatial pattern?
- Is it possible to derive concrete conclusions for an improved range management?
- Which methodological tools and approach can be applied to analyse long NDVI time series?

---

<sup>1</sup> Dr. Gerd Eiden, LANDSIS g.e.i.e. 3, Rue Wenceslas 1er, L - 2724 Luxembourg  
gerd.eiden@landsis.lu

## 2 Methods

The analysis of the NDVI time series encompasses in general the spatial differentiation of the dry regions of Kenya with regards to the development of the NDVI as an indicator of the vegetation growth. The data matrix is composed of 300\*300 pixels, covering the entire region of Kenya. 357 individual NDVI Maximum Value Images show the temporal development from July 1981 to June 1991. The main task is to classify the pixel based NDVI profiles into coherent spatial units, showing a similar NDVI development over time (low within-classes variation) but also presenting a maximum difference between the classes. The methodology applied can be briefly summarised as follows:

### 2.1 Harmonic analysis

In a first step the original GIMMS NDVI data, also known as the FAO ARTMEMIS data set was further processed (LOS et al. 1993, LOS 1994). The data treatment was basically dealing with the improvement of the geo-referencing in order to exactly overlay the 357 NDVI images and the replacement of cloud covered pixels by NDVI values from the previous and subsequent decade.

In a second step, each pixel based NDVI profile, composed of 357 NDVI values, was modelled by means of a harmonic analysis (SCHÖNWIESE 1985, MESSERLI 1975). The underlying concept of the harmonic analysis is that each time series can be modelled by overlaying a set of sinus and cosine oscillations (see fig. 1). Thus each time series can be represented by a small number of significant coefficients, enabling an efficient data reduction and a simultaneous smoothing of the time series. Each phenological year, starting in decade 25 (Septem-

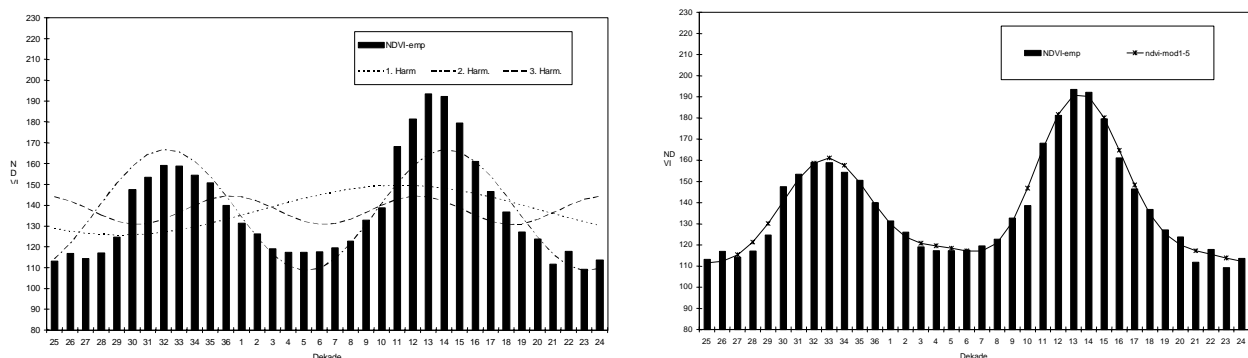


Fig. 1: Modelling of an empirical NDVI profil through harmonic analysis (a) modellisation of individual harminic oscillations and (b) overlay of 5 harmonics

ber) and ending in decade 24 (August) of the following year is modelled individually, resulting in a set of 10 harmonic coefficients and the overall annual mean. The derived harmonic coefficients from each pixel based NDVI profile are used as input variables for the following classification process.

### 2.2 Classification of seasonal types and homogeneous regions

The classification (or regionalisation) of the coefficients is based on a hybrid approach: a broad stratification of the arid and semi-arid regions of Kenya and in a subsequent classification within each strata. The (hierarchical) classification itself is based on the analysis of the dendrogram, showing the agglomeration scheme, starting for each individual pixel up to one single class. The dendrogram facilitates the determination of an appropriate number of classes and gives valuable information about the similarity structure of the aggregated classes. The assignment of the individual pixels to one of the predefined classes is done by

means of a K-mean cluster algorithm. This approach is proven to be very practical, enabling a transparent and comprehensible classification procedure.

### 3 Results

#### 3.1 Stratification of seasonal types of NDVI profiles

The result of the first step of the classification of the harmonic coefficients (post-classification) is shown in Fig.2. Based on the analysis of the dendrogram seven different strata (or classes) are defined (see figure 3), facilitating an initial structuring of the divers NDVI profiles into a few major groups (seasonal types).

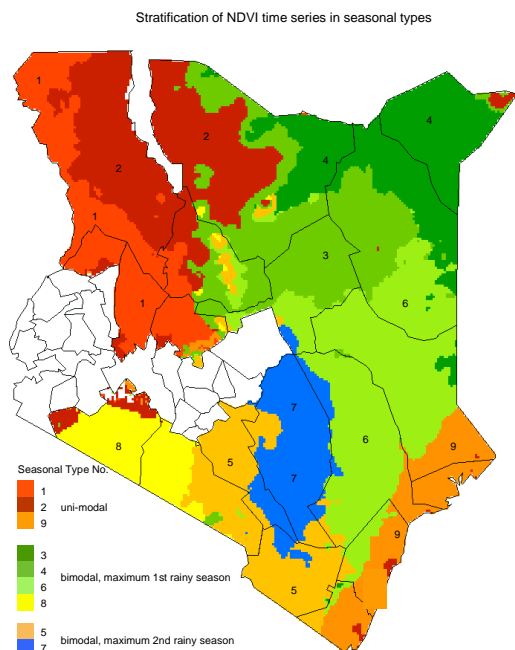


Fig. 2: Seasonal types of NDVI profiles

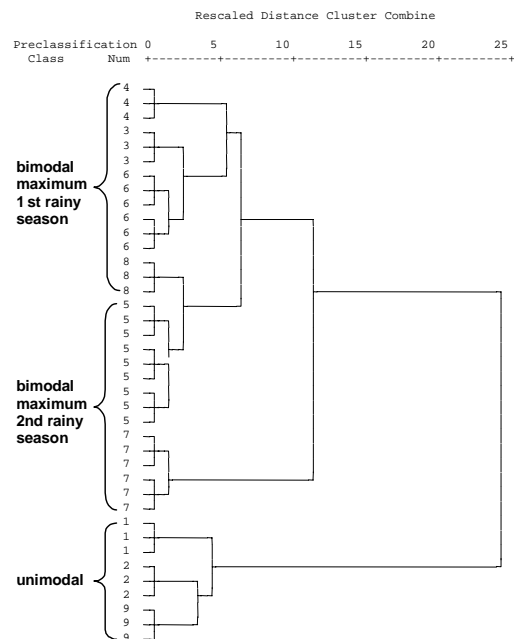


Fig. 3: Dendrogram of the post classification

They all show very distinct annual behaviour of the NDVI development, including the inter-annual variation over the 10 years. Three main seasonal types can be distinguished:

- unimodal regimes in the north-western parts and at the coast (type 1,2,9),
- a bimodal regime, with a maximum in the first rainy season in the northern and eastern parts of Kenya (type 3,4,6,8) and
- a second bimodal regime but with a maximum in the second rainy season (type 5,7).

These different seasonal types correspond very closely with the meso-scale rainfall regime in the arid and semi-arid regions of Kenya and prove the close link between rainfall and NDVI in arid regions.

#### 3.2 Spatial differentiation of homogeneous regions

In a second classification step a further spatial differentiation within each seasonal type was performed. These homogeneous regions show a similar NDVI profile over the years. In total 94 homogeneous regions are distinguished, which show the small scale variation of NDVI over time. Each homogeneous region has its unique NDVI profile, determined by the meso-scale rainfall pattern, modified by the high rainfall variability.

This is highlighted in the two different examples given below.

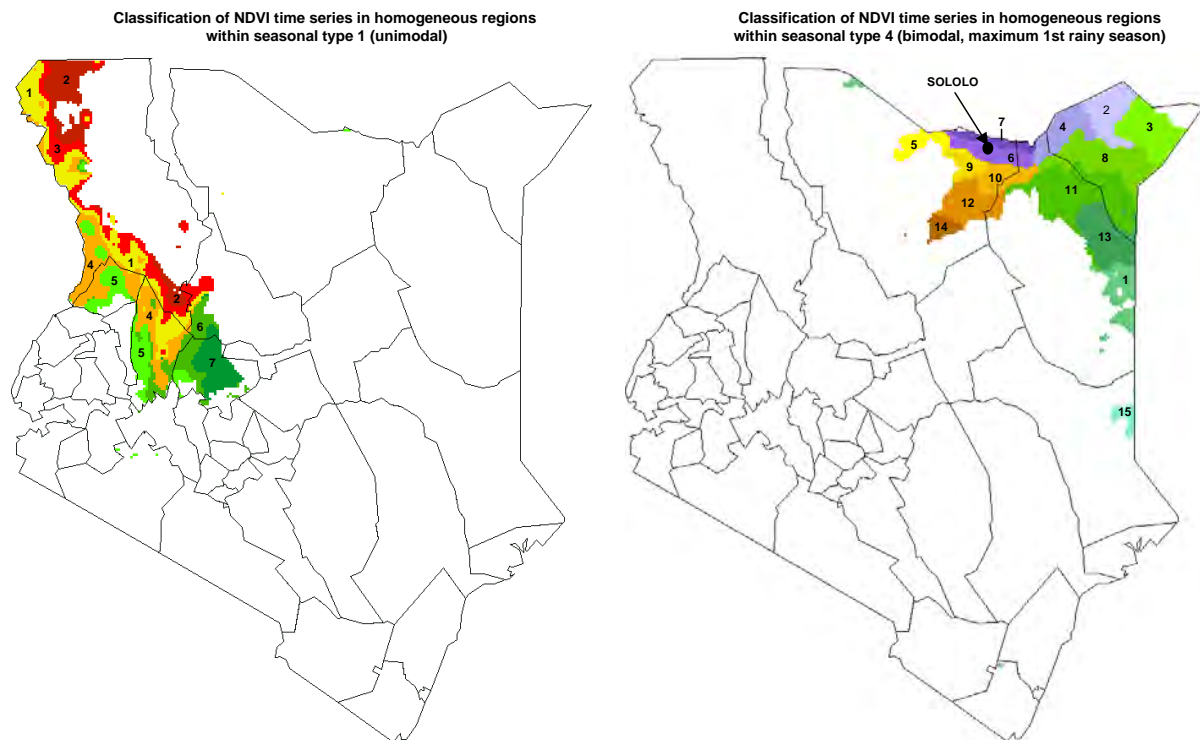


Fig. 4: Classification of homogeneous regions within (a) seasonal type 1 and (b) 4

The first example covers the seasonal type 1, located in the north western parts of Kenya (fig. 4a). Seven homogeneous regions can be distinguished. They show a strong orographic gradient i.e. follow the steep rise of the rift valley, which causes exceptional orographic rainfall events and very distinct vegetation types. In general the area can be characterised by a unimodal NDVI regime, with a clear maximum in the first rainy season. However, the NDVI time series in figure 5a, presented in the form of isopleth diagram, shows the high variability in the start and the length of the first rainy season (around decade 9 to 15) and sporadic occurrence of the second rainy season (decade 31 – 3) as well as the exceptional occurrence of the “continental rains “ in August – October (decade 21-27).

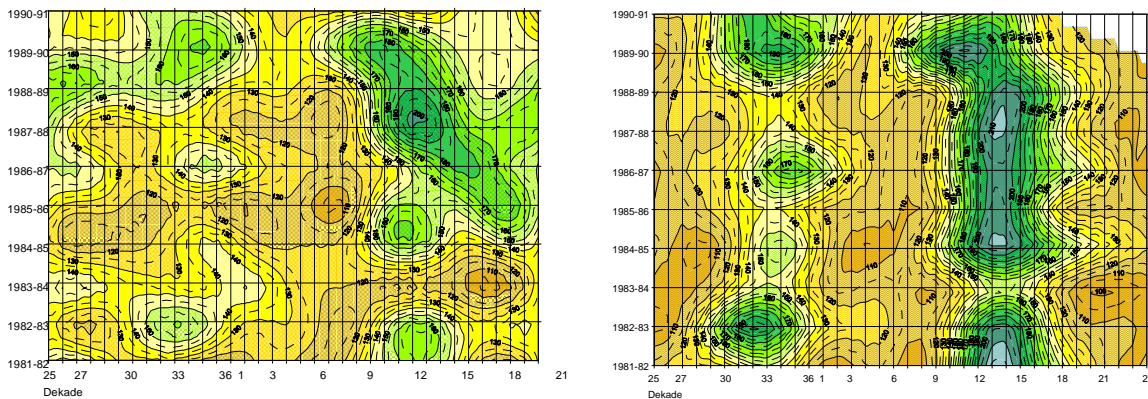


Fig. 5: NDVI isopleth diagrams of (a) homogeneous region 7 in seasonal type 1 and (b) homogeneous region 6 in seasonal type 4

In contrast to the north western parts, the north eastern parts of Kenya display a completely different rainfall pattern and thus a very distinct NDVI development. The seasonal type 4 (figure 4b) is dominated by a bimodal regime with a maximum of the NDVI in the first rainy season. The localisation and the size of the different homogeneous regions is influenced by the increased amount of precipitation towards the Ethiopian highlands and the distinct vegetation type, both causing gradual changes in the NDVI time series.

Both the rainfall pattern, the corresponding NDVI profile and their close relationship is exemplary displayed in figure 6 for the rainfall station Sololo, located in homogenous region 6 (see fig. 4b). This area shows an almost regular start of the long rainy season in decade 8-9, with a variable length up to decade 18-21. The short rainy season, if occurring, has a variable start and duration.

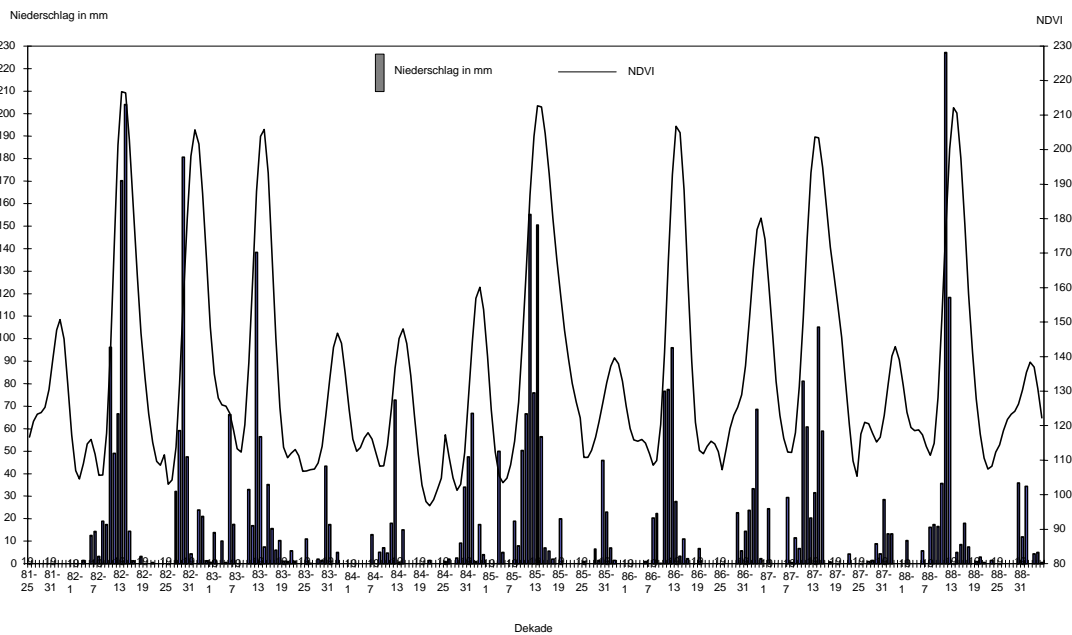


Fig.6: Rainfall records and NDVI time series for Sololo (1981-1988)

The brief interpretation of the two examples shows very clearly the potential use of the innovative character of this study.

Based on the harmonic analysis, NDVI profiles can be modelled easily. The classification process of the coefficients leads to clear spatial differentiation of coherent units, which are characterised by a similar behaviour of the NDVI throughout the time.

Moreover, the examples demonstrate very clearly the close relationship between rainfall and NDVI development, which is beyond doubt valid for the arid and semi-arid regions with a pronounced dry season (ECKLUND 1996).

The high number of regions obtained (9 seasonal types and 94 homogeneous regions) demonstrates the complex rainfall pattern over Kenya and the high temporal variability. The NDVI indicates the small-scale variation rainfall processes which are in certain areas, particularly in the plainland, considered as random rainfall events.

The classification results and their adequate interpretation provide basic information about the general spatial pattern and the temporal development of the vegetation dynamics and thus the production potential of rangeland vegetation and, of utmost importance, its variation in time and space. In contrast to rainfall records, long time series of AVHRR-NDVI data enable a very detailed spatial characterisation of the vegetation dynamics, which makes them essen-

tial, particularly in arid regions where rainfall information is non-existent or incomplete (PAULY 1993).

### 3.3 Spatial and temporal structures of the vegetation dynamics

The final analytical step of this study is focusing on the spatial and temporal structures of the vegetation dynamics within the entire arid and semi-arid regions in Kenya.

For each of the 94 homogeneous regions the NDVI values (sum of NDVI values) for

- the first rainy season from decade 9 to 16 i.e. from March to April,
- the second rainy season from decade 17 to 8 of the successive year, and
- for each year is calculated

Based on a comparison with the long term mean within each of the homogeneous regions, the character of the rainy seasons is assessed and categorised (exceptionally wet, wet, normal, dry, drought). The aggregation of the NDVI aims to facilitate the detection of structural and temporal patterns throughout the time series. Figure 7 shows the character of second rainy seasons (also called short rainy season) covering a period from 1981/82 to 1990/91.

The visual interpretation as well as the correlation analysis reveals some interesting aspects:

- The qualitative character of the second rainy season is very diverse and distinct: dry and wet conditions, i.e. favourable vegetation conditions or droughts, occur within the vicinity of homogeneous regions or within small distances. In terms of range management this means that the mobility of the nomads should be supported and not - as current policies are aiming at - further limited (JAETZOLD 1995).
- Remarkable is also the very controversial character of the rainy season in several areas: three regions can be separated, all showing an independent character of the NDVI. These regions could (at least theoretically) be considered as "drought compensation zones" i.e. regions which might provide sufficient fodder resources for the survival of livestock. Other compensation zones, e.g. from range experts suggested in the south-eastern parts of Kenya do not seem to exist (MÄCKEL & WALTHER 1993, JAETZOLD 1995).
- Even in "normal" years, with average rainfall amount and distribution or seasons without any exceptional drought the growing conditions vary considerably, forcing nomads to react. Therefore the need for a regional monitoring system, informing regional and national decision makers in real time about the current conditions becomes obvious.
- The use of a monitoring system should not be limited to forecast potential national droughts, as for example in 1984.
- On the other hand, the retrospective view shows that in 1989 and 1990 extreme favourable conditions (exceptional amount of rain, early start and long lasting wet season) prevailed. In these years comprehensive studies about the carrying capacity of Kenya's rangelands were conducted. If such variability is not adequately considered, this may lead to inadequate conclusions about the production potential (LANG'AT et al. 1994, CHEGE 1994).

These conclusions are only a brief selection of the main findings. Nevertheless they indicate the huge potential of multi-temporal NDVI data for rangeland management, particularly in semi-arid regions where adequate rainfall records are lacking.



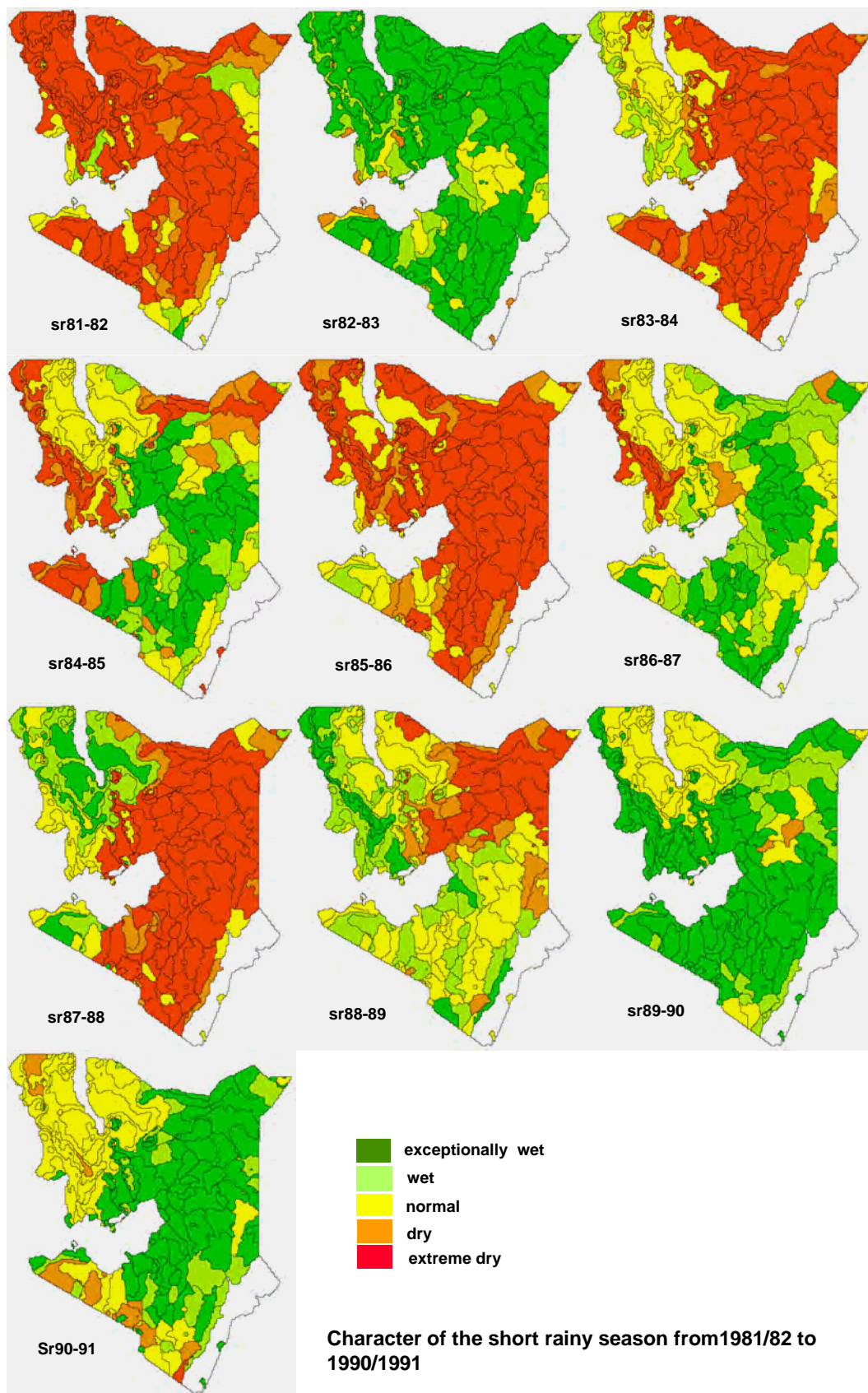


Fig. 7: Character of the short rainy season (1981/82 - 1990/91) for each of the 94 homogeneous regions

## 4 Conclusions

The study aims at exploring the information content of long time series NDVI data and their potential application within range management.

The methodology applied (harmonic analysis and classification) has been proven to be practical to extract and aggregate the time series into a few significant parameters. The results reveal the wide and unique potential of application of NOAA-AVHRR data, particularly for capturing the variable production of natural resources and for monitoring purposes in arid and -semi-arid regions, particularly where no complementary information (e.g. rainfall records) is available. The interpretation of the results also show that long NDVI time series provide essential information for an improved range management. However, in order to give such long time NDVI data analysis extended practical value, they should be linked more closely to other data. The causal relationship between NDVI, vegetation data (maps), biomass production and fodder value as well as rainfall data should be investigated in detail, specifically in its spatial and temporal dimension. The combination of NDVI data with additional data sets heightens the value of satellite data for theoretical and, as shown in this study, for more practical purposes, therefore contributing to a better understanding of vegetation dynamics and thus to the development of sustainable range management strategies.

## 5 Acknowledgements

The author would like to thank Christoph Dreiser and Sönke Birk for their critical remarks and suggestions. The study was granted by the University of Trier under the post graduate scholarship of Rhineland-Palatine.

## 6 References

- SCHÖNWIESE, C.D. (1985): *Praktische Statistik*. Berlin
- CHEGE, A.M. (1994): *Range Management in Kenya: Progress and Status*. Range Management Handbook of Kenya, Vol 1, Nairobi
- EIDEN, G.; DREISER, C.; GESELL, G.; KÖNIG, T. (1991): *Large Scale Monitoring of Rangeland Vegetation Using NOAA/11 AVHRR LAC Data. Application to the Rainy Seasons 1989/90 in Northern Kenya*. Range Management Handbook of Kenya, Vol. III/4, Oberpfaffenhofen, Nairobi
- EIDEN, G. (2000): *Spatial-temporal dynamics of biomass production of drought impacted, semi-arid and arid regions in Kenya. A quantitative-statistical analysis of multitemporal NOAA-AVHRR satellite data*. Trierer Ostafrika Studien, Band 21,
- EKLUNDH, L. (1996): *AVHRR NDVI for monitoring and mapping of vegetation and drought in East African environments*. Meddelanden från Lunds Universitets Geografiska Institutioner, Avhandlingar 126, Lund
- JÄTZOLD, R. (1995): *Die heutigen Möglichkeiten der früher durch Reaktionselastizität umweltschonenden mobilen Weidewirtschaft, insbesondere in Ostafrika*. in LEISCH, H. [Hrsg.]: *Perspektiven der Entwicklungsländerforschung : Festschrift für Hans Hecklau*, Selbstverl. d. Geograph. Ges.Trier, S. 171-184
- LANG´AT, R.K.; MWANGATA, J.H.N. (1994): *Range Management in Kenya: Progress and Status*. Range Management Handbook of Kenya, Vol 1, Nairobi
- LOS, S.O. (1993): *Calibration adjustment of the NOAA AVHRR NDVI without recourse to component channel 1 and 2 data*. *International Journal of Remote Sensing* 14, S. 1970-1998

- LOS, S.O.; JUSTICE, C.O.; TUCKER, C.J. (1994): A global 1° by 1° NDVI data set for climate studies derived from the GIMMS continental NDVI data. *International Journal of Remote Sensing*, Vol.15, 3493-3518.
- MÄCKEL, R.; WALTHER, D. (1993): Naturpotential und Landdegradierung in den Trockengebieten Kenias. Stuttgart, Steiner, *Erdkundliches Wissen* ; 113
- MESSERLI, P. (1979): Beitrag zur statistischen Analyse klimatologischer Zeitreihen. *Geographica Bernensia G10*, Bern
- PAULY, M. (1993): Dürrefrühwarnsysteme und nationales Dürremanagement am Beispiel der Trockenräume Nord- und Südostkenyas : welchen Beitrag kann die statistische Analyse von Niederschlagsdaten leisten?, *Materialien zur Ostafrika-Forschung* ; 11, Trier

# Test of the Results for the Interior Orientation with On the Job Calibration For A Metric Camera Using Fuzzy Sets

**Bahadır ERGÜN**

[bergun@srv.ins.itu.edu.tr](mailto:bergun@srv.ins.itu.edu.tr)

**Istanbul Technical University Photogrammetry Department**

## *Abstract*

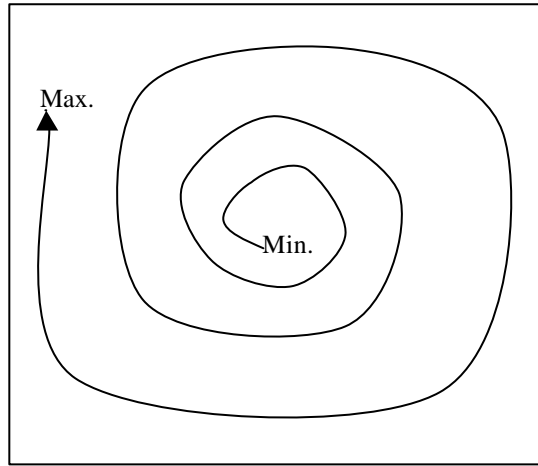
*In this study, the classical on the job calibration have been done using with bundle block adjustment afterwards the coordinates of the model points, which were measured with geodetic methods and its image coordinates and radial distortions of the reseau points have been compared. Therefore the fuzzy sets have been built for comparing the image coordinates and its residuals before calibration and after the calibration protocol with basic mathematical algorithm on the job calibration. The camera of this study is Rollei 6008 metric camera, which has 120 reseau point and 120 mm focal length. The test object, which has rural surface model, has been wing of a ship propeller. The fuzzy sets have been built for measuring image coordinates with radial distortion for each point with back propagation from the calibration report which obtained with bundle block adjustment for checking inner orientation with the residuals of the inner orientation parameters. The algorithm of the fuzzy logic determines the image coordinates of the principle points automatically and estimation of the reseau points and residuals of the each point have been obtained with radial distortion affect. The results of this study have indicated the calibration methods with fuzzy sets have been obtained image coordinates with best residuals and results for on the job calibration and also behavior of the metric lens about distortions with metric cameras especially for reseau crosses.*

## **1 Introduction**

For analogue metric cameras, the reseau plate has been used more often therefore the radial distortion and the other systematic errors have been corrected with the reseau plate which the coordinates have been well known. In this study, images which had been taken with Rollei 6008 analogue metric camera have been used for inner orientation with classical inner orientation method and also with new reseau coordinates which have been calculated from fuzzy sets. The results from the outer orientation, which used calibrated reseau coordinates, and also from calculated new reseau coordinates, which calculated fuzzy sets, have been compared.

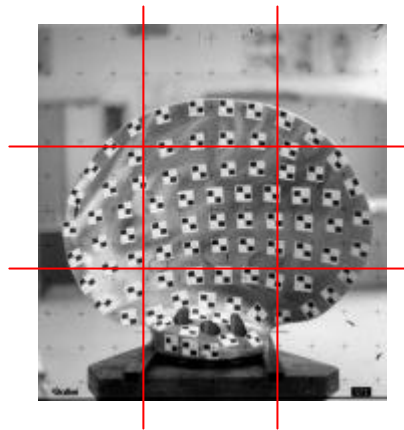
## 2 Algorithm

The physical effect of the radial lens distortion on images have been recognized for a image like a spiral and mathematical function of this effect is sinus function between the radial distance and  $\tan \theta$ . (Fig.1)



**Figure 1:**The physical effect of the radial lens distortion on a image

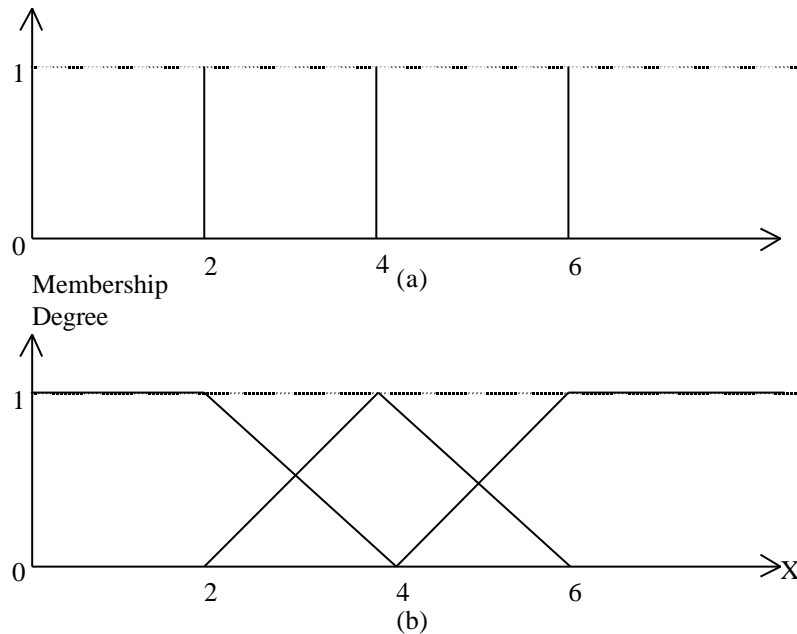
For this aim, each image that would be used in the project separated same nine parts. Therefore in every part of the images, reseu crosses have been measured automatically with Pictran software after that the calibrated coordinates of the reseu crosses recalculated with Fuzzy membership functions.



**Figure 2:** Different Membership Parts of the Images

The recalculation procedure of the reseu crosses has been adapted with Fuzzy sets which have occurred from optical distortion functions for this specific camera Rollei 6008. The

every image parts have got different membership degree in the Fuzzy sets with Matlab and FuzzyTech Software. In this step, symmetric geometry has been included in the fuzzy calculation procedure.



**Figure 3:** Fuzzy Application in Matlab Software

After the basic paper by Zadeh the studies in this discussion have increased and the application area has widened. Zadeh generalised the crisp set membership degree as having any value continuously between 0 and 1. Fuzzy sets are a generalisation of conventional set theory. The basic idea of fuzzy sets is easy to grasp. Hence an object with membership degree 1 belongs to the set with no doubt and those with 0 membership values again absolutely do not belong to the set but objects with intermediate membership degrees belong to the same set partially. The greater is the membership degree the more the object belongs to the set. For instance, if approximately positive even integer numbers are requested then the membership function in Figure 3 takes the form in Figure 1 where there are interference between the numbers desired because of a fuzzy linguistic word approximately. In this manner any fuzzy linguistic word can be expressed as fuzzy sets (Fig.4,5,6).

The following table lists all linguistic variables of the system and their term names.

Variable Name	Term Names
X	very_low, low, medium, medium_high, high, very_high
Y	small, medium_small, medium_large, large
vx	very_small, small, medium, medium_large, large

**Table 1:** Linguistic Variables

The properties of all base variables are listed in the following table.

Variable Name	Min	Max	Default	Unit
X	0	25.999	0	Units
Y	-25.000	0	0	Units
Vx,Vy	-0.1	0.1	0	Units

**Table 2:** Base Variables

The default value of an output variable is used if no rule is firing for this variable. Different methods can be used for the defuzzification. The 'best compromise' is produced by the methods:

CoM (Center of Maximum)

CoA (Center of Area)

CoA BSUM, a version especially for efficient VLSI implementations

The most plausible result is produced by the methods:

MoM (Mean of Maximum)

MoM BSUM, a version especially for efficient VLSI implementations

The following table lists all variables linked with an interface as well as the respective fuzzyfication or defuzzification method. The rule blocks contain the control strategy of a fuzzy logic system. Each rule block confines all rules for the same context. A context is defined by the same input and output variables of the rules. The rules' 'if' part describes the situation, for which the rules are designed. The 'then' part describes the response of the fuzzy system in this situation. The degree of support (DoS) is used to weigh each rule according to its importance. The processing of the rules starts with calculating the 'if' part. The operator type of the rule block determines which method is used. The operator types MIN-MAX, MIN-AVG and GAMMA are available. The characteristic of each operator type is influenced by an additional parameter.

For example:

MIN-MAX, parameter value 0	=	Minimum Operator (MIN)
MIN-MAX, parameter value 1	=	Maximum Operator (MAX)
GAMMA, parameter value 0	=	Product Operator (PROD)

The minimum operator is a generalization of the Boolean 'and'; the maximum operator is a generalization of the Boolean 'or'. The fuzzy composition eventually combines the different rules to one conclusion. If the BSUM method is used all firing rules are evaluated, if the MAX method is used only the dominant rules are evaluated.

### 3 Editing Rules for Orientation

Parameters:

Aggregation:	MIN-MAX
Result Aggregation:	MAX
Number of Inputs:	120
Number of Outputs:	120
Number of Rules:	24

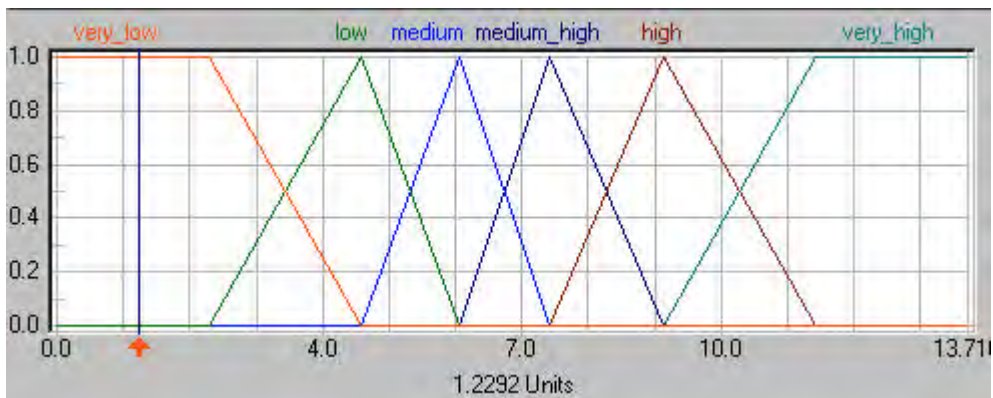


Figure 4: Fuzzy Sets for "X"

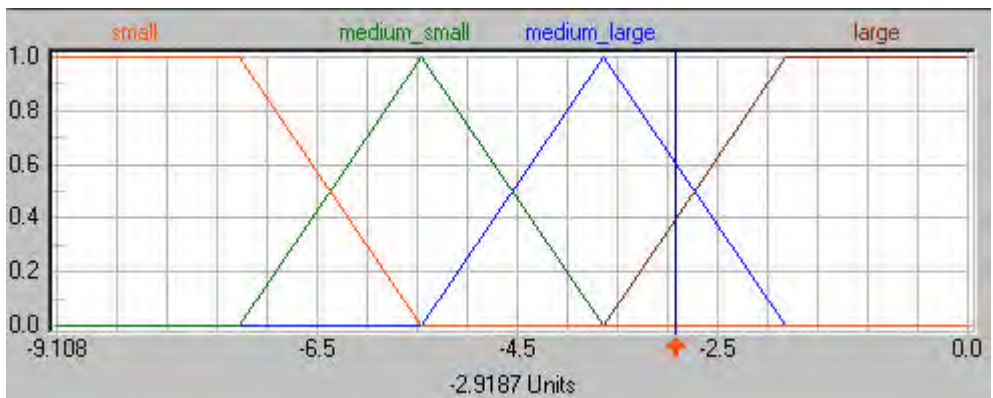
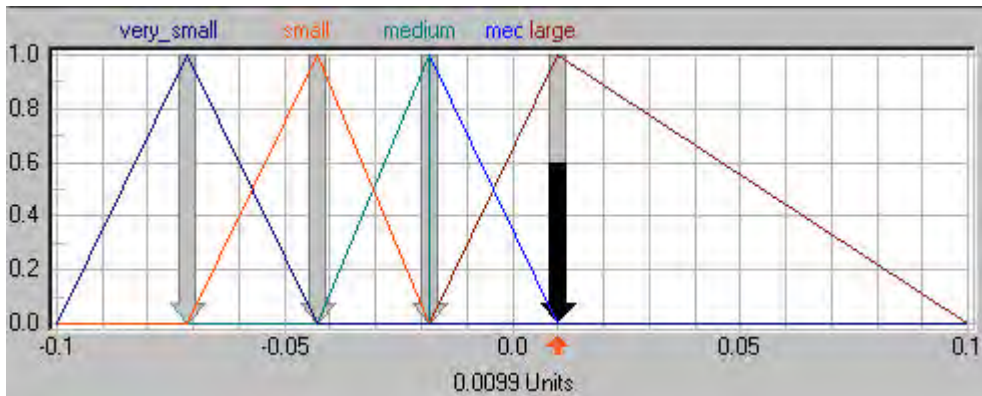


Figure 5: Fuzzy Sets for "Y"





**Figure 6:** Fuzzy Sets for "vx,vy"

## 4 Conclusion

Fuzzy based solutions require less operation amounts than the classical approaches. Hence, in the computers CPU time is comparatively very small. Besides they are more powerful than statistical solutions [5]. In this study, the results were compared between the bundle block self calibration and fuzzy calibration as below:

In the Bundle Adjustment for self calibration,  $E(vx^2) = 0.056$  mm,  $E(vy^2) = 0.0197$  mm

In Fuzzy solution for self-calibration,  $E(vx^2) = 0.002$  mm,  $E(vy^2) = 0.0062$  mm.

As a result, Fuzzy calibration is more useful and reliable than the self-calibration method which is used architectural and videogrammetric recording that deal with some industrial quick applications.

## 5 References

- Ergün, B. , Üstüntas, T., "A Digital Camera Calibration Method Using Fuyyz Logic", IV International Symposium "Turkish – German Joint Geodetic Days" Volume I page 377, Berlin 2001
- R.Y. Tsai, "Versatile Camera Calibration Technique for High-Accuracy 3D Machine Vision Metrology Using Off-the-Shelf TV Cameras and Lenses", IEEE J. Robotics and Automation, vol. 3. no.4, pp. 323-344, Aug. 1987.
- S. Ganapathy, "Decomposition of Transformation Matrices for Robot Vision", Pattern Recognition Letters, vol. 2, pp. 401-412, 1984.
- L. Zadeh, "Fuzzy Sets", Inf. Control, Vol. 8, pp. 338-353, 1965.
- J.C. Bezdek, "Fuzzy Models and Algorithms for Pattern Recognition and Image Processing", Kluwer Academic Publishers, 1999.
- T.J. Ross, "Fuzzy Logic with Engineering Applications", McGraw-Hill, 1995.

# Ikonos Geo Stereo Images: Geometric Potential and Suitability for 3D Building Reconstruction<sup>1</sup>

CLIVE S. FRASER<sup>2</sup>, EMMANUEL BALTSAVIAS<sup>3</sup> & ARMIN GRUEN<sup>3</sup>

*Abstract: An investigation of the application of 1m Ikonos satellite imagery to 3D building reconstruction is reported. The focus of the evaluation has been upon geopositioning accuracy, radiometric quality and attributes of the imagery that support building feature extraction. Following an initial review of characteristics of the Ikonos system, the multi-image dataset employed is described, along with the Melbourne Ikonos testfield. Radiometric and image preprocessing aspects are discussed and the results of 2D and 3D metric accuracy tests are presented. A quantitative and qualitative assessment of the use of stereo Ikonos imagery for generating building models is then provided, using the campus of the University of Melbourne as an evaluation site. The results of this assessment are summarised, these highlighting both the high sub-metre metric potential of Ikonos and difficulties to be anticipated in building reconstruction when the modelling should be complete and detailed.*

## 1 Introduction

Although it has now been close to 18 months since *Ikonos* imagery first became commercially available, there have been only a few accounts presented of photogrammetric analysis of this new image data. Given the present shortage of information on the photogrammetric performance of the *Ikonos* system, it has been necessary to examine essentially three salient aspects when evaluating the use of 1m stereo imagery for 3D city modelling. These comprise the geometric accuracy of geopositioning from stereo and multi-image coverage; the radiometric quality, with an emphasis on characteristics to support automatic feature extraction (e.g. noise content, edge quality and contrast); and attributes of the imagery for the special application of building extraction and visual reconstruction. In the present paper, we examine these aspects with the aid of three-fold *Ikonos* coverage of a precisely surveyed testfield covering the city of Melbourne.

The absolute geopositioning accuracies (RMS, 1-sigma) associated with the basic products for 1m *Ikonos* imagery (*Geo*, *Reference*, *Pro*, *Precision* and *Precision Plus*) are 24m, 12m, 5m, 2m and 1m, respectively. Depending on the intended function of a digital city model, metric accuracy expectations will vary, though if the very sizeable market of modelling for mobile communications is to be accommodated, accuracies at the metre level are generally sought. Thus, users of *Ikonos* imagery who seek metre-level accuracy will have to resort to acquisition of expensive *Precision* imagery. We have pursued an alternative option, with the

---

<sup>1</sup> Condensed version of a paper presented at the Third International Workshop on Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images, Ascona, Switzerland, 10-15 June 2001.

<sup>2</sup> Department of Geomatics, University of Melbourne, Victoria 3010, Australia, c.fraser@eng.unimelb.edu.au

<sup>3</sup> Institute of Geodesy & Photogrammetry, ETH-Hoenggerberg, CH-8093 Zurich, Switzerland, {manos, agruen}@geod.baug.ethz.ch

aim of yielding high accuracy results, to metre or sub-metre level, using the least expensive *Ikonos* data, namely *Geo* images, coupled with alternative computational schemes for mono-, stereo- and multi-image positioning. The only results to date that the authors are aware of involving 3D geopositioning from stereo triangulation have emanated from Space Imaging (SI) (DIAL, 2000). The reported stereo results were both encouraging and consistent with *Ikonos* product specifications.

## 2 Input data

### 2.1 Image data

The imagery comprised a stereopair of epipolar-resampled *Geo* PAN images, and a nadir-looking scene of PAN and multispectral imagery. As indicated in Table 1, the sensor and sun elevation angles for the stereopair (imaged in winter) were less than optimal. Apart from the right stereo image, the azimuths of sensor and sun differed considerably, leading to strong shadows in non-occluded areas. The overall geometry was close to that of 3-line imagery, with the base/height ratio of the stereopair being  $B/H = 1.2$ . Supplied with the stereo imagery were coefficients of the rational functions (RFCs) which provide a mechanism for object-to-image space transformation and 3D point determination.

Table 1: Acquisition parameters of the original 1m *Ikonos* PAN images

	Left Stereo	Right Stereo	Nadir
Date, Time (local)	16/7/2000, 09:53	16/7/2000, 09:53	23/3/2000, 09:58
Sensor azimuth (deg)	136.7	71.9	143.0
Sensor elevation (deg)	61.4	60.7	83.4
Sun azimuth (deg)	38.2	38.3	50.0
Sun elevation (deg)	21.1	21.0	38.0

### 2.2 Melbourne *Ikonos* testfield

Covering an area of 7 x 7km over central Melbourne, the testfield comprises an array of GPS-surveyed ground control points (GCPs) of which 32 are road roundabouts. Road roundabouts were selected since they constituted a large elliptical target with usually good contrast. The centroid of each roundabout was measured in both image and object spaces. As described in HANLEY & FRASER (2001), the centroids of each of the 32 roundabouts were determined by measuring six or more edge points around the circumference of the feature, both in the image and on the ground, and then employing a best-fitting ellipse, computed by least-squares, to determine the ellipse centres (see Fig. 1). By this means, it was possible to achieve accuracies of image and object point determination, in 2D and 3D space, respectively, to better than 0.2 pixels. To complement the image mensuration via ellipse fitting, least-squares template matching was also employed within the stereo imagery, with special care being taken to alleviate problems such as target occlusions from shadowing and the presence of artifacts such as cars (e.g. Fig. 1). In spite of significant disturbances, and size and shape variations of roundabouts, the matching performed correctly in almost all cases. In the example of Fig. 1, the top row shows the template and the two stereo images with the starting (light) and final (dark) position after a conformal transformation. The bottom row shows the matched gradients.

To evaluate the accuracy of building measurement and modelling completeness, the campus of the University of Melbourne was used. Building height data for 19 image-identifiable and

readily accessible roof corners was provided through precise GPS surveys, to 10cm accuracy. Image coordinate observations to these feature points were carried out by manual recording, both in stereo and monoscopically (for the nadir image), nominally to 0.5-1 pixel precision. However, the definition of corner points was often weak, leading to the possibility of significant errors. An existing stereopair of 1:15,000 scale wide-angle colour aerial photography of the campus was employed in the evaluation of the building extraction potential of *Ikonos* imagery. This imagery had previously been used to create a reasonably detailed 3D model of the campus, which could be compared to that derived from *Ikonos* data in terms of recoverable feature content.

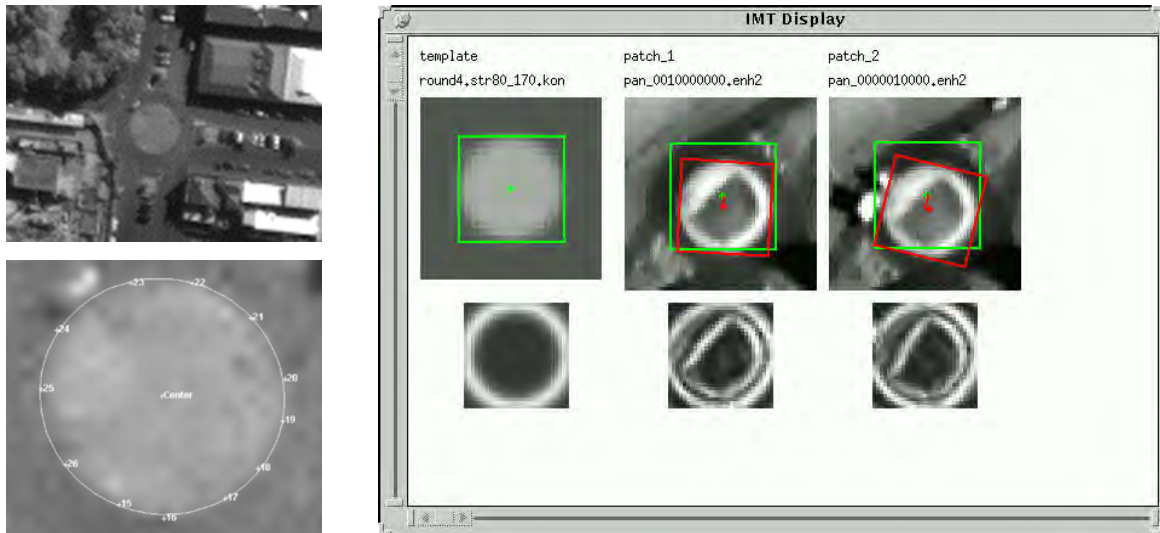


Fig. 1: Left top *Ikonos* image of roundabout; left bottom recorded edge points and best-fitting ellipse; right example of modified least squares matching

### 3 Radiometric aspects and image preprocessing

#### 3.1 Radiometric quality analysis

Prior to discussing radiometric features of the *Ikonos* imagery, it is worthy of note that operational aspects of the image acquisition are likely to have a more profound effect on the homogeneity, or non-homogeneity, of image quality than specific radiometric characteristics of the sensor system. For example, large changes in image quality and suitability for automated feature extraction are associated with variations in the sensor view angle, the sun angle and shadowing, the seasons, atmospheric conditions, and whether the scene is recorded in mono or stereo. These influences are well known, but it needs to be appreciated that with the exception of the last aspect, they are largely beyond the control of the user. Of the three images employed, the near-nadir image was superior in terms of both contrast and visual resolution. This can be explained by the higher sensor and sun elevation, though it is uncertain if this fact alone accounted for the modest difference in image quality, or whether differences were in addition due to changes in atmospheric conditions or aspects of the epipolar resampling of the stereo images.

All images were preprocessed by SI with Modulation Transfer Function Compensation (MTFC) but no Dynamic Range Adjustment (DRA). Although the images were delivered as 11-bit data, the number of grey values having a substantial frequency was much less than 2048. For the left, right and nadir PAN images, grey values with a frequency of more than

0.01% were covering only the ranges of 44-343, 56-423 and 61-589, respectively. The corresponding effective grey value ranges of 299, 367 and 528 (37, 46 and 66 grey values for a linear stretch to 8-bit) are quite similar to the effective intensity range observed with other spaceborne linear array CCD sensors such as SPOT and MOMS. The peak of the histogram is typically towards the darker values (at 62, 73 and 82 for left, right and nadir, respectively) with the right part of the histogram decreasing smoothly and slowly towards the higher grey values. The noise analysis as explained in BALTSAVIAS ET AL. (2001) showed somewhat more noise (2-13 grey values, intensity-dependent) than is suggested by SI investigations (4 grey values, see GERLACH, 2000).

*Geo* images have been found to exhibit quite some artifacts in addition to their noise content, of which a number remain unexplained. Many are visible only in homogeneous areas, especially after contrast enhancement, and some appear in areas of rich texture. Although the artifacts often lead to small grey level variations (e.g. 2-4 DN in 11-bit images), after contrast enhancement, which is often required for visual interpretation and measurement or automated computer processing, they can lead to erroneous high-contrast texture patterns. Details can be found in BALTSAVIAS ET AL. (2001).

These radiometric concerns are not related solely to the sensor imaging parameters but also to the subsequent image processing methods and to image compression. The compression to 2.6 bits leads to some artifacts, which are more visible in homogeneous areas. Some additional problems include shadows and image saturation. The shadow areas in the Melbourne imagery did not have a significant signal variation, and thus in spite of a strong contrast enhancement, feature details in shadow areas were often hardly visible. Saturation occurred routinely, with bright vertical walls, especially those approximately in the middle of the illumination-to-sensor angle. This led again to a loss of detail and poor definition or disappearance of edges when two saturated walls were intersecting. Shortcomings in edge definition, partly inherent in 1m imagery, and problems with variability in image quality, often lead to instances where buildings and trees, for example, of nominally sufficient size are almost impossible to identify.

### 3.2 Image preprocessing

In order to reduce the effects of the above mentioned radiometric problems and optimise the images for subsequent processing, various preprocessing methods were developed, implemented and tested, the full details of which are given in BALTSAVIAS ET AL. (2001). Fig. 2 illustrates the impact of the adopted image processing methods. The first consisted of an anisotropic Gaussian low-pass filtering to reduce noise and stripes in the flight direction, coupled with application of a Wallis filter for contrast enhancement (Fig. 2). In a second preprocessing step, after the low-pass filtering, an unbiased anisotropic diffusion was used to further reduce noise and sharpen edges. Both these approaches were applied to 8-bit data that were generated by a linear compression of the original 11-bit imagery. Later, a third, improved approach applied to the 11-bit data was adopted. First, two adaptive local filters were developed. They reduced noise, while sharpening edges and preserving even fine detail. The effect of the two local filters is generally quite similar, although they use a different number and size of masks, and one employs a fuzzy method. Next, a new version of the Wallis filter, which estimates automatically some of the filter parameters, is applied, and finally a reducti-



on to 8-bit imagery by an iterative histogram equalisation is performed (Fig. 2). Processing in 11-bit led to slightly better 8-bit images than the first two preprocessing methods, even though the 11-bit imagery was effectively only 8 to 9 bits.

Fig. 2: Original image (left), after first preprocessing (middle), and after final preprocessing (right)

## 4 Metric quality

### 4.1 Sensor orientation models

Under ideal conditions of high-quality image mensuration and ground control/checkpoints, coupled with favourable imaging geometry (e.g.  $B/H > 0.8$ ) and provision of sensor calibration data, ground point determination to 0.3 pixel accuracy is possible with medium-resolution stereo satellite imagery. Analogously, under similar operational constraints sub-metre 3D geopositioning accuracy should be obtainable from stereo *Ikonos* images. In order to apply familiar collinearity-based models in this triangulation process, a camera model comprising sensor calibration data must be available. At the present time, however, this option is impossible for end-users of *Ikonos* data, since the necessary sensor model is withheld as proprietary information. Alternative orientation/triangulation models are required, with the Rational Function Model being currently supported (GRODECKI, 2001). The 80 rational polynomial coefficients (RFCs) per image for the object-to-image (latitude, longitude, height to image line, sample coordinates) transformation function can be expected to yield absolute accuracies in subsequent 3D object space positioning which are consistent with the *Ikonos* product specifications. RFCs for the *Geo* product are derived solely from satellite ephemeris and attitude data.

Beyond rational functions, there are further models displaying a favourable level of sensor independence, which can be employed in order to overcome the imposed absolute accuracy limitations of RFCs. Potential approaches which take account to varying degrees of the mixed projective/parallel projection of *Ikonos* include the Direct Linear Transformation (DLT), either in extended form (WANG, 1999) or as piece-wise functions (YANG, 2001), and affine projection (OKAMOTO ET AL., 1999). The former is fundamentally a projective model, whereas the latter is better suited to *Ikonos*' parallel along-track projection. The very small field of view of the sensor of only  $0.93^\circ$  leads to the overall projection approaching skew parallel, especially over smaller sub-scene areas. As it happens, both these models may be thought of as linear rational functions, though in the case of the affine model a perspective-to-affine transformation of the image is first warranted in stereo scenes containing moderate to high relief variation (OKAMOTO ET AL., 1999). The object-to-image transformation functions for the extended DLT and affine models are given, respectively, as:

$$\begin{aligned} x &= (L_1X + L_2Y + L_3Z + L_4) / (L_9X + L_{10}Y + L_{11}Z + 1) + L_{12} x y & (1) \\ y &= (L_5X + L_6Y + L_7Z + L_8) / (L_9X + L_{10}Y + L_{11}Z + 1) \end{aligned}$$

and

$$\begin{aligned} x &= A_1X + A_2Y + A_3Z + A_4 & (2) \\ y &= A_5X + A_6Y + A_7Z + A_8 \end{aligned}$$

where  $x,y$  are image space coordinates in flight and CCD direction respectively and  $X,Y,Z$  are Cartesian object space coordinates. Additional parameters can be appended to these expressions to account for non-linearities. As linear approximations to higher-order rational

functions, the DLT and affine models can be expected to show limitations, especially as the area covered by the *Ikonos* scene becomes large. For both the 2- and 3-image orientation/triangulation with the DLT and affine models, all parameters were determined simultaneously. Further details are provided in FRASER ET AL. (2001).

## 4.2 Planimetric positioning

As a means of both ascertaining the planimetric positioning accuracy of 1m *Ikonos* imagery and of evaluating ‘sensor linearity’, a number of 2D transformations from image to object space were performed. The aim was to examine the accuracy in XY coordinates resulting from mapping the image data to height-corrected ‘planes of control’ using various ground GCP configurations. The results of this 2D accuracy analysis, which are reported in HANLEY & FRASER (2001), were very encouraging. For three configurations of six GCPs and 20-25 independent checkpoints, RMS positioning accuracies of 0.3-0.5m were obtained. When a best-fit mapping was carried out using all 32 GCPs, the XY discrepancies displayed RMS values ranging from 0.27m to 0.38m, i.e. from about 0.3 to 0.4 pixels.

## 4.3 3D positioning of roundabouts

### 4.3.1 Rational functions

As a first step in analysing the triangulation accuracy of *Ikonos* stereo images, 3D coordinates for the GPS-surveyed roundabouts were computed using the supplied RFCs, for the cases of both manually measured image coordinates (via ellipse fitting) and least-squares template matching. The resulting RMS discrepancy in XYZ ground points coordinates was close to 20m in each image of the stereopair, which was consistent with *Geo* specifications. The presence of a positioning bias was clearly apparent, however, and a simple coordinate translation using a few control points reduced the RMS discrepancy at remaining checkpoints to between 1.5 and 2m. Use of six GCPs, coupled with 3D similarity transformation, reduced the RMS checkpoint discrepancies further, to about 0.5m in planimetry and height. Measurements from least-squares matching and ellipse fitting did not lead to significant accuracy differences.

### 4.3.2 DLT and affine models

A series of ‘bundle adjustments’ using all 3 images were computed using both the extended DLT (Eq. 1) and the affine model (Eq. 2) with and without additional parameters (see details in FRASER ET AL. (2001)). The results can, however, be summarised as follows: For control configurations of 4 to 8 GCPs and 20-25 checkpoints, the affine model produced RMS geopositioning accuracies of 0.35-0.5m in XY and 0.5-0.8m in Z, for both stereo and 3-image geometries. For the same GCP sets, the DLT yielded slightly lower triangulation precision, by around 0.1 pixel, and it was found to exhibit stability problems for certain GCP configurations. The fact that first-order models can readily yield 0.5 pixel positioning accuracy is very encouraging for both metre-level city modelling applications and for GIS mapping for local government planning and management, which requires nominal 1-sigma precision of 1.5-2m.

## 4.4 Accuracy of building extraction

Whereas the foregoing 3D ground point determination was centred upon ‘high-quality’ targets, accurate positioning of building features, generally corners and edges, involves not only metric factors but issues of image resolution and feature identification. Thus, 19 photogrammetrically triangulated image-identifiable roof corners were compared against their GPS-surveyed positions. Within the stereo triangulation, the RFCs produced RMS accuracies of

0.7m in planimetry and 0.9m in height after removal of the bias in object space using the known GCP coordinates. Corresponding accuracy estimates resulting from the 19 checkpoints for the affine and DLT models with 6 GCPs were 0.7m and 0.6m, and 1.0m and 0.8m, respectively, for planimetry and height. Triangulation of the 3-fold image coverage produced results which were not significantly different than those for the stereo restitution.

## **5 Evaluation of building extraction from *Ikonos***

In order to provide a qualitative and quantitative assessment of the potential of stereo *Ikonos* imagery for the generation of building models, the University of Melbourne campus was measured manually in stereo with both an in-house developed software tool for the *Ikonos* stereo images, and using an analytical plotter for the 1:15,000 colour aerial imagery. The resulting plots of extracted building features are shown in Fig. 3. The manual measurements of roof corners and points of detail were topologically structured automatically using the software package CC-Modeler and also visualised (Fig. 4). A comparison of the two models in Fig. 3 revealed the following regarding the *Ikonos* stereo feature extraction: about 15% of the building area as measured in aerial images could not be modelled; a number of both small and large buildings could not be identified and measured; some new buildings could however be reconstructed, even if small; and buildings could often be only generalised (Fig. 5) with a simplified roof structure and variations to their form and size. Measurement and interpretation in stereo is a considerable advantage, as is the use of colour which was unfortunately not available in the *Ikonos* stereopair. Other influential factors (except the inherent restrictions for small buildings due to the 1m resolution) are shadows, occlusions, edge definition (related also to noise and artifacts), saturation of bright surfaces, sun and sensor elevation and azimuth, and atmospheric conditions.



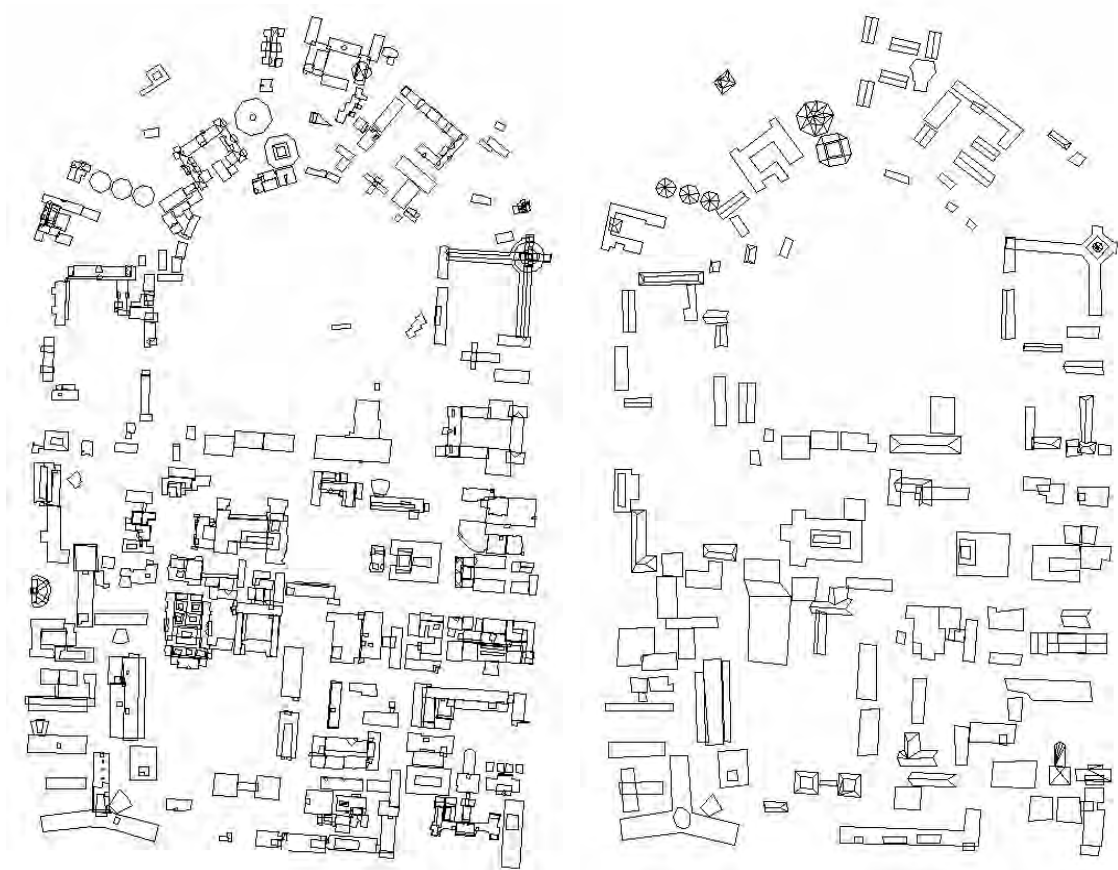


Fig. 3: Buildings of University of Melbourne campus reconstructed from 1:15,000 aerial images (left) and from stereo *Ikonos* imagery (right). To simplify visualisation, first points and first lines have been omitted in the left figure.

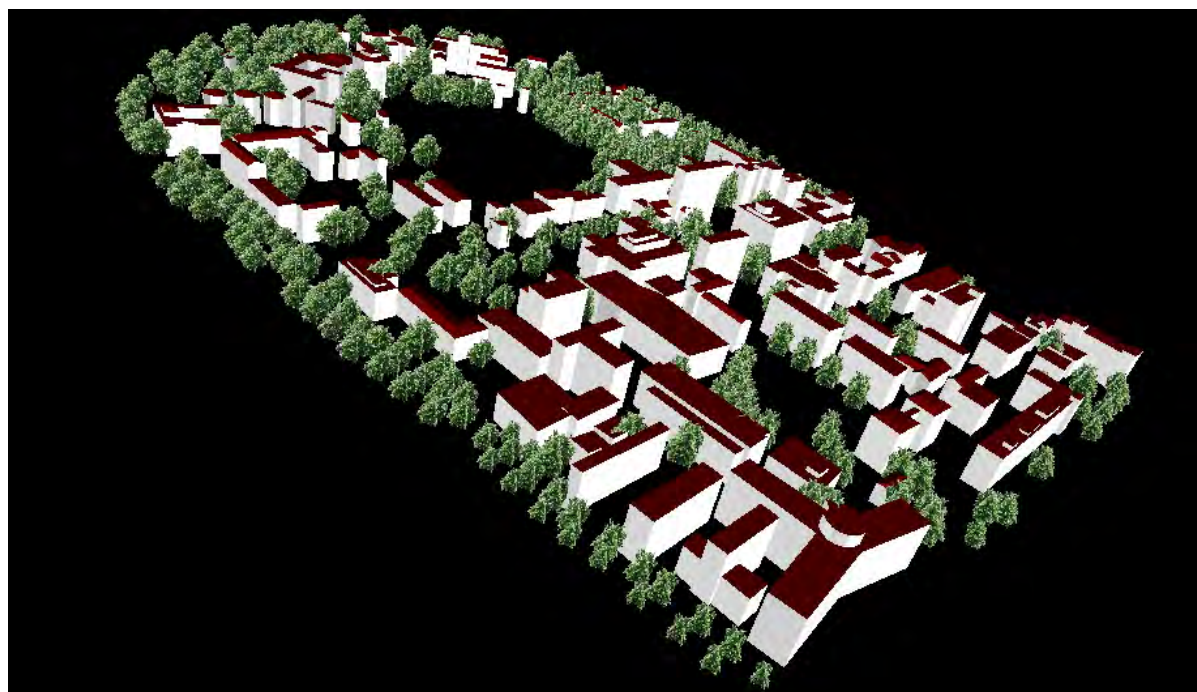


Fig. 4: Visualisation of University of Melbourne campus with buildings and trees extracted from stereo *Ikonos* images

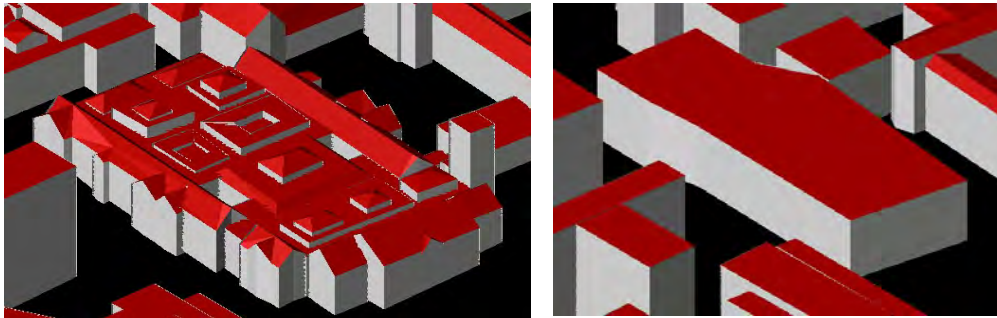


Fig. 5: Building with complicated roof structure as measured from aerial images (left) and Ikonos images (right)

## 6 Conclusions

This investigation has shown that Ikonos Geo stereo imagery has the potential to yield 1m georeferencing accuracies and better. These results are impressive in the context of building reconstruction, but they must be weighed against some notable shortcomings of 1m satellite imagery for building feature detection and identification. While the limitations of an image resolution of 1m are well understood, it is more the variability of image quality from scene to scene due to factors which are largely beyond the current control of the image user that will limit application to building reconstruction and city modelling. Moreover, problems have been encountered not only in identifying all buildings of a certain size, but also in accurately reconstructing their form without excessive generalisation.

## 7 Acknowledgements

The support of Maria Pateraki and Li Zhang at ETH Zurich and Harry Hanley and Takeshi Yamakawa at the University of Melbourne is gratefully acknowledged.

## 8 References

- BALTSAVIAS, E., PATERAKI, M. & ZHANG, L. (2001): Radiometric and geometric evaluation of Ikonos GEO images and their use for 3D building modelling. - Proc. Joint ISPRS Workshop High Resolution Mapping from Space 2001, Hannover, 19-21 September (accepted for publication) (on CD ROM).
- DIAL, G. (2000): Ikonos satellite mapping accuracy. - Proc. ASPRS Annual Conference, Washington D.C., 22-26 May (on CD ROM).
- FRASER, C.S., HANLEY, H.B. & YAMAKAWA, T. (2001): Sub-metre georeferencing with Ikonos GEO imagery. - Proc. Joint ISPRS Workshop High Resolution Mapping from Space 2001, Hannover, 19-21 September (accepted for publication) (on CD ROM).
- GERLACH, F. (2000): Characteristics of Space Imaging's One-Meter Resolution Satellite Imagery Products. - International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 33, part B1, p. 128-135.
- GRODECKI, J. (2001): Ikonos stereo feature extraction - RPC approach. - Proc. ASPRS Annual Conference, St. Louis, 23-27 April (on CD ROM).
- HANLEY, H.B. & FRASER, C.S. (2001): Georeferencing accuracy of Ikonos imagery: indications from 2D transformations. - Photogrammetric Record, **17**, 98, 12 p. (in press).
- OKAMOTO, A., ONO, T., AKAMATSU, S., FRASER, C.S., HATTORI, S. & HASEGAWA, H. (1999): Geometric characteristics of alternative triangulation models for satellite imagery. - Proc. ASPRS Annual Conference, Portland, 17-21 May (on CD ROM).

- WANG, Y. (1999): Automated triangulation of linear scanner imagery. - Proc. Joint ISPRS Workshop on Sensors and Mapping from Space, Hannover, 27-30 September (on CD ROM).
- YANG, Y. (2001): Piece-wise linear rational function approximation in digital photogrammetry. - Proc. ASPRS Annual Conference, St Louis, 23-27 April (on CD ROM).

# **Panchromatische und multispektrale Resultate aus Testflügen mit dem Luftbildsensor ADS40 von LH Systems**

**PETER FRICKER,  
LH Systems GmbH  
CH-9435 Heerbrugg, Schweiz  
e-mail: fricker@lh-systems.com**  
und  
**RAINER SANDAU,  
DLR – WS  
D-12849 Berlin, Deutschland  
e-mail: rainer.sandau@dlr.de**

## **ABSTRACT**

Nach der Einführung des Luftbildsensors ADS40 von LH Systems, anlässlich des ISPRS Kongresses in Amsterdam im Jahre 2000, sind mit dem Instrument eingehende Tests, Kalibrierungen und Verbesserungen vorgenommen worden, welche die Auslieferung der ersten Einheiten an Kunden im Sommer 2001 ermöglichen. Diese Tests beinhalten Untersuchungen der geometrischen und radiometrischen Leistungsfähigkeit aller sieben Kanäle – drei panchromatische und vier multispektrale - aus Bildern, welche auf verschiedenen Flughöhen und über verschiedenartigem Gelände vorgenommen wurden. Die Tests untersuchten auch die Wirkung der neuen telezentrischen Optik, des dichroitischen Strahlteilers, der schmalen Spektralbänder und der Interferenzfilter auf die Qualität der multispektralen Bilder. Ausserdem wird auf die Technik der versetzten panchromatischen Doppelzeilen, des Massenspeicher Systems und des Datentransfers eingegangen. Auf der Auswerteseite wird über das publizierte Sensor Model, die Entzerrung von Bildern mittels GPS und Inertialsystemen sowie die Aerotriangulation mit Bildern aus Dreizeilen-Sensoren berichtet. Nicht zuletzt wird auch das Thema der Wiederherstellung von Echtfarben-Aufnahmen aus schmalbandigen Spektralbildern angesprochen. Die kombinierten Testresultate werden erste Aufschlüsse geben darüber, ob LH Systems das Ziel erreicht hat, die Bedürfnisse der Photogrammeter nach höchster Genauigkeit mit den Anforderungen der Anwender der Fernerkundung, in einem Sensor zu vereinen.

## **1. INTRODUCTION**



Figure 1: ADS40 Airborne Digital Sensor

Launched at the XIX<sup>th</sup> ISPRS Congress in Amsterdam in July 2000, the LH Systems ADS40 Airborne Digital Sensor (fig. 1) ushered in a new era of digital photogrammetry, appropriately timed at the outset of a new millennium. Developed jointly with Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (German Aerospace Centre – DLR), the ADS40 was the first airborne digital imaging device capable of performance, in terms of resolution and coverage, in a similar range to the

established aerial film cameras, with their 23 x 23 cm format and resolutions in excess of 100 lp/mm.

A major advance of the sensor is that the ADS40 provides seamless strip imagery as long as the flown flight lines. This was a major innovation: extensive airborne use had been made of digital frame cameras, but these devices' 4K x 4K (or smaller) formats seriously limited coverage, a shortfall that could only be made up through closely spaced flight lines and enormous numbers of images - a formula with little appeal to the traditional photogrammetric organization. Hence, to combine photogrammetric performance with the significant advantages of digital imagery as obtained with the ADS40, in terms of radiometric performance and end-to-end digital workflows, represented significant progress.

The ADS40 represented a second major advance. It was designed not only to meet photogrammetric requirements in terms of coverage, resolution and accuracy, but also to acquire multispectral imagery and thus to appeal to sectors of the remote sensing market. This coalescence of photogrammetric precision, designed for positional accuracy of processed data, with capabilities for image analysis and interpretation, for example segmentation or classification, was novel and groundbreaking.

## 2. TEST FLIGHTS

The tests covered the assessment of the performance characteristics of:

- the telecentric lens
- the beam splitter "trichroid"
- the narrow band interference filters that influence the multispectral image quality
- the staggered pairs of CCD lines used for the panchromatic bands
- the airborne GPS
- the inertial measurement unit (IMU) systems to determine position and orientation
- data transfer and storage techniques for the on-board mass memory (ruggedized hard disk array).

Investigations of the post-processing software included:

- downloading from the mass memory
- the specially developed sensor model
- aerial triangulation using the three panchromatic bands together with GPS and IMU data gathered during flight
- rectification
- digital terrain models
- orthophotos
- mosaics
- feature extraction

An important aspect will be the assessment of algorithms to generate true color imagery from the spectrally non-overlapping RGB bands. The combined results of the various tests provide initial indications not only of the compliance of the ADS40 with specifications published by LH Systems prior to full production, but also of its success in reaching its goal of achieving photogrammetric accuracy and coverage whilst offering the advantages of remote sensing in terms of the processing of multispectral digital imagery for end user applications.

The first series of test flights, conducted in Switzerland, consisted of imagery of two areas. In each case, a small block was flown several times, consisting of four parallel strips with two strips at right

angles, at a flying height approximately 2000 m above ground (for example, fig. 10). At 2000 m, with a principal distance of 62.8 mm and a pixel size of 6.5  $\mu\text{m}$ , the ground sample distance was 20 cm, or 10 cm allowing for the staggered arrays in the panchromatic. The blocks were triangulated, as outlined above, using a new variant of LH Systems' bundle adjustment software ORIMA. The results from one of the experiments are summarized in table 2. The standard error of unit weight was less than a pixel and in accordance with normal expectations, based on aerial triangulation theory and error propagation, from precise measurements and modern point matching on high-quality digital imagery. Subsequent test flights in Japan included different types of blocks. A small block for test purposes was flown over the customer's airfield at Chofu, then a large block over Tsukuba consisted of four lines, each more than 20 km long, and two cross strips, for a total flying time of over two hours, resulting in over 200 GB of data, again with a ground sample distance of 20 cm.

Further the ADS40 system was accepted by the civil aviation authorities of Japan as being airworthy and fulfilling the required safety standards. Finally a series of test flights in Northern Italy delivered proof of the capability to produce quality RGB and False Color images over urban, rural and coastal areas.

Location	Waldkirch	Sion	Chofu	Tokyo	Tsukuba	Parma	Pavia	Adria	Verona
strips flown	8	8	4	2	4	8	3	3	3
shape	block	block	block	single line	block	single lines	block	block	block
cross-strips	yes (3)	yes (3)	yes (2)	-	yes (2)			no	no
flying height (above ground)	2000 m	1750 m	1950 m	1950 / 2750 m	2000 m	1500 / 1800 / 2000 / 3000 m	1600 / 2300 / 5750 m	1550 m	1500m
general direction	E-W	120°	E-W	E-W	N-S	120°	E-W	160°	120°
GSD [cm]	20 cm	17 cm	20 cm	20 & 15/30 cm	20 cm	15 & 20cm	15/30/50cm	15cm	15cm
Number of CCD's	7	3	7	10	7	7	7	7	7
Total project size	10.1 GB	5.96 GB	73.6 GB		126 GB	85.2 GB	64.5 GB	111 GB	

Table 1: Summary of ADS40 test flights between April and June 2001

### 3. COLOR AND FALSECOLOR COMPOSITES FROM ADS40 IMAGERY

The following two color composites were made by selecting a coastal region from the ADRIA image strip and processing them in SOCET SET. The JPEG files were transferred to Photoshop where the final area selection was made.



Figure 1: Color Composite of the three ADS40 R/G/B color bands (ADRIA region)

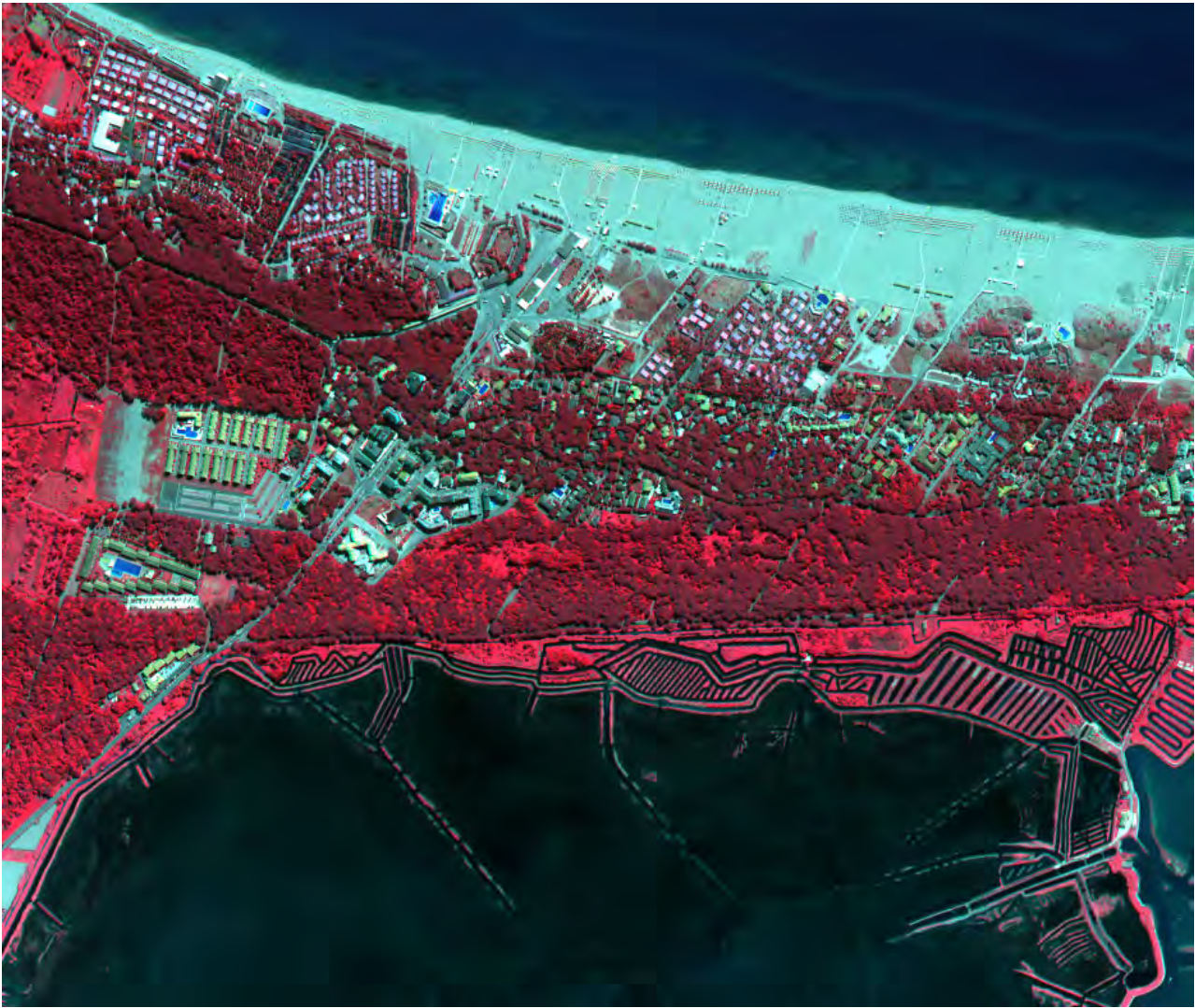


Figure 2: False color Composite of the three ADS40 G/R/IR color bands (ADRIA region)

#### 4. SEAMLESS STRIP IMAGERY

One of the major advantages of three line airborne digital sensor imagery over surface array sensors is that right from the start all processes are based on strip imagery (Fig.3). The continuous stereo model, which is as long as the flown strip, is a seamless scene in all stages of photogrammetric processes such as rectification, minification, automatic point matching, block adjustment, DEM generation and orthophoto generation. Handling imagery strip wise in large blocks reduces administrative overhead in the software significantly, eliminates tedious mosaicing of numerous individual images and makes mosaicing of large blocks easier, safer, less time consuming.



Figure 3: seamless Nadir B&W strip image of Sion (length 14 km in this example)



## 5. DESIGN PRINCIPLES

The ADS40 has been well-documented elsewhere, for example by Sandau et al. (2000), [6] and the briefest summary suffices here. The basis of the design is the three-line-scanner principle, attributed – at least in its digital manifestation – to the German O. Hoffman in the 1970s, whereby linear arrays on the focal plane capture imagery looking forwards, downwards and backwards from the aircraft (fig.4). These arrays are panchromatic and in the ADS40 consist of pairs of 12,000-pixel arrays, one member of the pair staggered laterally from the other by half a pixel (3.25  $\mu\text{m}$ ). The result is that every portion of the ground surface is imaged thrice, far superior to the 60% triple coverage in typical film aerial photography. Also on the focal plane are four further 12,000-pixel arrays, acquiring imagery, through interference filters, in the red, green, blue and near infrared bands (fig. 5). A device called a trichroid, which is a beam splitter designed for minimum loss of energy, ensures that the incoming RGB light from the same strip of terrain is detected by the three RGB-sensitive linear arrays, even though these are physically separate on the focal plane. The performance of the CCD arrays and the filters is maximized through the use of a complex, innovative telecentric lens, whereby light rays impinge upon the focal place at right angles regardless of their angle of incidence at the front nodal point. The ADS40 is accommodated in the same PAV30 gyro-stabilized mount used for film cameras (fig. 6,7 & 8). An onboard control computer with a mass memory, consisting of a high-capacity ruggedized disk array, records the data, recorded at a rate of approximately 100 GB per hour of flight.

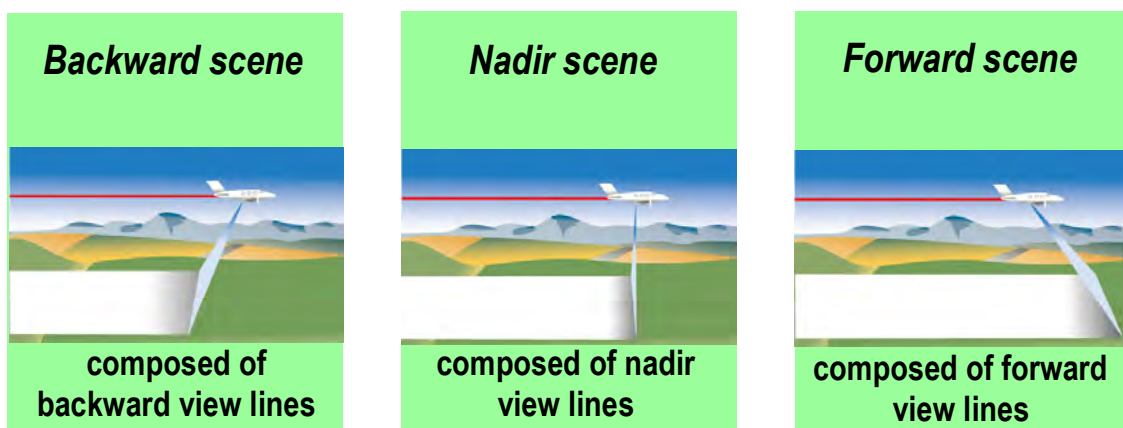


Figure 4. Three-line scanner principle

The post-processing of the imagery as described in Tempelmann, et al. (2000),[8] is rather different from the approach used for decades with frame imagery. In the first place, the raw imagery, after correction for hardware-based radiometric factors, lens distortions, etc. can be dramatically different from a frame image owing to the movement of the aircraft, radically altering the parallelism of the scan-lines on the ground. In the case of the ADS40 though, use has been made of the IMU integrated in the Sensor Head SH40. The IMU from the Applanix POS system provides a very accurate vertical reference and drift correction to the gyro-stabilized mount PAV30, thus following the principles described in Collinson, et al. (1996),[9] and Hoffmann, et al. (1993), [11]. The edges of the “raw” strips are therefore already quite straight and will not receive any large lateral correction.

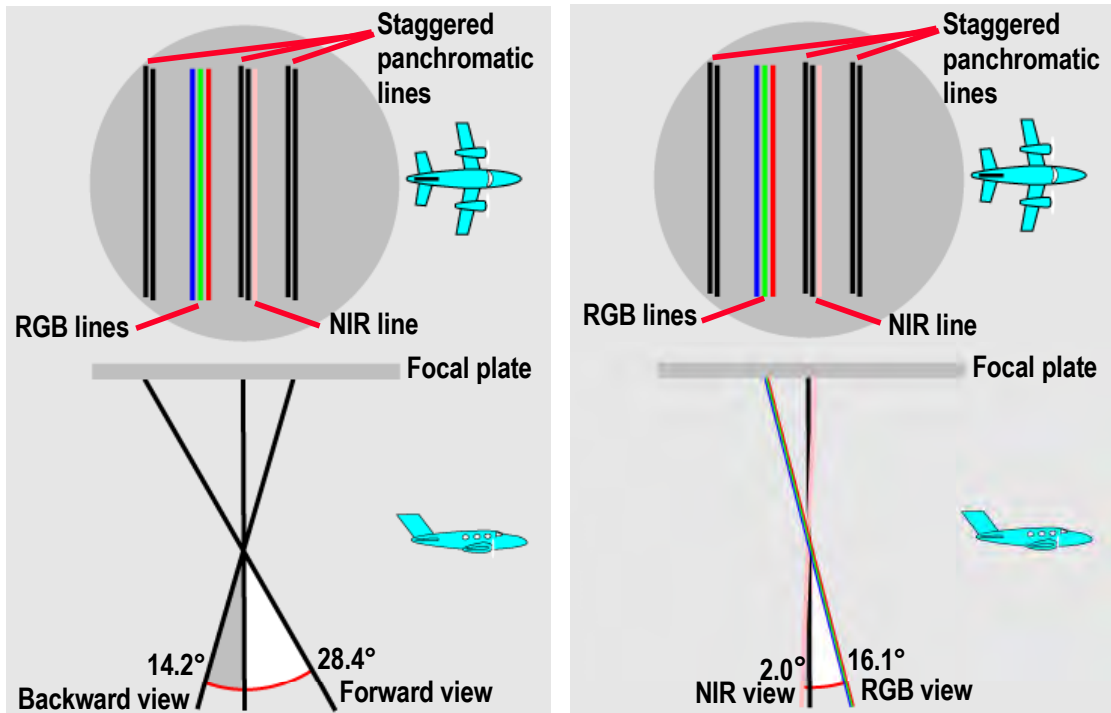
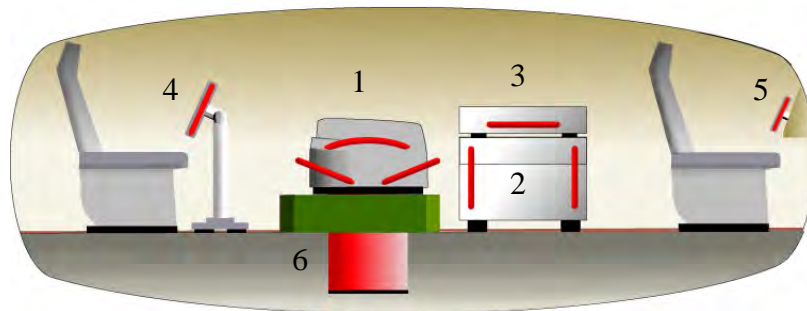


Fig. 5. Layout of the focal plane



- |   |                                      |
|---|--------------------------------------|
| 1 | Sensor Head SH40 with:               |
|   | - Digital Optics DO64                |
|   | - IMU                                |
| 2 | Control unit CU40 with:              |
|   | - position and attitude computer POS |
| 3 | Mass Memory MM40                     |
| 4 | Operator Interface OI40              |
| 5 | Pilot Guidance Indicator GI40        |
| 6 | Mount PAV30                          |

Figure 6. Components of the ADS40

## 6. INSTALLING ADS40 SYSTEMS

### 6.1. Installation in a Cessna 208B Caravan in Japan

The installation realized in April 2001 was straightforward due to the fact that the aircraft is also used for aerial survey with an LH Systems RC30 and thus the same gyro stabilized mount PAV30 can be used. 2½ hours after the installation crew and the ADS40 appeared at the airport, the aircraft took off for the first flight. A very rewarding side effect was that the Japanese Aircraft Association approved the installation for airworthiness without any objections.



Figure 7: Installation in a Cessna 208B Caravan in Japan

### 6.2. Installation in a CASA 212 in Italy

This installation was realized in June 2001 and only took 1½ hour, the major obstacle being the adaptation of the power plugs. This spacious and slow flying aircraft (120 –150 knots) of course was ideal for installation and flight-testing. On some of the test flights the ADS40 was flown together with the Daedalus MIVIS scanner and it will be interesting to see the comparison of the two sets of digital images. Again the fact that an LH Systems RC30 and PAV30 gyro mount are in use in this aircraft contributed to the effortless installation.



Figure 8: Installation in a CASA 212 in Italy

## 7. GROUND PROCESSING

The principles and early stages of ground processing have already been indicated. The mass memory MM40 is removed from the aircraft and connected to a docking station on the ground, typically a high-end PC with a SCSI interface. The images and metadata are downloaded, which can take several hours since the capacity of the mass memory is around 0.5 TB. After data download, rectification based on position and attitude data from the integrated GPS/IMU unit provides stereo viewable images and both manual measurement of ground control points and automatic measurement of tie points can proceed in the normal way. Block adjustment eliminates remaining parallax in the rectified images.

The resulting images are precise and parallax-free and can be viewed stereoscopically, and used for example for collecting and editing map features. Similarly, further photogrammetric production processes, such as DTM generation, orthomosaics or visualization can proceed on the basis of these images.

<p><b>Level 0 - Raw data</b> consisting of : Geometric raw images (TIFF and other formats) and processed orientation data</p>	<p><b>Level 1- Rectified data</b> consisting of : Fully corrected stereo- viewable panchromatic images and fully corrected multispectral images</p>	<p><b>Level 2 - Geo-coded data</b> consisting of: Panchromatic and multispectral orthophotos</p>
<p>LH Systems' ADS level 0 generator  and  Applanix POSProc</p>	<p>ADS level 1 generator</p>	<p>LH Systems' SOCET SET® DPW  ORIMA  or 3rd party photogrammetric workstations with ADS sensor model</p>

Figure 9: Levels of Ground Processing of ADS40 data

Ground processing of test data in the period described in this paper was limited to Level 0 and Level 1 processing. Duration of Ground Processing varied strongly depending on the following:

At Level 0:

- Available computer processing power
- Amount of data recorded
- compression level,
- quality of recorded GPS data (amount of visible satellites)
- Rectification strategy

At Level 1

- automatic point matching strategy

Ground Processing can require from several hours to entire days. Two thirds of processing time is batch oriented so it is mainly a question of importance given to timely completeness and consequently how much computer power is allocated to master these tasks. Automatic point matching can take several hours per hour of recorded data. On the other hand bundle adjustment with ORIMA only lasts a few minutes for each hour of recorded image data.

## 8. AERIAL TRIANGULATION

Level 1 rectified images based on GPS/IMU data produce good stereo viewable images, which are more than good enough for many applications. However, the use of these rectified images for feature extraction in a stereo photogrammetric workstation at large viewing scales is another thing. As thoroughly described in a recent publication [1] aerial triangulation is not obsolete. In that publication, the use of IMU in combination with GPS is still considered to be in its infancy. Our experience is that after rectification stereo images still have small amounts parallax, which can disturb and tire the stereo operator. Although we support all efforts, which aim at reducing or even eliminating ground control, we still maintain that for parallax-free imagery point matching and bundle adjustment is required, not to mention the peace of mind achieved by being able to crosscheck that geo-coding has been performed correctly.

### 8.1. Aerial triangulation based on GPS/IMU rectified imagery

The ADS40 is the first commercial airborne digital sensor offering such highly integrated GPS and IMU sensors. GPS offers the dual benefit of providing straight and predetermined flight lines as well as supporting the IMU with accurate positions. The IMU provides attitude data in-flight to keep the gyro mount perfectly vertical and aligned. The use of GPS and IMU require that certain measures to be taken before and after the flight. GPS on-the-fly techniques are already well known. The use of an IMU requires two actions:

- in-flight alignment, which consists of a 3' straight flight followed by two 360° turns before and after image data is recorded for each survey area.
- occasional correction or check of the IMU misalignment by flying one and the same flight line in both directions.

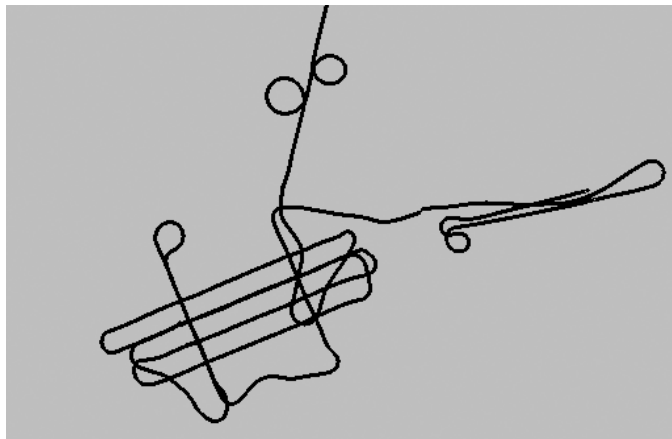


Figure 10: Sion block flight path, in-flight IMU alignment loops and double line flown in opposed directions to correct for IMU misalignment.

The results of such a flight are perfectly parallel flight lines, as seen in Figure 11.

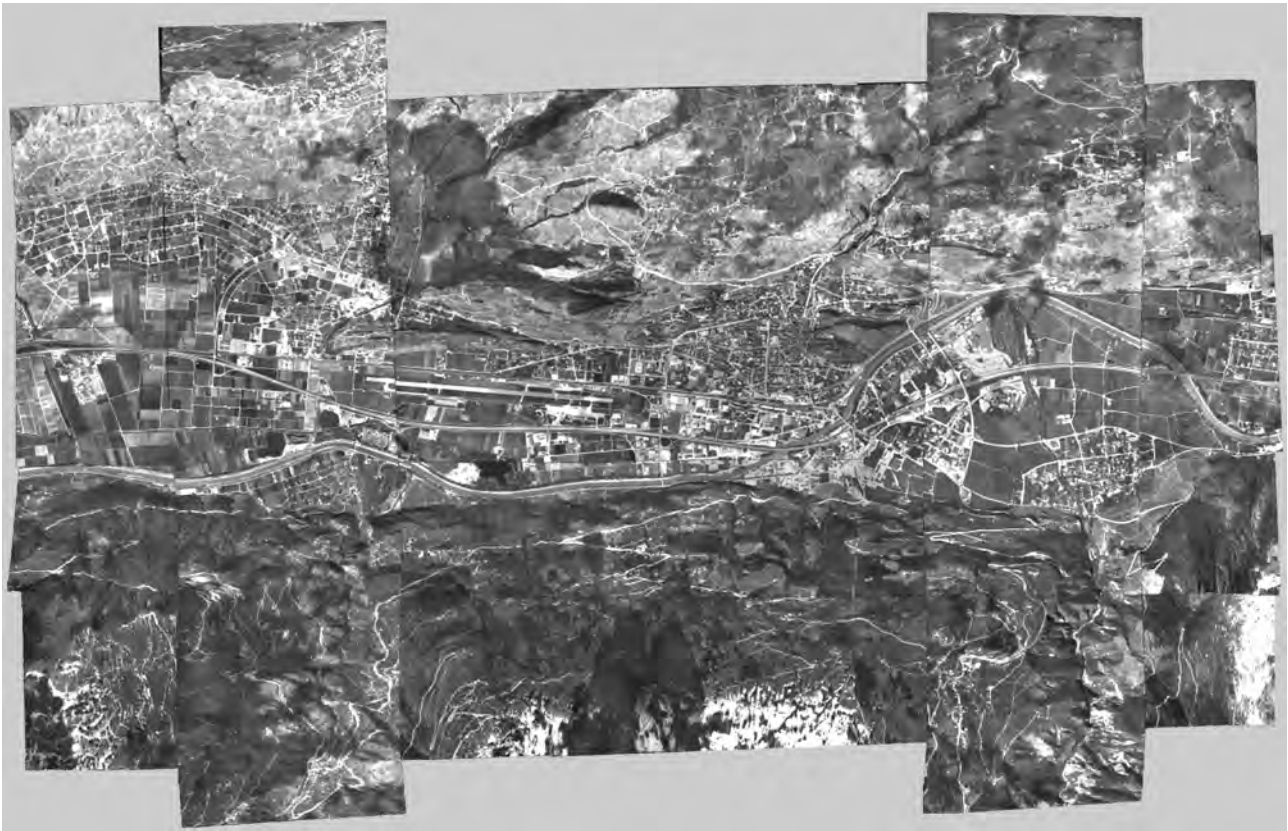


Figure 11: Superimposed rectified strip imagery of the Sion block

## 8.2. Ground control for the Sion aerial triangulation block

One of the first aerial triangulation tests was conducted over the area of Sion in the southwest of Switzerland. No preparations were made to signalize points or determine ground control points in advance. On the day of the flight the GPS ground reference station was ordered to be switched on. GPS measurements of the ground reference station and of the ground control were emailed to us by the local surveyor the day after the flight.

## 8.3. Results of the Sion aerial triangulation block

Table 2. Summary of the ORIMA results for Sion block

Strips	4
Cross strips	2
Control points	18
Orientation fixes	216
Tie points	5420
Bundle adjustment options	Self-calibration; automatic blunder elimination
$\sigma_0$ (standard error of unit weight)	5.3 $\mu\text{m}$ (0.8 pixel)
RMS for ground control points	<5 cm

## 9. CONCLUSIONS

This recent progress is a sound reflection of the ADS40 development. The ADS40 was designed as a high performance tool for both photogrammetry and remote sensing, built around cutting-edge and innovative technologies. However, the success of the device in terms of results transmitted to the end user of the imagery is contingent on a robust workflow consisting of software components sourced from several places, both in-house and third parties, which have to be linked together to achieve effective, smooth processing of the massive data volumes that the ADS40 will routinely generate. An essential component is that a reliable, long-term archiving system is necessary to handle storage and dissemination of the data, as provided by LH Systems with their new GDM100 GeoVault Data Manager. There is no longer a film “in the can” as a back-up of last resort.

Despite the above positive report, it must be understood that extensive work is continuing to optimize the performance of the multispectral bands and establish the most useful workflows on the remote sensing side. This process is not yet completed, but encouraging progress has been made so far and this will be reported in due course.

At the time of writing (June 2001), the ADS40 has completed an extensive program of test flights, firstly under factory control in Germany and Switzerland, and secondly jointly with customers in Japan and Italy. The latter series of tests involved successful compliance with Japanese Aviation Authority standards for air safety. Final system tuning is now taking place and at the same time ADS40 production models are progressing along the assembly line. Product acceptance is guaranteed and current indications are that a steady flow of orders will continue as the product diffuses from the early adopters – typically larger aerial survey service companies that operate several film cameras and a fleet of aircraft – to a broader sample of aerial survey and photogrammetric firms, together with other prospects not in the traditional photogrammetric world.

## 10. REFERENCES

- [1] Greening, W.J.T. *et al.* (2001) – The proper use of directly observed orientation data: aerial triangulation is not obsolete, ASPRS, St. Louis, USA, 2001
- [2] Börner, A. *et al.* (2000) - Test results obtained with the LH Systems ADS40 Airborne Digital Sensor. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 33, Part B4, Amsterdam, Netherlands, pp. 871-878.
- [3] Eckardt, A., Braunecker, B., Sandau, R. (2000) - Performance of the imaging system in the LH Systems ADS40 Airborne Digital Sensor. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 33, Part B1, Amsterdam, Netherlands, pp. 104-109.
- [4] Jahn, H., Reulke, R. (2000) - Staggered line arrays in pushbroom cameras: Theory and Application. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 33, Part B1, Amsterdam, Netherlands, pp. 164-172.
- [5] Reulke, R. *et al.* (2000) - Target related multispectral and true colour optimization of the colour channels of the LH Systems ADS40 Airborne Digital Sensor, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 33, Part B1, Amsterdam, Netherlands, pp. 244-250.

- [6] Sandau, R. *et al.*, (2000) - Design principles of the LH Systems ADS40 Airborne Digital Sensor. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 33, Part B1, Amsterdam, Netherlands, pp. 258-265.
- [7] Schuster, R., Braunecker, B. (2000) - Calibration of the LH Systems ADS40 Airborne Digital Sensor. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 33, Part B1, Amsterdam, Netherlands, pp. 288-294.
- [8] Tempelmann, U. *et al.* (2000) - Photogrammetric software for the LH Systems ADS40 Airborne Digital Sensor. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 33, Part B2, Amsterdam, Netherlands, pp. 552-559.
- [9] Collinson, R.P.G. (1996) – Introduction to Avionics. Chapman & Hall, London, UK. Chapter 5 & 6, pp 177-302
- [10] Sandau, R., Eckardt, A. (1996) - The stereo camera family WAOSS/WAAC for spaceborne/airborne applications. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 31, Part B1, Vienna, Austria, pp. 170-175.
- [11] Hoffmann, O., Kaltencker, A., Müller, F. (1993) – Das flugzeuggestützte, digitale Dreizeilenaufnahme- und Auswertesystem DPA – erste Erprobungsergebnisse. Photogrammetric Week '93, Stuttgart Germany, pp. 97-107.



# Automatic Detection of Buildings and Trees from Aerial Imagery Using Different Levels of Abstraction

MARKUS GERKE, BERND-MICHAEL STRAUB & ANDREAS KOCH<sup>1</sup>

*Zusammenfassung:* In diesem Beitrag wird die Extraktion von Bäumen und Gebäuden aus hochauflösenden Luftbildern und Höhendaten im städtischen Bereich beschrieben. Der vorgestellte Ansatz nutzt zur Steuerung der Szeneninterpretation verschiedene Abstraktionsebenen, ähnlich der in GIS Objektmodellen verwendeten hierarchischen Strukturierung von topographischen Objekten.

*Abstract:* In this paper we describe our work on the automatic extraction of buildings and trees from aerial images and height data in urban environments. The control strategy of the presented approach is based on different abstraction levels. The abstraction levels are similar to the hierarchical structure of topographic objects in GIS object models.

## 1 Introduction

In this paper we describe our current work on automatic detection and extraction of trees and buildings from aerial CIR orthoimages and normalized digital surface models. The main focus of our work is on the extraction of buildings and trees in an urban environment. For our work the application consists in building a simulation system for training emergency force officers to better respond to crisis situations, refer (CROSSES, 2001). One aim of our work is the automatic production of a highly detailed city model, which can be used in a wide variety of applications like games, tourist applications, and simulation computations. These kind of applications demand inexpensive data, and it is often possible to decrease the data quality requirements. These aspects argue for the application of automatic procedures for the object extraction. The paper is structured as follows: After a short literature review, we present the employed strategy of our approach. Afterwards we describe how this strategy is applied to the extraction of trees and building ground plans in an urban environment including examples of the obtained results. The paper concludes with an outlook onto future developments.

## 2 Related work

In this paragraph a brief literature overview concerning building reconstruction from image data is given. Currently we focus on reconstructing building shapes in the 2D plane. Therefore the term building shape is used in this paper in order to distinguish it from 3D building reconstruction. In consequence of using aerial data the building shape is approximated by the roof shape. WEIDNER (1997) introduces two approaches for building shape reconstruction. A segmented region is either adapted to a set of given prismatic building hypotheses (which are represented by polygons in 2D) using the principle of the minimum description length (mdl, cf. BRUNN ET AL., 1995) or described by a parametric building model which is a rectangle in the 2D-plane. The advantage of fitting a polygon to the region is that it is the more comprehensive approach but on the other side the quality of the result depends on a sensitive tuning of control parameters. MAAS (1999) applied the analysis of invariant geometric moments in order to achieve simple parametric building models, which is similar to the approach presented by WEIDNER (1997). One advantage of using moments is that they lead to the five parameters (width, length, orientation and position) fixing the rectangle. The extraction of individual trees is also addressed by a number of authors. BRUNN & WEIDNER (1997) pro-

---

<sup>1</sup> Institut für Photogrammetrie und GeoInformation, Universität Hannover, Nienburger Straße 1, 30167 Hannover, e-mail: {gerke,straub,koch}@ipi.uni-hannover.de

posed to use the variance of surface normals to detect vegetation regions in height data. Laser scanner data and a color infrared image are used in combination by BRENNER & HAALA (1999) for the detection of vegetation areas in an urban environment by means of an unsupervised classification algorithm. POLLOCK (1994) proposed a generic model for a tree divided into a geometric part, a function for the leaf density distribution, and an illumination model. BRANDTBERG & WALTER (1998) have developed an approach for the extraction of trees from aerial images based on the curvature of edges in multiple scales. Similar to BRENNER & HAALA (1999) we combine CIR and height data. For the delineation of individual trees we apply a morphological approach, which makes use of the circular shape of a tree crown. In the case of building shape reconstruction we decided to extend the approach presented in (MAAS, 1999), whereas we make use of its property to directly achieve the parameters of a rectangle. The restriction regarding the complexity of the building shape is not critical as our approach is applied to a suburban environment, where mainly simple shaped buildings can be found.

### 3 Hierarchical Image Analysis

The existing methods of image analysis can be mapped into a two dimensional solution space, following a proposition made by SUETENS ET AL. (1992). One axis describes the suitability for complex models and the other axis the suitability for complex image data. Methods for processing either simple models or simple images are available. However, complex models in conjunction with complex image data cannot be handled appropriately with existing methods (HEIPKE ET AL., 2000). Thus, a reduction in complexity is necessary. Since the model complexity is usually dictated by the application, only the image complexity can be manipulated. It can be reduced by means of a scale-space transformation (LINDBERG, 1994) and by a reduction of the processing domain. We use a hierarchical model, which is structured by abstraction levels of the objects, as a kind of control strategy for our approach. An example for an object hierarchy is given in figure 1. The highest level of abstraction is given by the landscape, level 2 contains the super classes, different areas are placed in level 3, the next level consists of the objects and the lowest level of abstraction is given by the level of object components.

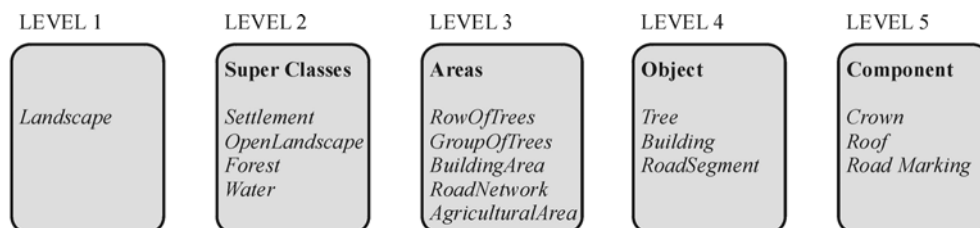


Figure 1: Different abstraction levels in the hierarchical structure of the landscape

In order to solve a problem with complex models and complex images, it can be argued that the following hierarchical strategy is feasible. At some level  $L$  of the hierarchy the image complexity is reduced using a scale-space transformation. The related object classes of level  $L+1$  are searched for only in the parts of the scene, in which the context –given by the instances of the level  $L$  objects - is known. This procedure is repeated until the last level is reached, leading to a stepwise reduction of the complexity of the images. Therefore, simple object models can be applied in the actual level to be processed. The context always defines the domain of the scene relevant for the actual level and is also used to set initial parameters for the object extraction. The term *scene* is used for the domain of the real world which is mapped in the images, the *scene description* consists of the instances of objects visible in the scene.

## 4 Tree and Building Extraction

The strategy is applied as described in this sequence. The context from level 2 –settlement- is known by means of the application, in general this context can be automatically extracted from coarse scale imagery (STRAUB ET AL., 2000). In the given settlement domain of the scene, areas –level 3- are extracted (see section 3.1), and inside the areas we focus on trees or buildings depending on the semantic of the given area. An overview of all processing steps is given in Figure 2, in this sequence diagram the different objects are ordered by means of their life cycle - from left to the right - and by the abstraction level from top to bottom. The "Material and Geometry" layer is used for class properties, which are independent of the abstraction levels. The "Image" layer contains the low-level features, which are extracted from the image data.

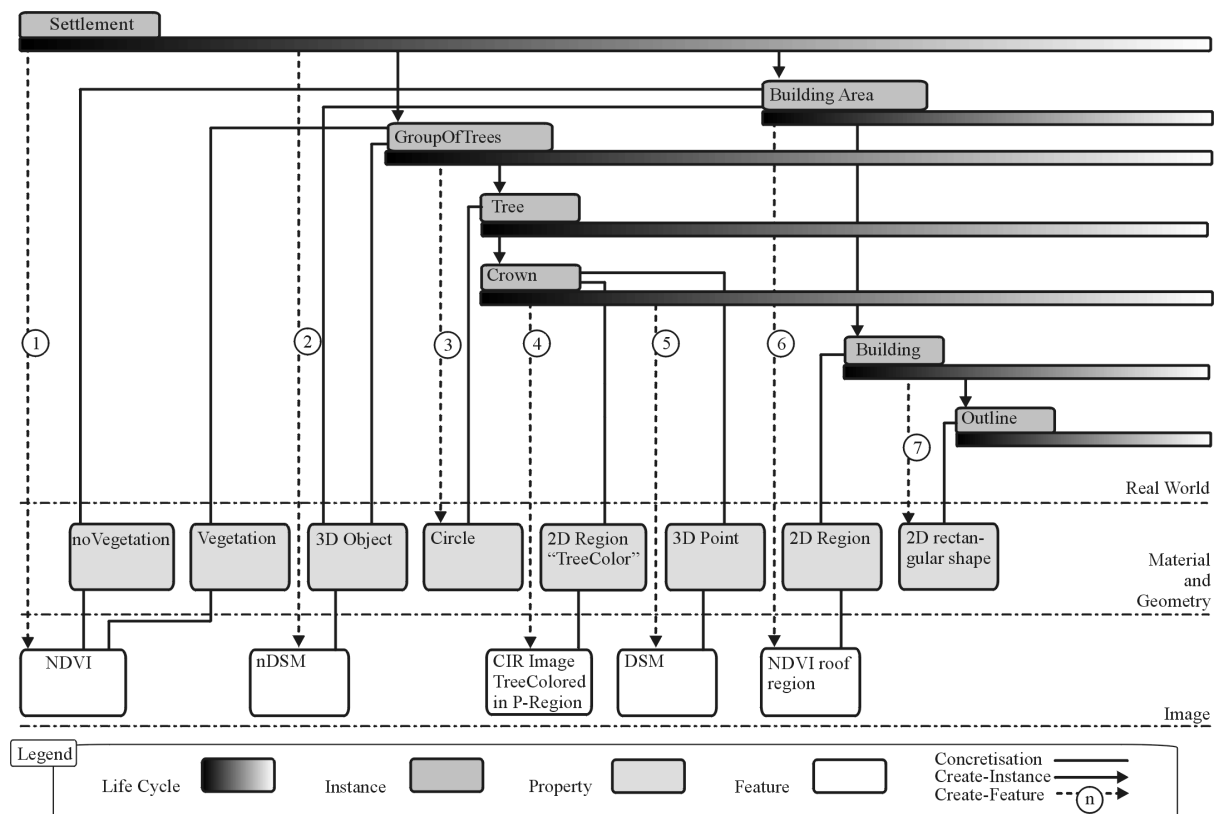


Figure 2: Model and sequence diagram for the extraction of objects in settlement context

We consider a *normalized DSM* (*nDSM*) as input to our approach, which is the difference  $DSM - DTM$ . A *digital surface model* (*DSM*) is an image consisting of height values including vegetation, buildings and other objects. A *digital terrain model* (*DTM*) consists of only those points lying directly on the terrain. There are various methods to reduce a DSM to a *nDSM*, in general these algorithms are used for the processing of laser data to derive a DTM (e. g. KRAUS & PFEIFER, 1998, VOSSELMAN, 2000, LOHMANN ET AL., 2000). A discussion of these techniques is beyond the scope of this paper. In order to actually produce a *nDSM* for our work we have adopted the method described by JACOBSEN & PASSINI (2001) in which the transformation from DSM to *nDSM* involves a local analysis of the height differences of neighboring points and profiles followed by linear prediction.

### 4.1 Detection of Areas

We use the term *3DObject* for the objects in the scene having a height above the terrain, for example a building in contrast to a road. In the *nDSM 3DObjects* are searched for as local

maxima having a minimum size. In order to detect vegetation in the scene the NDVI image is segmented into the two regions vegetation and non-vegetation. This segmentation is based on a histogram analysis of the NDVI image under the assumption that there exists a clear local minimum close to zero which represents the threshold necessary for the segmentation. After creation of the necessary features (marked as (1) and (2) in figure 2), instances of the concept *GroupOfTrees* are generated by intersecting the *Vegetation* areas with the detected *3DObjects*. Instances of *BuildingAreas* are generated by intersecting *noVegetation* areas with *3DObjects*.

## 4.2 Extraction of Trees

The extraction of trees is based on a model, which includes geometric and radiometric features, as well as neighborhood relations. The visible part of a tree in the scene, the crown, is generalized to a circle. Furthermore we assume, that the shape is symmetric around the Z axis. In the radiometric tree model we assume that a tree has a spectral signature different from the signatures of the neighboring trees. This assumption is needed to separate neighboring trees. As in an urban environment the trees are often planted by humans, trees usually stand at some distance. In our model we assume that the distance  $d$  between trees is larger than their radius  $b$  (see fig. 3).

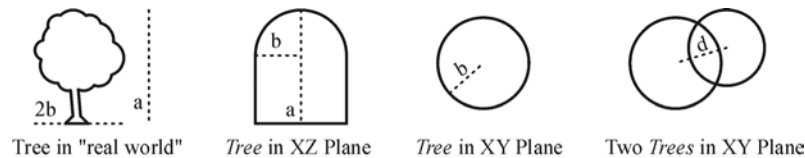


Figure 3: A tree in the “real world” and the geometric parts of the concept *Tree*

After the instantiation of a *GroupOfTree* object the extraction of individual trees is performed in three steps. (1) every *GroupOfTree* region is decomposed into circular regions by means of morphological operations, (2) inside of every circular region the spectral signature is trained and used for a refinement of the position of the radius, and (3) the height of every tree is computed with a kind of a stamp. These steps are mapped in figure 2 as (3), (4), and (5). A detailed description of the algorithm for the extraction of trees is given in STRAUB & HEIPKE (2001).

## 4.3 Building Extraction

Before analyzing the *BuildingArea* in order to reconstruct the building shape a second segmentation of this region has to be performed. This is motivated by the fact that the global segmentation process can't properly separate individual buildings from its surrounding area caused by a weak resolved nDSM. To reach a better delineation of the *BuildingArea* a local investigation of the NDVI is carried out: Assuming that the spectral characteristic of the roof is homogenous inside the roof area but differs significantly from the surrounding a minimum and a maximum threshold are selected from a central region in the domain of the *BuildingArea* in the NDVI image, assigned with (6) in fig. 2. The regions resulting after applying these thresholds will now be further described by the analysis of invariant moments.

Invariant moments up to the second order (HARALICK & SHAPIRO, 1993) can be used to define a rectangle around a cloud of points. The parameters of the rectangles -width, length, orientation and position- are derived from analyzing invariant moments. In general the geometric moment  $M$  of the order  $(i,j)$  in the discrete domain can be written as

$$M_{ij} = \sum_{x_1}^{x_n} \sum_{y_1}^{y_n} x^i y^j f(x, y), \quad (1)$$

where  $f(x, y)$  in case of a nDSM is the height  $H$  at  $(x, y)$ . The nDSM acts as a weighting function. The analysis of geometric moments with the aim to reconstruct buildings from height data was proposed by MAAS (1999). The procedure can be summarized as follows: The geometric moments can be transformed to invariant moments by (1) relating the coordinates to the center of gravity (shift invariance) and (2) by means of a principal axis transformation (rotation invariance). Because these invariant moments refer to the local coordinate system of the point cloud, they can be used to calculate the dimension in the local  $x$ - and  $y$ -direction. The calculation of the orientation gets numerical instable in cases where the shape of the point cloud gets quadratic or round. Additionally when this shape is very complex the orientation may be inaccurate.

The main idea in our approach is that a building shape can be decomposed into more than one rectangle. The principal task is to minimize the difference between the area the point cloud derived from intersecting the *BuildingArea* with the nDSM covers in the  $XY$ -plane and the area of the rectangular model. In order to avoid a too fine decomposition a minimum size criteria is brought in.

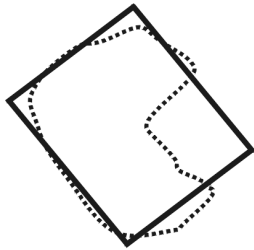


Figure 4: First rectangular describing the whole segmented region

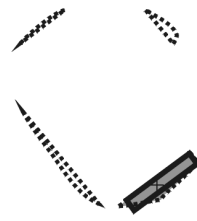


Figure 5: Areas which are not covered by the rectangular model

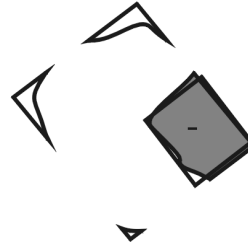


Figure 6: Areas which are not part of the building model after the first area, but part of the iteration step rectangular model

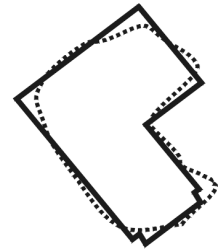


Figure 7: Rectangular after the iteration step

In figures 4 to 7 the single iteration steps of our hierarchical approach are presented. In fig. 4 the resulting rectangle after the analysis of invariant moments of the whole region is shown. The dotted line represents the region stemming from the local segmentation, and the black line represents the rectangle, which was derived by analyzing this region. The next step consists in studying the parts of the region which are contained in the region coming from segmentation but not in the rectangle (fig. 5) and vice versa (fig. 6). The regions larger than the minimum size are filled. Figure 7 represents the situation when the accepted regions were described by rectangles and added resp. removed to/from the primary rectangle.

Afterwards the process restarts with the new shape until no remaining areas fulfill the minimum size criteria. In fig. 2 this step can be found as (7). This kind of decomposition allows to gain more geometrical knowledge of the building: Extensions of buildings are added successively to the model and can therefore later on be treated separately (e.g. for the 3D-reconstruction). In addition the use of weighted moments, i.e. taking in account the height, allows to bring in constraints regarding the roof type, e.g. an extension of a building may just be added to the description if the roof inclination meets certain size criteria.

## 5 Results

The approach was applied to image and height data of a test area in Grangemouth, Scotland. The color infrared aerial images were acquired in summer 2000 for the IST project CROSSES. The image flight was carried out with 80% overlap along and across the flight

direction. The image scale is 1:5000, which leads to a GSD of 10 cm at a scanning resolution 21 $\mu$ m. Based on these images a DSM and a true orthoimage were automatically derived by the French company ISTAR (GABET ET AL., 1994). The orthoimage and the DSM cover an area of 4 km<sup>2</sup>. A large part of the whole test site belongs to an industrial plant with sparse vegetation. We have selected a subset of the data set for our test with relatively typical suburban characteristics. One family houses, some larger buildings, trees and roads are visible in this subset. It is about 2700\*2300 pixels large, corresponding to an area of approximately 60,000 m<sup>2</sup>, refer to figure 8 for an overview of the “Grangemouth” test site.

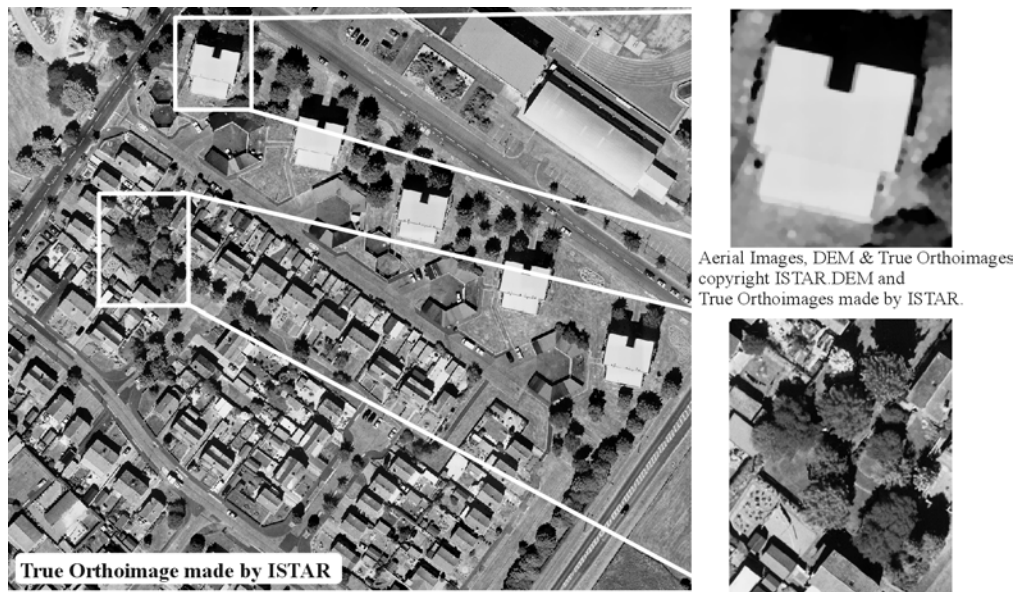


Figure 8: Overview of the test site “Grangemouth”, two enlarged subsets showing a building and trees in the orthoimage

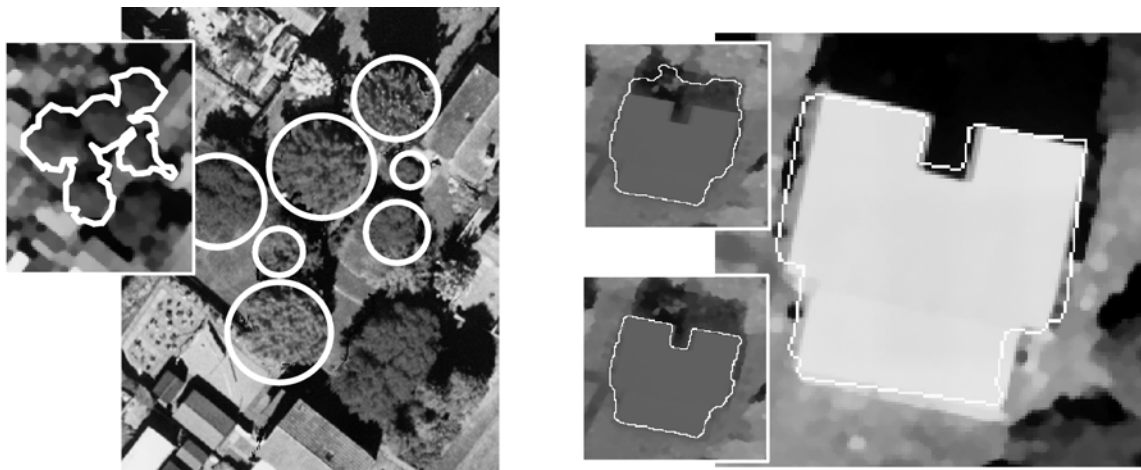


Figure 9: Enlarged subsets from the test area, *GroupOfTrees* and individual *Trees* superimposed (left), *BuildingArea* before and after local segmentation, final rectangular description (right)

For the two examples depicted in figure 9 the small image on the left shows the surrounding polygon of a *GroupOfTrees* object with the corresponding image. The larger image shows the resulting individual *Trees* by means of a circle superimposed to the image. The right side of figure 9 shows the example building: In the upper small picture the initial *BuildingArea* is superimposed to the NDVI image. The area contains shadily regions, after the local segmen-

tation (ref. chapter 4.3) the area better fits to the building shape (lower small picture). The right image shows the rectangular model of the building superimposed to the orthoimage.

Overall, 235 trees and 46 buildings were extracted in the test site with the approach described above. In order to estimate the *completeness* (True Positives / (True Positives + False Negatives)) and the *correctness* (True Positives / (True Positives+False Positives)) we have compared the obtained results to reference data. A completeness of 95% for the trees, 94% for the buildings and a correctness of 89% for the trees and 80% for the buildings was reached, refer for example WIEDEMANN ET AL. (1998) regarding the quality measures.

## 6 Summary and Outlook

We have presented an approach for the extraction of trees and building shapes from color infrared and height data in an urban environment for the generation of city models. Regarding trees, the approach is based on a model, using geometric and radiometric features as well as neighboring relations between trees. Building shapes are approximated using the analysis of invariant moments. We have embedded this tree and building shape extraction into a hierarchical scene description of a landscape in different abstraction levels. The abstraction levels are used as a control mechanism for the feature extraction in order to simplify the automatic interpretation of images. The approach was investigated in a test site of approximately 60,000 m<sup>2</sup> with promising results.

The internal evaluation of the results will be the main focus of our work in the future, because it is seen as the most critical point in the proposed automatic system. This is for example important for the orientation of buildings, therefore we intend to enhance the calculation of this parameter. Another idea is to verify the reconstructed corners in the orthoimage.

## 7 Acknowledgement

This work was developed within the IST Program CROSSES financed by the European Commission under the project number IST-1999-10510.

## 8 References

- BRANDTBERG, T. & WALTER, F., 1998: Automated delineation of individual tree crowns in high spatial resolution aerial images by multiple scale analysis, *Machine Vision and Applications* 1998 (11): 64-73.
- BRENNER, C. & HAALA, N., 1999: Extraction of buildings and trees in urban environments, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 54 (1999): 130-137.
- BRUNN, A., WEIDNER, U., FÖRSTNER, W., 1995: Model-based 2D-Shape Recovery, in: *Mustererkennung 1995*, G. Sagerer et al. (eds.): 260-268, Springer-Verlag.
- BRUNN, A. & WEIDNER, U., 1997: Extracting buildings from digital surface-models. In *IAPRS*, Vol. 32, Part 4-4W2, "3D Reconstruction and Modeling of Topographic Objects", 27-34.
- CROSSES, 2001: The CROSSES Homepage. <http://crosses.matrasi-tls.fr/>. (June-01- 2001)
- GABET, L., GIRAUDON, G., RENOARD, L., 1994: Construction automatique de modèles numériques de terrain haute résolution en milieu urbain. *Société Française de Photogrammétrie et Télédétection* (135): 9-25.
- HARALICK, R.-M. & SHAPIRO, L. G., 1993: *Computer and Robot Vision*, Vol. II, Addison Wesley, 630 pages.
- HEIPKE, C., PAKZAD, K., STRAUB, B.-M., 2000: Image Analysis for GIS Data Acquisition. *Photogrammetric Record* 16(96): 963-985.

- JACOBSEN, K., PASSINI R., 2000: Filtering of digital elevation models. In GIS 2001 "Branching Out: Spatial Technology Goes Mainstream", Vancouver, Canada. 19-22 February 2001. (on CD).
- KRAUS, K., PFEIFER, N., 1998: Determination of terrain models in wooded areas with airborne laser scanner data. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* 53 (1998): 193-203.
- LINDBERG, T., 1994: Scale-space theory in computer vision. Kluwer Academic Publishers, Boston, USA. 423 pages.
- LOHMANN, P., KOCH A., SCHAEFFER, M., 2000: Approaches to the Filtering of Laser Scanner Data, *International Archives of Remote Sensing and Photogrammetry*, Vol. 33, Part B 3/1: 534-541.
- MAAS, H.G., 1999: Closed solutions for the determination of parametric building models from invariant moments of airborne laserscanner data. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 32, Part B3: 193-199.
- POLLOCK, R. J., 1994: A Model-based approach to automatically locating tree crowns in high spatial resolution images, In Desachy, J. (ed.), *SPIE Vol. 2315, Image and Signal Processing for Remote Sensing*. 526-537.
- STRAUB, B.-M., HEIPKE, C., 2001: Automatic Extraction of Trees for 3D-City Models from Images and Height Data, In: *Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images (III)*, Birkhäuser, (in Press).
- STRAUB, B.-M., WIEDEMANN, C., HEIPKE, C., 2000: Towards the automatic interpretation of images for GIS update, *International Archives of Remote Sensing and Photogrammetry*, Vol. 32, B2: 521-532.
- SUETENS, P., FUA, P., HANSON, A. J., 1992: Computational strategies for object recognition. *ACM Computing Surveys* 24(1): 5-60.
- VOSSelman, G., 2000: Slope based filtering of laser altimetry data. *International Archives of Remote Sensing and Photogrammetry*, Vol. 33, Part B 3: 935-942.
- WEIDNER, U., 1997: Gebäudeerfassung aus Digitalen Oberflächenmodellen. Deutsche Geodätische Kommission, Series C, 474. 184 pages.
- WIEDEMANN, C., HEIPKE, C., MAYER, H, JAMET, O., 1998: Empirical Evaluation of Automatically Extracted Road Axes. In: Bowyer Phillips (eds.), *Empirical Evaluation Methods in Computer Vision*, Los Alamitos, California, IEEE Computer Society Press. pp. 172-187.



---

# Geometrisches und radiometrisches Potential eines digitalen integrierten flugzeuggetragenen Fernerkundungssystems für Precision Farming (PFIFF)

GÖRRES GRENZDÖRFFER<sup>1</sup>

*Abstract: An integrated digital remote sensing system called PFIFF has been developed at the institute for geodesy and geoinformatics, Rostock University over the last years. Thereby intensive investigations of the geometric and radiometric properties of the colour digital sensor were conducted. For an efficient geocoding by automatic aerotriangulation an attitude heading reference system (AHRS) has been developed. A thorough calibration of the system under aerial conditions revealed that with the use of geodetic GPS-receivers the photogrammetric performance of the system has the capability for an aerotriangulation without ground control points.*

## 1 Einleitung

Am Institut für Geodäsie und Geoinformatik ist in den letzten Jahren für Precision Farming ein digitales integriertes flugzeuggetragenes Fernerkundungssystem (PFIFF) entwickelt worden, GRENZDÖRFFER, 2001. Neben der Kamera gehören außerdem die GPS-gestützte Bildflugnavigation, ein integriertes System zur automatischen GPS-gestützten Auslösesteuerung und ein Attitude Heading Reference System (AHRS) zur genäherten Erfassung der Parameter der äußeren Orientierung mittels GPS, einem zweiachsiger Neigungssensor und einem Magnetkompass zum Gesamtsystem, das in Abb. 1 schematisch dargestellt ist.

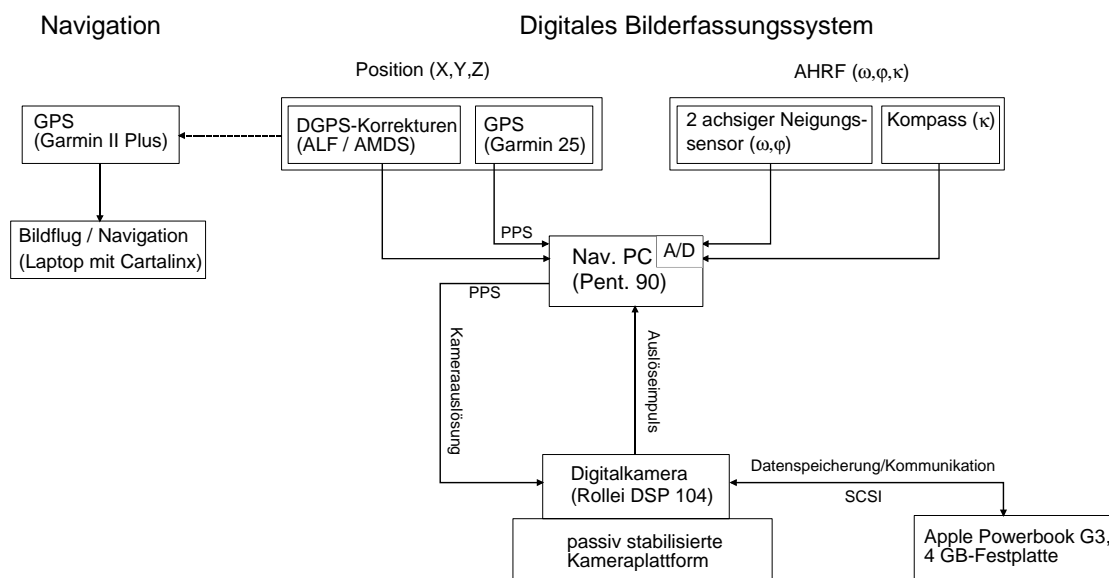


Abb. 1: Aufbau und Komponenten des flugzeuggestützten integrierten digitalen Fernerkundungssystems PFIFF

<sup>1</sup> Dipl. Geogr. Görres Grendörffer, Institut für Geodäsie und Geoinformatik, Universität Rostock, J.-v.-Liebig Weg 6, 18059 Rostock, email: goerres.grenzdoerffer@agrarak.uni-rostock.de

## 2 Digitalkamera Rollei DSP 104

Kernstück des neuen digitalen Systems ist ein Rollei DSP 104 Farbdigitalsensor mit einer Auflösung von 2010 \* 2018 Pixel (weitere Details siehe Tab. 1). Der DSP 104 Sensor wird als Rückteil auf den Kamerakörper einer Rolleiflex 6008 Integral aufgesetzt. Die Kamera kann in verschiedenen Aufnahmemodi betrieben werden. Bei bewegten Objekten oder bewegter Kamera – wie im Fall einer Luftbildaufnahme – wird im SingleShot Modus (= Ortsmultiplex- bzw. Filtermasken-Verfahren) aufgenommen. Bei dieser Betriebsart erfolgt eine einzige Belichtung mit einer vorgeschalteten Farbfiltermaske, bei der für jedes Sensorelement nur ein Grau- bzw. Farbwert aufgezeichnet wird. Die fehlenden Farbinformationen werden aus der Nachbarschaft interpoliert.

Tab. 1: Übersicht über technische Parameter der Rollei DSP 104

Auflösung	2010 * 2018 Pixel
Pixelgröße	15 * 15 µm
Sensorgöße	30.15 * 30.27 mm
Farberfassung	Mosaikfilter auf Chip aufgedampft
Farbtiefe pro Kanal	12 Bit
Dateigröße (8 Bit-tif)	11,6 MB
Min. Bildfolgezeit	ca. 7 Sek. (RapidShot Modus)
Gewicht (inkl. Kamera)	ca. 2.200 g
Rechneranbindung	SCSI II, Apple Powerbook G3
Software	Rollei DSP 104 Vers. 2.1.5

### 2.1 Geometrische und radiometrische Eigenschaften DSP 104

Bei der Untersuchung der Bildqualität digitaler CCD-Aufnahmesysteme sind, gegenüber einem analogen Meßsystem, einige zusätzliche Parameter zu beachten, die mit der elektronischen Bilderzeugung verbunden sind. In der nachfolgenden Übersicht sind einige wichtige geometrische und radiometrische Parameter aufgeführt, die anhand praktischer Tests untersucht wurden. Da die Bilder nicht nur photogrammetrisch ausgewertet werden sollen, sondern auch spektral sind die radiometrischen Eigenschaften des 12 Bit Sensors intensiv untersucht worden. Die **Fett** unterlegten Parameter werden nachfolgend vorgestellt, für die anderen wird auf GRENZDÖRFFER, 2001 verwiesen.

<b>Geometrische Parameter</b>	<b>Radiometrische Parameter</b>
- <b>Innere Orientierung</b>	- Farbartefakte
- <b>Stabilität der Mechanik</b>	- Linearität, Dynamik, Blooming
	- <b>Rauschen (SNR)</b>
	- <b>Helligkeitsrandabfall</b>
	- <b>Spektrale Sensitivität</b>

#### 2.1.1. Innere Orientierung

Die Parameter der inneren Orientierung und deren Stabilität sind durch Testfeldkalibrierungen im Labor bestimmt worden. Dabei weist der Digitalsensor bei der geometrischen Kalibrierung durch einen, für nicht photogrammetrische Zwecke entwickelten CCD-Sensoren typische, unzureichende mechanische Stabilität auf. Dies führt dazu, daß insbesondere die

Bildhauptpunktlage bei jedem Zusammenbau bzw. jedem Einsatz neu bestimmt werden muß. Das bedeutet für den Luftbildeinsatz, daß eine Simultankalibrierung der Parameter der inneren Orientierung bei jedem Bildflug notwendig ist.

### 2.1.2. Rauschen (SNR)

Unter Rauschen werden im allgemeinen kleinere zufällige Abweichungen des gemessenen Signals vom Sollwert verstanden. Das Gesamttrauschen einer Digitalkamera setzt sich aus der Überlagerung mehrerer Komponenten zusammen, vgl. BÄHR UND VÖGTLE, 1998. Als Meßgröße des Rauschens eines Systems wird das Signal-Rausch Verhältnis (SNR) angegeben, d.h. das Verhältnis der Rauschspannung zur Signalspannung:

$$SNR = \log \frac{U_s}{U_r} \quad (1)$$

Diese Größen sind jedoch direkt nur über Hardwaremanipulationen zu bestimmen. Aus diesem Grunde wird das SNR indirekt über eine Analyse der Grauwerte bestimmt. In einem einfachen Ansatz wird dazu eine gleichmäßig ausgeleuchtete und homogene Fläche mit einem stark defokussierten Objektiv aufgenommen. Dabei stellt der Mittelwert der gemessenen Grauwerte das Signal und die Standardabweichung den Rauschanteil dar. Ein Vorteil dieses Verfahrens liegt darin, daß bei der Aufnahme eines Testfeld mit verschiedenen definierten Reflexionsintensitäten zusätzlich die Abhängigkeit des SNR von der reflektierten Objekthelligkeit bzw. der Dichte der Vorlage gemessen werden kann. Der Nachteil dieses Verfahrens liegt darin, daß von einer absolut homogenen Testfläche und einer einheitlichen, diffusen Beleuchtung ausgegangen wird und damit alle Restfehler voll in das Rauschen eingehen.

Zur Bestimmung des SNR wurde ein definierter Graukeil (Fotowand<sup>TM</sup> 4269) verwandt, welcher nahezu lambertsche Reflexionseigenschaften mit einem Dichteumfang von 0 – 1.65 aufweist sowie reflektierte Sonnenstrahlung als homogene Lichtquelle.

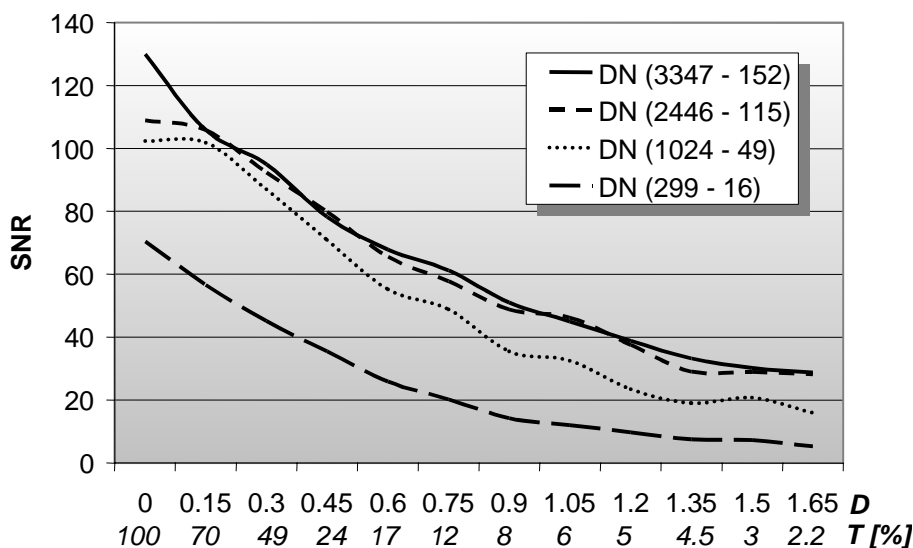


Abb. 2: Signal-Rausch-Verhältnis CCD-Chip in Abhängigkeit der Aussteuerung der Kamera und der Dichte der Vorlage

Die Größe der homogenen Teilflächen betragen 51 \* 51 Pixel. Um das SNR über die gesamten Dynamikbereich der Kamera zu erfassen sind mehrere Aufnahmen mit unterschiedlicher Aussteuerung aufgenommen worden. Abb. 2 zeigt das SNR in Abhängigkeit der Dichte für vier verschiedene Aufnahmen, die nahezu den gesamten Grauwertumfang der Digitalkamera umfassen. Die Ergebnisse verdeutlichen, daß das SNR von 5 bei geringer Belichtung und sehr

hoher Dichte bis auf 130 bei hoher Belichtung und geringer Dichte reicht. Der teilweise unregelmäßige Verlauf der Kurven läßt auf Inhomogenitäten der Vorlage schließen. Bei natürlichen Oberflächen, z.B. Wald, die selten eine geringere Reflektivität (= Transparenz) als 3% des eingestrahnten Lichts aufweisen, kann bei gut ausgesteuerten Aufnahmen ein  $SNR > 30$  erreicht werden. Die ermittelten SNR sind im Vergleich zu herkömmlichen Erderkundungssatelliten geringfügig schlechter, mit Hyperspektralscannern jedoch vergleichbar, SMITH UND CURRAN, 1999.

### 2.1.3. Helligkeitsrandabfall

Der Helligkeitsrandabfall, der sich mit zunehmender Entfernung vom Bildhauptpunkt zu den Bildecken hin bemerkbar macht, ist auf verschiedene Ursachen zurückzuführen, LILLESAND & KIEFER, 1994. Zur Korrektur des Helligkeitsrandabfalls für eine beliebige Blendenöffnung wird die Funktion

$$f(x) = \cos^a x \quad (2)$$

verwandt. Bei großer Blendenöffnung liegt der Wert für  $a$  in der Regel wesentlich höher als bei einer kleinen Blende. Da moderne Kameras einen Teil des theoretischen Helligkeitsrandabfalls durch eine gute Optik ausgleichen können, liegt der praktische Wert für  $a$  zwischen 1.5 und 4, LILLESAND & KIEFER, 1994.

Der Helligkeitsrandabfall der Digitalkamera bei Blende 4 wurde anhand einer diffus reflektierten Fläche gemessen und mit einer  $\cos^{3.25}$ -Funktion approximiert. Die Korrektur des ermittelten Helligkeitsrandabfalls einer Aufnahme erfordert die Überführung der winkelabhängigen Korrekturfunktion in Abhängigkeit der Nadirdistanz  $\nu$  in eine Korrekturmatrix für jedes Bildelement des CCD-Chips in Abhängigkeit der Radialentfernung  $r$ . Der Korrekturfaktor  $K$  für jedes Bildelement  $(x', y')$  errechnet sich wie folgt:

$$K = \cos^{-3.25} \nu \quad \text{mit} \quad \tan \nu = \frac{r}{c} \quad \text{mit} \quad r^2 = x'^2 + y'^2 \quad (3)$$

wobei

$x'$  : Wertebereich Bildmatrix in der x-Achse (-1005 – 1005)

$y'$  : Wertebereich Bildmatrix in der y-Achse (-1009 – 1009)

Zur Validierung der empirisch ermittelten Funktion sind Aufnahmen eines Bildflugs vom 6.12.2000 ausgewählt worden, bei dem trotz sonnigen Wetters das verfügbare Licht unter Inkaufnahme einer leichten Unterbelichtung nur für eine Belichtung mit 1/60 sec. und Blende 4 ausreichte. Der Helligkeitsrandabfall ist durch die notwendige Kontraststreckung bei der 12 Bit / 8 Bit Transformation besonders deutlich, siehe Abb. 3. Mit der Einführung der Korrekturfunktion des Helligkeitsrandabfalls kann dieser Effekt jedoch fast völlig ausgeglichen werden, was weitere visuelle und digitale Auswerteschritte wesentlich erleichtert, Abb. 3.

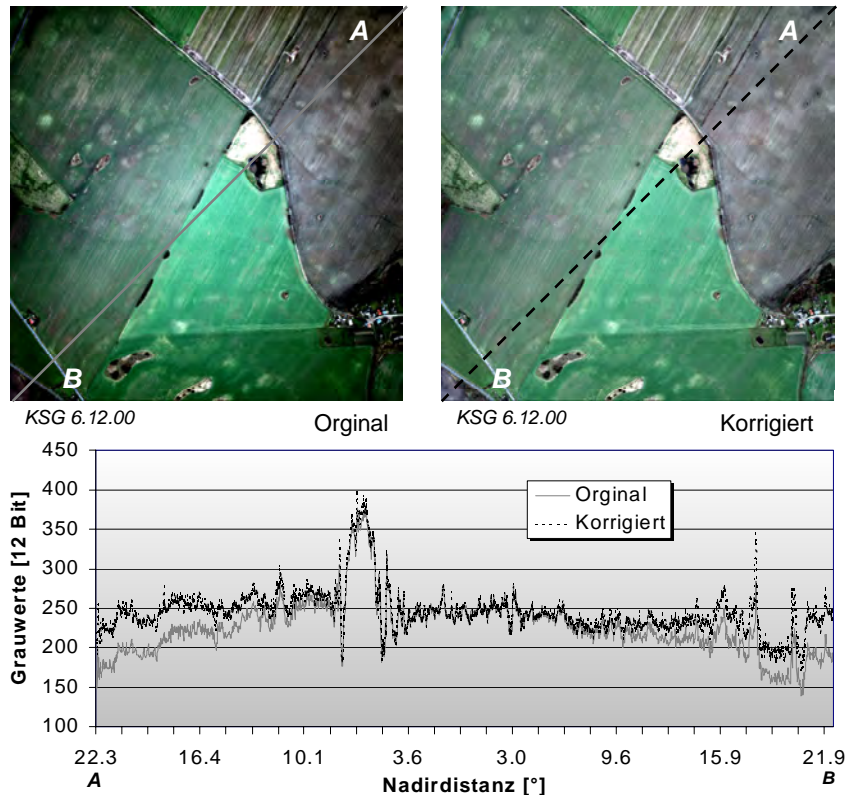


Abb. 3: Korrektur des Helligkeitsrandabfalls, Bildflug 6.12.2000, Bildnr. 13

#### 2.1.4. Spektrale Empfindlichkeit

Zur Untersuchung der spektralen Empfindlichkeit der aufgedampften Farbfilter wurde ein kleiner Gittermonochromator der Firma Pi Optics mit einem Eingangs- und Austrittsschlitz von  $3 \times 0.5$  mm verwendet. Die vom CCD-Sensor aufgezeichneten roten, grünen und blauen Anteile des monochromatischen Lichts wurden anhand des Mittelwerts eines  $20 \times 30$  Pixel großen Fensters für alle Bilder bestimmt und relativ zum Gesamtsignal dargestellt, siehe Abb. 4. Aufgrund der teilweisen Interferenzen zwischen dem roten und dem blauen Licht wurden bei der Kalibrierung mit dem Monochromator neben den gemessenen Werten noch bereinigte und idealisierte Werte der Filtereigenschaften in die Abb. 4 eingetragen.

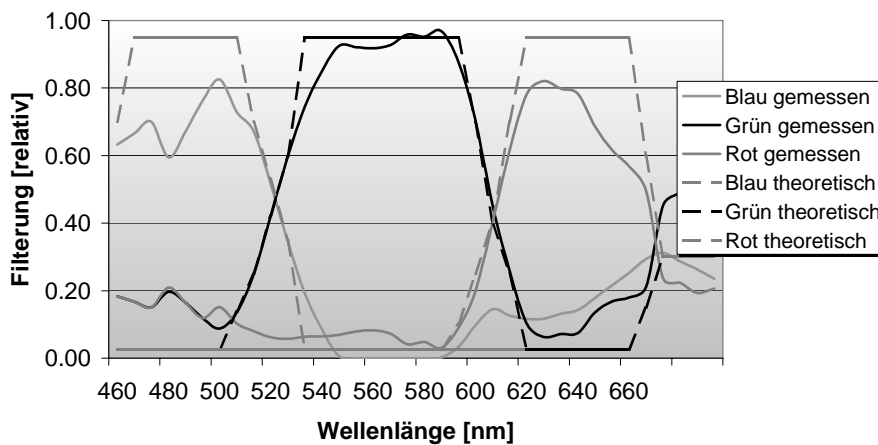


Abb. 4: Relative spektrale Empfindlichkeit (RGB) der Digitalkamera DSP 104

Das bedeutet, die Kamera verfügt über einen schmalen blauen Kanal mit einer Wellenlänge von etwa 445 – 505 nm, einen breiten grünen Kanal in einem Wellenlängenbereich von 505 – 590 nm und einen roten Kanal im Bereich von 590 – 655 nm.

Zur Validierung der Messungen zur spektralen Empfindlichkeit der drei Farbkanäle und zur Untersuchung der Möglichkeiten der Digitalkamera für spektrale Auswertungen ist eine diffus reflektierende Farbtafel (Fotowand<sup>TM</sup> 4261) aufgenommen worden. Parallel dazu sind die Reflexionseigenschaften der farbigen Testflächen mit dem Feldspektrometer gemessen worden. Die Prüfung der Zusammenhänge zwischen den gemessenen Reflexionswerten und den RGB-Farbwerten der Digitalkamera erfolgte durch eine Regressionsanalyse, wobei ein  $R^2$  von 0.97 - 0.99 erzielt werden konnte. Das bedeutet, daß der Sensor für quantitative Spektralauswertungen im Vergleich zu photographischen Aufnahme uneingeschränkt einsetzbar ist.

### **3 Performance von PFIFF im Labor und unter Bildflugbedingungen**

Bei der Registrierung der Lageparameter der äußeren Orientierung ( $\omega, \varphi, \kappa$ ) als Näherungs- bzw. Startwerte für eine automatische Bildzuordnung sind neue, preiswerte Sensoren eingesetzt, kalibriert und erprobt werden. Im Einzelnen handelt es sich dabei um einen zweiachsigen Neigungssensor vom Typ NS-15/E, der die an den jeweiligen Sensorachsen anfallenden Beschleunigungsanteile des Gesamtsschwerevektors mißt und einen elektronischen flüssigkeitsgelagerten Robertson RFC-250 Fluxgate Kompaß.

#### **3.1 Laborkalibrierung des AHRS**

Die Sensoren sind in einem Navigationsrechner integriert und mit dem GPS-Signal synchronisiert. Die Kalibrierung des Neigungssensors unter statischen Laborbedingungen erbrachte langzeitstabile Winkelgenauigkeiten von  $\leq \pm 0.02^\circ$  für kleine Winkel in  $\omega$  und  $\varphi$ , wie sie im Bildflug üblich sind. Eine terrestrische Kalibrierung des Magnetkompasses verdeutlichte die Störanfälligkeit des Magnetsensors gegenüber elektromagnetischen Störfeldern und unterstrich die Notwendigkeit einer winkelabhängigen Korrektur im Flugzeug.

Um die auf unterschiedlichen Meßprinzipien beruhenden Sensoren zu kombinieren sind die verschiedenen Fehlercharakteristika zu berücksichtigen und mathematisch zu integrieren. So verfügen GPS, Linearbeschleuniger und Kompaß über folgende Fehlercharakteristika:

- Die GPS-Positionierungsgenauigkeit ist von der verwendeten Hardware und erst in zweiter Linie von der Satellitenkonfiguration und anderen Fehlerquellen abhängig.
- Die Meßgenauigkeit des zweiachsigen Linearbeschleunigers beruht vor allem auf einer sorgfältigen Kalibrierung und Ausrichtung. Während des Bildflugs beeinträchtigen darüber hinaus externe Beschleunigungen und Vibrationen die Meßgenauigkeit.
- Die Meßgenauigkeit des Magnetkompasses wird durch Schwankungen des Erdmagnetfeldes beeinflusst, die nachträglich korrigiert werden können. Weitaus diffiziler ist die flugzeugseitige Kalibrierung des Kompasses zu bewerten.

#### **3.2 PFIFF unter Bildflugbedingungen**

Um die Genauigkeit des PFIFF zur direkten Orientierungsbestimmung unter Flugzeugbedingungen zu testen, wurde am 2.11.2000 ein signalisierter Bildflug von zwei Testgebieten durchgeführt. Die photogrammetrische Auswertung liefert unabhängige Kontrollinformationen zur Qualitätsbestimmung der direkt gemessenen Position und der Lagewinkel. Durch den

Vergleich der Parameter der äußeren Orientierungsparameter beider Systeme kann die Absolutgenauigkeit der direkten Positions- und Winkelbestimmung durch das GPS/AHRS-System festgestellt werden. In einem nächsten Schritt können die Bilder mit den Orientierungsparametern des GPS/AHRS Systems direkt georeferenziert werden. Vergleiche mit bekannten Kontrollpunkten am Boden liefern Informationen über die erzielbare Genauigkeit der Punktbestimmung im Objektraum aus den direkt orientierten Luftbildern. Dieser Genauigkeitsvergleich ist umfassend, da sich sowohl Restfehler der Orientierungsparameter, als auch Kalibrierfehler des optischen Systems sowie Fehler bei der Ausrichtung und Synchronisation der verschiedenen Sensoren in den Differenzvektoren zu den bekannten Kontrollpunktkoordinaten zeigen.

Das Bildflugzeug, eine Cessna 172, wurde mit einem ASTECH-3DF-Multi-Antennen-GPS-Empfänger ausgerüstet. Dafür wurden die vier Antennen für den Test provisorisch auf dem Flugzeughdach montiert und mit einem Tachymeter TC 600 relativ zueinander exakt eingemessen. Darüber hinaus wurde eine L1/L2-Flugzeugantenne für den Leica SR 399-Empfänger direkt oberhalb der Kamera auf dem Flugzeughdach fixiert. Die Höhendifferenz zum Projektionszentrum wurde gemessen und als Antennenoffset berücksichtigt. Die Garmin 25 GPS-Antenne des Navigationssystems wurde ebenfalls auf dem Flugzeughdach montiert. Auf einen DGPS-Korrekturdienst wurde nach der S/A-Abschaltung verzichtet. Die Digitalkamera mit dem aufgesetzten Neigungssensor wurde für den Flug fixiert, um eine stabile relative Orientierung der Kamera zu dem GPS-Mehrantennen-System zu gewährleisten.

Es wurden zwei Testgebiete als photogrammetrische Blöcke aufgenommen. Der erste Block dient dabei zur Simultankalibrierung und zum Genauigkeitsvergleich der eingesetzten Neigungssensoren und der GPS-Positionsbestimmung. Mit dem zweiten Block sollen die Möglichkeiten und das Genauigkeitspotential einer paßpunktlosen automatischen Aerotriangulation unter den für Precision Farming üblichen Bildflugparametern untersucht werden.

Für den Block Purkshof lagen Paßpunkte in ausreichender Anzahl vor, so daß die Lage des Bildhauptpunktes im Rahmen einer Simultankalibrierung für den Bildflug bestimmt werden konnte. Die äußere Genauigkeit des Blocks Purkshof – gemessen an unabhängigen Kontrollpunkten – betrug bei einem Bildmaßstab von 1: 16.500 ca. 10 cm in der Lage und 21 cm in der Höhe, was im Ergebnis mit herkömmlichen photogrammetrischen Kameras durchaus vergleichbar ist. Bei der geringeren Höhengenaugkeit ist das Basisverhältnis der Digitalkamera zu berücksichtigen, welches um den Faktor 2.5 geringer ist als bei einer Reihenmeßkammer mit einem Weitwinkelobjektiv.

In einem Bore-sight-Alignment wurde der Winkeloffset zwischen den Ergebnissen der Aerotriangulation, die sich auf das Projektionszentrum beziehen und den gemessenen 3DF-Winkeln, die sich auf die auf dem Flugzeughdach montierten GPS-Sensoren beziehen, bestimmt.

Ein Vergleich der GPS-Koordinaten des hochgenauen L1/L2-Empfängers und des einfachen GPS-Empfängers ergab, unter der Berücksichtigung des Antennenoffsets zwischen den beiden Empfängern für die Projektionszentren der beiden Blöcke, daß der Garmin-Empfänger für seine Preisklasse eine sehr hohe Genauigkeit von  $>4$  m in der Lage liefert. Auch unter Berücksichtigung der maximalen Abweichungen ist die Koordinatenqualität des Garmin-Empfängers für die Initialisierung einer automatischen Aerotriangulation ausreichend, auch wenn die Koordinaten bei der Ausgleichung nicht mehr zur Ergebnisverbesserung beitragen können. Ein Vergleich der Winkelmessungen ergab, daß die 3DF-Winkel auf dem Flugzeughdach  $0.35^\circ - 0.55^\circ$  von den Winkeln der Aerotriangulation abwichen, siehe Abb. 5 für den Block Purkshof. Im Gegensatz dazu wichen die direkt gemessenen Winkel des AHRS um  $1^\circ$  im Nickwinkel,  $2.45^\circ$  im Rollwinkel sowie  $14^\circ$  im Kurswinkel von den indirekt bestimmten Winkel der AT ab. Die äußerst unbefriedigenden Werte des Kompaß sind auf mehrere Faktoren zurückzuführen, die nachträglich kaum korrigiert werden können.



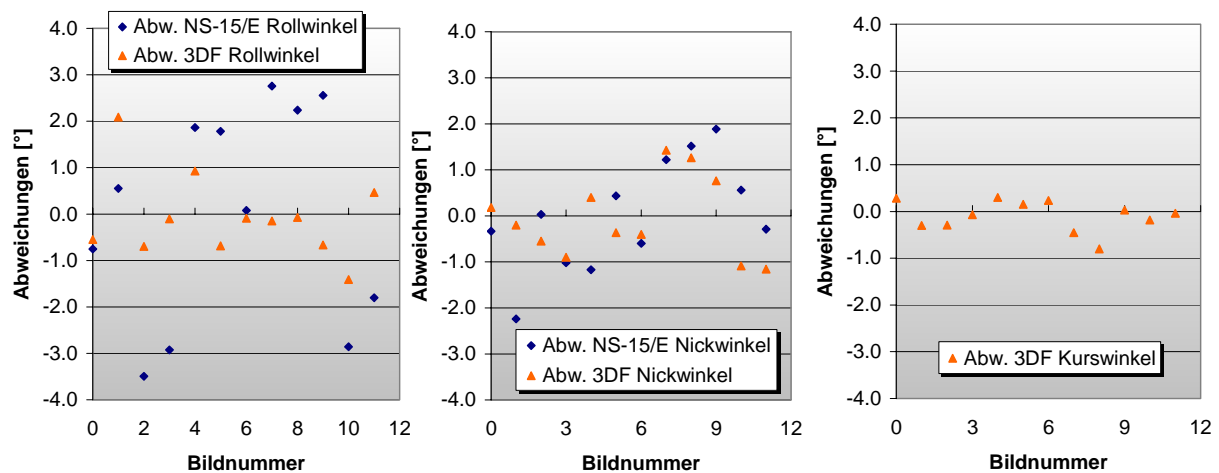


Abb. 5: Neigungsdifferenzen zwischen GPS / Neigungssensor und Aerotriangulation, Testgebiet Purkshof

Für den Block Toitenwinkler Moorwiesen wurde das Konzept einer paßpunktlosen Aerotriangulation angewendet, bei der nur die Positionen der Projektionszentren hochgenau in die Triangulation eingeführt werden müssen. Voraussetzung dafür ist allerdings, daß die innere Orientierung der Kamera bekannt ist, denn durch die fehlende Redundanz ist keine Simultankalibrierung möglich. Die eingeführten Startwerte der äußeren Orientierung der L1/L2-GPS-Positionen und 3DF-Winkel erwiesen sich als hinreichend genau, um den Prozeß der automatischen Verknüpfungspunktsuche erfolgreich zu initialisieren. Die äußere Genauigkeit wurde durch Kontrollpunkte /-linien aus der ALK, die nicht in die Triangulation mit eingezogen wurden, bestimmt und lag bei einem Bildmaßstab von 1 : 44.500 im Subpixelbereich, d.h. < 1 m in der Lage. Mit diesem erfolgreichen Experiment wird das hohe geometrische Genauigkeitspotential der Digitalkamera deutlich und Möglichkeiten einer effizienten automatischen paßpunktlosen Aerotriangulation mit dem Farbdigitalsensor aufgezeigt.

Das bedeutet, daß der ursprüngliche Ansatz, mit preiswerten Sensoren die näherungsweise Bestimmung der äußeren Orientierung zu ermöglichen, nur teilweise erfolgreich war. Während die GPS-Projektionszentren als Startwerte für eine automatische AT hinreichend genau waren, hat die Winkelbestimmung durch das AHRS unter den speziellen Bildflugbedingungen nur zu teilweise befriedigenden Ergebnissen geführt. Außerdem zeigte der umfassende Vergleich, daß unter der Verwendung hochgenauer GPS-Technik mit dem PFIFF eine automatische paßpunktlose Aerotriangulation möglich ist und zu sehr guten Ergebnissen führt.

## 4 Literaturverzeichnis

- BÄHR, H.P. UND VÖGTLE, T. [HRSG.] (1998): Digitale Bildverarbeitung: Anwendung in der Photogrammetrie, Kartographie und Fernerkundung.- 3. Aufl.: 360 S.; Wichmann Verlag, Heidelberg.
- GRENDÖRFFER, G. (2001): Konzeption, Entwicklung und Erprobung eines digitalen integrierten flugzeuggetragenen Fernerkundungssystems für Precision Farming (PFIFF).- Eingereichte Dissertation an der Ingenieurwissenschaftlichen Fakultät der Universität Rostock.- 140 S.
- LILLESAND, T.M. UND KIEFER, R.W. (1994): Remote Sensing and Image Interpretation.- 3. Aufl.: 750 S.; John Wiley & Sons
- SMITH, G.M. UND CURRAN, P. (1999): Methods for estimating image signal-to-noise-ratio (SNR).- In: Atkinson, P.M. und Tate, N.J. [Hrsg.]: Advances in Remote Sensing and GIS Analysis: S. 61 – 74; Chichester (Wiley & Sons)

# Automatic Reconstruction and Visualization of a Complex Buddha Tower of Bayon, Angkor, Cambodia

A. Gruen<sup>1</sup>, L. Zhang<sup>1</sup>, J. Visnovcova<sup>1</sup>

*Abstract: The Hindu and Buddhist monuments of Angkor in Cambodia are the legacy of highly developed Khmer empires. Well-known for their structural and surface complexity they constitute a great challenge to any attempt towards precise and detailed 3D measurements and modeling. This paper reports about a pilot project using modern techniques of analytical and digital photogrammetry to derive a photorealistic 3D model of one of the very complex towers of the famous Bayon temple of the ancient city of Angkor Thom. This high quality model will then be subject to visualization and animation.*

*On occasion of a balloon photogrammetry mission over the Bayon temple of Angkor, the first author took a number of tourist-type terrestrial images with a Minolta Dynax 500si analogue SRL camera of one of the many Buddha-faced towers of Bayon.*

*We aim at deriving automatically, after scanning of the images, a texture mapped 3D model of the very complex object. In a first step we have generated already such a model with a mixture of manual (phototriangulation) and automated procedures (image matching for surface reconstruction, editing for blunder removal, texture mapping, visualization and animation). This result has been presented in Visnovcova et al., 2001 and includes already some novel methods for point cloud blunder editing and view-dependent texture mapping.*

*Now we will include more images than before, intend to automate the phototriangulation procedure, develop a matching approach based on MPGC (Multi-photo Geometrically Constrained) Matching and also improve the procedure of color texture mapping. With these combined new approaches we expect a higher level of completion of the object, an improvement of the modeling quality and a shortening of the processing time to generate the 3D model.*

*We streamline our new method of point cloud editing and improve our new technique of view-dependent texture mapping.*

*Finally we show how different forms of high quality visualization techniques can be used on low-cost platforms.*

*The ultimate goal of this activity and investigation is to develop a system that is capable of producing high quality photorealistic 3D models in fully automated mode.*

## 1 Introduction

Between the 9<sup>th</sup> and 15<sup>th</sup> centuries A.D. a succession of 42 kings ruled over one of the most remarkable empires in human history: The Khmer empire of Angkor in Cambodia. What used to be before and after an endless stretch of tropical jungle was turned into 75 square miles of fertile plains, with 72 major monuments, temples, palaces, canals with dikes, moats, and reservoirs. A sophisticated irrigation system, controlling equally abundant waters from monsoon rains and yearly droughts, provided for two to three rice harvests per year, feeding at times up to one million inhabitants. Today it is one of the most spectacular sites listed in the UNESCO World Heritage List (DAGENS, 1995, MALRAUX, 1930, MOUHOT, 1864, MOORE, 1960, PRESTON, MCCURRY, 2000).

While statues and other treasures were shipped off from the site from the very beginning of European interference, extensive excavations and renovation works have been under way

---

<sup>1</sup> Institute of Geodesy & Photogrammetry, ETH-Hoenggerberg, CH-8093 Zurich, Switzerland, {agruen,zhangl,jana}@geod.baug.ethz.ch

only since the early years of the 20<sup>th</sup> century. Renovation and conservation of the laterite, brick and sandstone monuments is extremely difficult under the local conditions of heat, heavy rains, humidity and an aggressive tropical vegetation.

Today, after a decade of forced neglect during the rule of the Khmer Rouge, the precious Angkor monuments receive much help again from various countries. Among those is the JSA project (Japanese government team for Safeguarding Angkor), which aims at the conservation and restoration of the Northern Library of the Bayon temple in the ancient city of Angkor Thom (JSA NEWS, 1999). Bayon was the last great temple built in Angkor and remains one of the most enigmatic. Today Bayon is considered an interesting mixture of both Hindu and Buddhist elements of style. Bayon is situated right in the center of Angkor Thom. It is an extremely complex structure, which is best revealed by aerial photographs (compare Fig. 1). It is said to represent the Mount Meru of an old Hindu legend. It consists of three levels of platforms and two galleries with spectacular and well-preserved basreliefs, showing the life of the ordinary people and stories from the Hindu mythology. A special feature of Bayon are its 54 towers with four large faces each, pointing in all four geographical directions (such adding up to 216 faces in total, not counting the many more on other objects). These faces on the towers and gateways of Angkor Thom represent Lokeshvara, a Bodhisattva from the Mahayana Buddhism, a holy one who stayed at earth to do good work and help people (Fig. 2). Some experts still think that they are stylized portraits of Jayavarman VII, the most prominent of all Khmer kings.



Fig. 1: Aerial image of Bayon, taken from a Helium balloon

While on sabbatical leave at the Asian Institute of Technology (AIT) in Bangkok in spring 1999 the first author was invited to join the Japanese team of geographers and surveyors from the Keio University, Tokyo as photogrammetrist for a balloon photogrammetry mission over Bayon. The main purpose of this mission was to generate a 3D-computer model of the very complex structure of Bayon from small format balloon images (Fig. 1). The results of this work will be published elsewhere. During this one-week mission the author took a number of film-based amateur photographs of one of the many Bodhisattva-faced towers.

This paper reports about the processing of these images and shows the resulting texture mapped 3D model of the tower. In a previous paper (VISNOVCOVA ET AL., 2001) we described our semi-automated approach, which consisted of manual interior orientation, phototriangulation and some manual input into the joint registration of the individual surface models derived from single stereopairs. Since the aim of our recent work was on fully automated processing of the image sequence we had to develop some novel methods for phototriangulation and point cloud editing. We will report on all stages of the processing chain: Interior orientation, phototriangulation, image matching for surface model generation, point cloud editing and texture mapping.

## 2 Data acquisition

The main goal of the Bayon field campaign was the taking of small format-camera balloon images over Bayon for the 3D reconstruction of the complete and utterly complex temple (Fig. 1). During the mission a sequence of terrestrial small format images was taken with a Minolta Dynax 500si SRL camera ( $c = 35$  mm) of one of the Bayon towers on the third platform in the southeast corner of the temple (Fig. 2). The sequence of 16 images, covering the full horizon, was rather meant as a lab exercise in photogrammetry than a serious project aiming at a complete recording of the object.



Fig. 2: The smiling faces of Bayon. One of the Minolta images used for processing

Fig. 3 shows the arrangement of images, as they were used for bundle triangulation around the tower. Since a 360 degrees azimuth coverage was necessary and the light conditions were very extreme, the production of good, evenly illuminated pictures was practically impossible without artificial lighting. Therefore, the images suffer under strong variations of the illuminated and shadow areas. Also, the shadow and light parts vary from image to image, depending on the time of the day the images were taken. This will cause problems with texture mapping from multiple

images. Thus a good deal of our work went into a modification of the standard procedure of texture mapping.

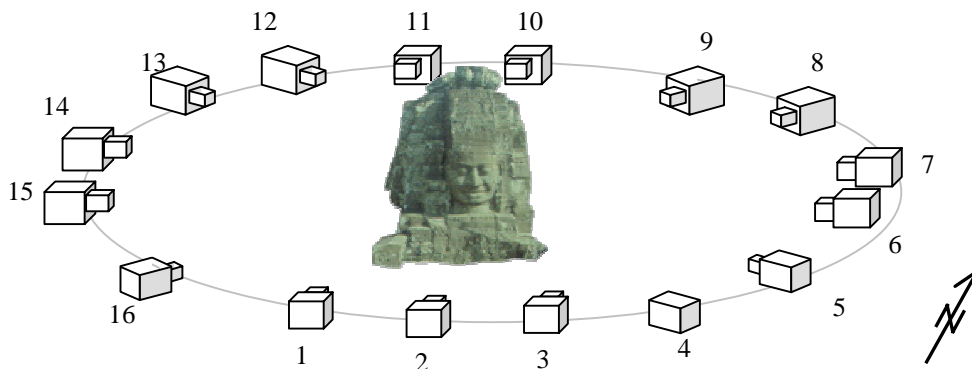


Fig 3. Arrangement of images

## 3 Data processing

The data processing chain consists of the components interior orientation, phototriangulation, and surface reconstruction, point cloud editing and texture mapping. Fig. 4 shows a flow chart of the processing modules.

We will report on these modules in detail, but focus on the novel approaches that we developed. In a first step, the images were scanned on an Agfa Horizon with a resolution of  $21 \mu\text{m}$ .

### 3.1 Interior orientation

Since the amateur images do not include fiducial marks we determine "virtual fiducials" by intersecting the straight lines of two adjacent and mutually perpendicular image edges. This procedure is applied to all images of the sequence and allows us to establish individual image coordinate systems, which are used for the transformation of the pixel coordinates.

Since all pictures have been taken at constant focus, the camera constant is set to the same nominal value for all images. Since the lens distortion is not known at this point it is assumed to be zero. We will later estimate the systematic errors by using self-calibration in bundle triangulation.

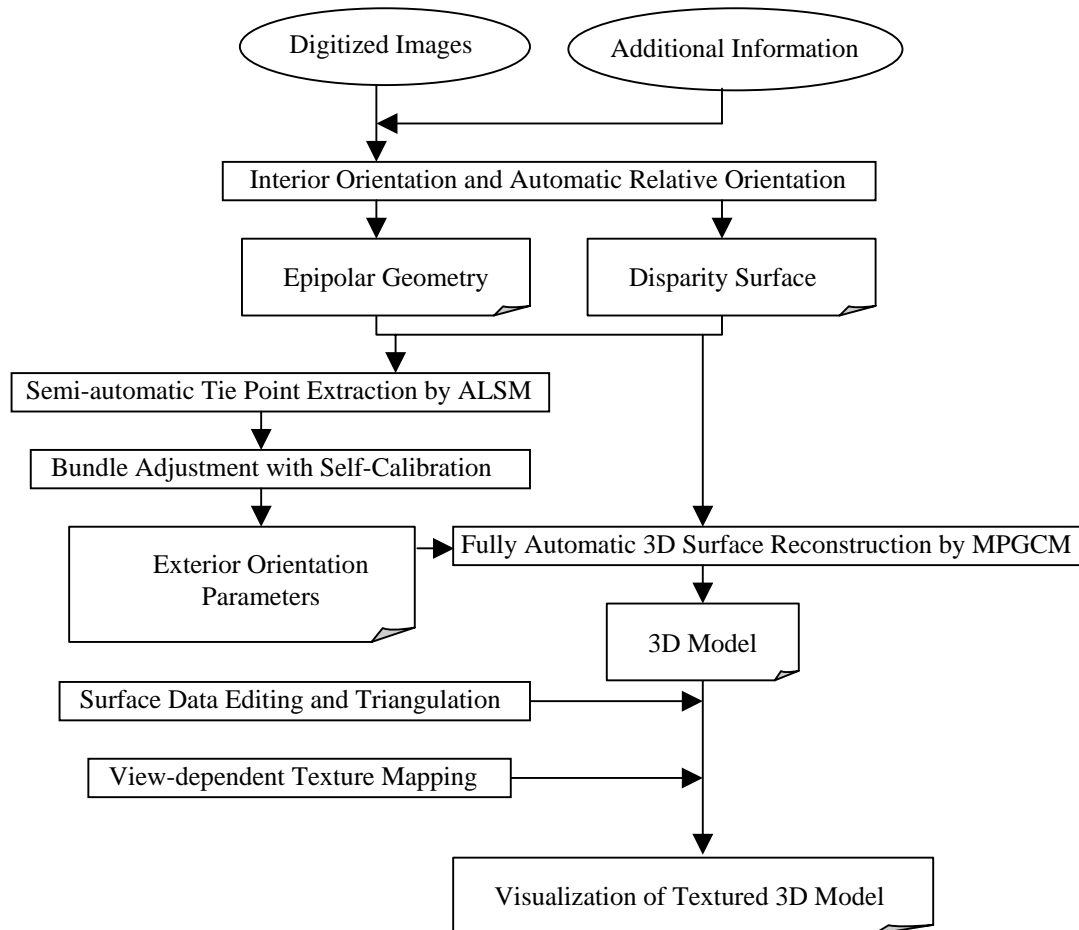


Fig. 4: Processing modules

### 3.2 Phototriangulation

The object coordinate system is established with minimum datum by measuring an object distance on a vertical leveling bar, and defining another point as third depth control point. While the distance provides for scale, the vertical bar also defines the direction of the Y-axis. The orientation of the X- and Z- axes is arbitrary in our kind of problem (Fig. 5).

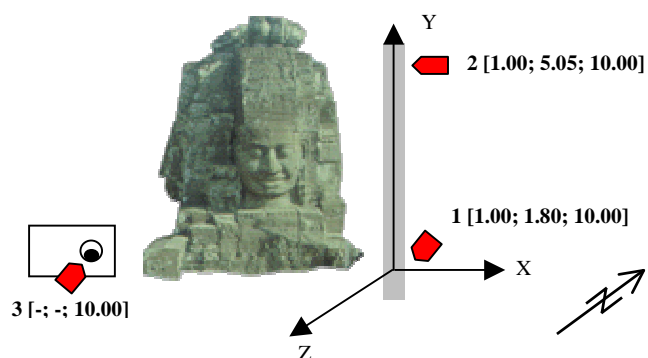


Fig. 5: Definition of the object coordinate system via minimum datum. The coordinates are given in meters

The phototriangulation is set up as a semi-automated procedure. It is

based on manual tie point selection and Least Squares based Geometrically Constrained Multi-Image Matching. Since Least Squares Matching is a nonlinear procedure the success rate of matching depends largely on the reduction of the matching search spaces. This is achieved in two steps, executed prior to tie point matching:

- Automated relative orientation of adjacent images for epipolar geometry recovery
- Determination of disparity surfaces in all image pairs

The first step allows for an epipolar-guided search and the second step reduces the search range along the epipolar lines.

### 3.2.1 Automated relative orientation

Our approach for relative orientation considers the particular nature and orientation of these close-range images and can be characterized by the following detailed steps:

- (a) Feature point extraction by Moravec operator. This is done independently for each image of an adjacent stereopair. A good point distribution is assured by image subdivision in small patches and only keeping the points with the highest interest values in those patches.
- (b) Computation of correlation coefficients for all point combinations using 7x7 image windows, a search window size of 1/16 of the overall image size and a correlation threshold of  $r = 0.75$ .
- (c) Conjugate point determination by relaxation, following the approach of ZHANG, ET AL., 1995,1996, XU, ET AL., 1996. The energy function used in this relaxation procedure is based on continuity and uniqueness constraints. In our approach we apply the "looser-takes-nothing" iterative strategy for the minimization of the energy function. This procedure is essentially a combination of area-based and feature-based matching.
- (d) Derivation of the epipolar geometry by a linear method. Since we have to deal at least in parts with highly convergent images we apply the Direct Relative Transform (DRT) for relative orientation (CHANG, 1986). With the image coordinates  $(x', y')$  and  $(x'', y'')$  of the left and right images respectively and the joint camera constant  $c$  the DRT formulation results in

$$L_1 x'' y' + L_2 y'' y' - L_3 y' c + L_4 x'' c - L_5 c^2 + L_6 x' x'' + L_7 x' y'' - L_8 x' c + c y'' = 0 \quad (1)$$

Where  $L_1, \dots, L_8$  are the eight unknown parameters, requiring at least eight conjugate image points. The orientation parameters are derived from these parameters by algebraic decomposition. Since we have to expect many blunders in the conjugate point pairs we use redundant data and the robust estimation method of minimization of the median of squared residuals (LMedS)  $\min(\text{med}_i r_i^2)$ . Equation (1) is used as observation equation.

The chosen estimator must yield the smallest value for the median of squared residuals computed for the entire set of conjugate points. We are not aware of the existence of a direct solution for the LMedS estimator. Therefore a Monte Carlo technique is used to solve this problem, based on the choice of  $m = 1024$  random sub-samples of  $p = 8$  conjugate point pairs each. For each sub-sample  $j$  we determine the parameter vector  $\vec{L}_j = (\hat{L}_1, \dots, \hat{L}_8)_{j=1, \dots, m}$ . For each  $\vec{L}_j$  we obtain the median of the squared residuals according to

$$M_j = \text{med}_{i=1, \dots, n} r_i^2 = \text{med}_{i=1, \dots, n} (\hat{L}_1 x'' y' + \hat{L}_2 y'' y' - \hat{L}_3 y' c + \hat{L}_4 x'' c - \hat{L}_5 c^2 + \hat{L}_6 x' x'' + \hat{L}_7 x' y'' - \hat{L}_8 x' c + c y'')^2 \quad (2)$$

We retain the solution  $\vec{L}_j$  for which  $M_j$  is minimal. Algorithmic details of this method will be published in a follow-up paper. Since the performance of LMedS is poor in case of presence of Gaussian noise we finally conclude our estimation with a Weighted Least Squares adjustment, using the weighting scheme

$$w_i = \begin{cases} 1 & \text{if } r_i^2 \leq (2.5\hat{\sigma})^2 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

$$\text{with } \hat{\sigma} = 1.48 \left(1 + \frac{5}{n-p}\right) \sqrt{\min(M_j)} \quad (4)$$

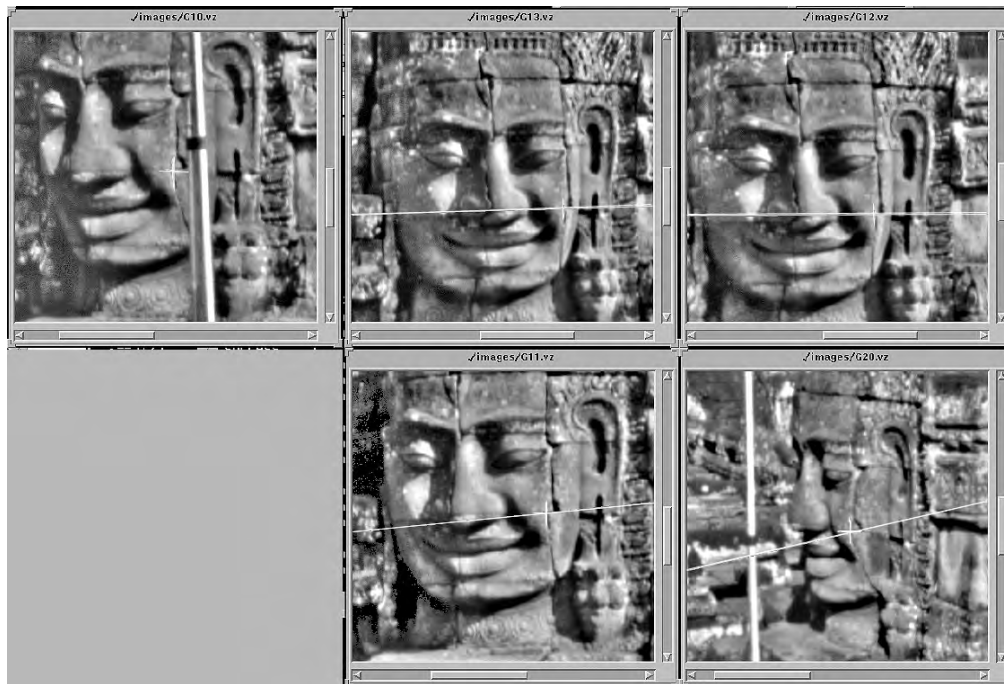
Observations with  $w_i = 0$  are regarded as blunders and as such effectively excluded from the Least Squares solution

$$\min\left(\sum_I w_i r_i^2\right) \quad (5)$$

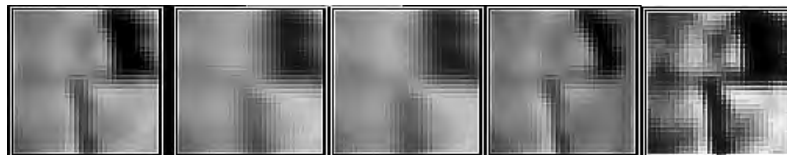
It turns out that this method is very robust to data sets containing blunders. In our experiments, the epipolar geometry can be robustly recovered from the matching results containing 5 - 40% blunders using the LMedS method.

### 3.2.2 Derivation of disparity surfaces

In our application with 16 images, spread over the horizon, we have 16 image pairs, with some convergence angles larger than 45 degrees. In 11 models we get about 230 to 500 conjugate points, which give us a nice disparity surface. Another 4 models contain less than 20 conjugate points because of large convergence angles and as such big differences in local image scales. One model has such an unfavorable geometry (large base component perpendicular to the disparity direction, a so-called "vertical base"), that automated image matching did not work because of big image scale differences. This model had to be measured manually.



(a) The reference patch with marked point      (b) The approximate matches (arrows) and epipolar lines



(c) The final matching result of ALSM

Fig. 6: An example of our tie point measurement procedure

### 3.2.3 Tie point measurement for phototriangulation

The image measurement for triangulation was performed with Adaptive Least Squares Matching (GRUEN, 1985) in a semi-automated mode. The operator selects feature points in one image and ALS matching is done in an unconstrained mode since the current exterior orientation values can only be regarded as approximations. Since ALS matching is nonlinear and has a relatively small convergence radius we need fairly good approximate values. These are obtained by epipolar constrained cross-correlation. The epipolar geometry is taken from the previous relative orientation of the image pairs and also the disparity surfaces are considered as constraining conditions.

This procedure delivers for the complete image arrangement 181 tie points, with (18,63,81,15,4) points connecting (2,3,4,5,6) images, thus providing for sufficient strength in image connection.

Fig. 6 shows an example for tie point measurement. Here the respective approximate matches, the epipolar lines and the final ALS matching results are displayed.

### 3.2.4 Bundle adjustment

Prior to the bundle adjustment, a strip adjustment with 16 models is performed to obtain the approximate values for the exterior orientation elements and the object coordinates of the tie points. This strip adjustment is done in model coordinate space and in a subsequent step the model coordinates are transformed to the object coordinate space by a 7 parameter similarity transformation using the 7 control point coordinates. For bundle adjustment we use our own software SGAP. In a first step, we apply SGAP to obtain the absolute orientation parameters for all images and the 3D object coordinates of all tie points without self-calibration, to guarantee global convergence.

After the establishment of a stable adjusted image block, ten additional parameters (BROWN, 1971) are used to model systematic errors: the camera constant correction, principal point coordinate offsets, five parameters modelling the radial and tangential lens distortion and two parameters for a affine scale factor and shear (BEYER, 1992). In our case, the principal point coordinate offset in x direction, the parameter of the correction of camera constant, the affine scale factor and the first term of the radial lens distortion turned out to be significant.

The SGAP bundle adjustment reported the following values:

<b>Total number of tie points: 181</b>
<b>Total number of observations <math>n = 1250</math></b>
<b>Global internal reliability <math>r/n = 0.52</math></b>
<b>Standard deviation of image coordinates a posteriori: <math>\sigma_0 = 20.3</math> micron</b>
<b>Theoretical precision from 181 tie points (in mm):</b>
$\sigma_x = 5.8, \sigma_y = 3.7, \sigma_z = 8.8$

## 3.3 Surface reconstruction

Our surface reconstruction approach works in fully automated mode according to the following procedure:

- (1) Selection of 5 images to serve as master images.
- (2) Use of Moravec operator in each master image to extract a very dense pattern of feature points. In our procedure, the master image is subdivided into  $7 \times 7$  small image patches and within each patch only one feature point which gains the highest interest value is selected.



- (3) For each feature point we use the improved epipolar geometry, determined in phototriangulation, and the disparity surfaces between adjacent images to get good approximations for the following MPGC (Multi-Photo Geometrically Constrained) matching procedure by standard cross-correlation technique.
- (4) In a final step MPGC is applied for fine matching, including patch reshaping. MPGC exploits a priori known geometric information to constrain the solution and simultaneous use of more than two images (GRUEN, 1985, GRUEN, BALTSAVIAS, 1988, BALTSAVIAS, 1991). This algorithm can use some well-known features such as blunder and occlusion detection, quality control and self-diagnosis. In our procedure, for each feature point in the master image, we combine 6 adjacent images (totally 7 images) for the MPGC matching algorithm with automatic blunder and occlusion detection. With MPGC we can get sub-pixel accuracy matching results and their 3D object coordinates simultaneously.

This procedure results in fairly reliable and very precise matching results. We obtain 5 point clouds with a total of 88140 points, which however are already jointly registered. Therefore, the matching of adjacent surfaces, usually a very errorprone procedure, is not necessary any more.

Although we use the automatic blunder and occlusion detection, there are some blunders left in the final 3D point cloud. We apply the following surface data editing procedure to remove these blunders.

### 3.4 Surface data editing and triangulation

Determining surfaces from a set of 3D points containing outliers is a complex task. Many approaches have been designed to treat this problem, such as 3D deformable surfaces (COHEN ET AL., 1991) and iterative local surface fitting (FUA and SANDER, 1992). The last algorithm fits second order patches around each 3D point and groups points into surfaces. In this iterative process errors are eliminated without smoothing out relevant features. Our procedure is an adapted version of this algorithm without performing resampling and surface clustering. Because all the points should belong to one unique surface, only those outliers are deleted whose derivation from the fitted surface exceeds after 3-5 iterations the predefined threshold. Finally the errors are eliminated while preserving essential surface features (Fig. 7).

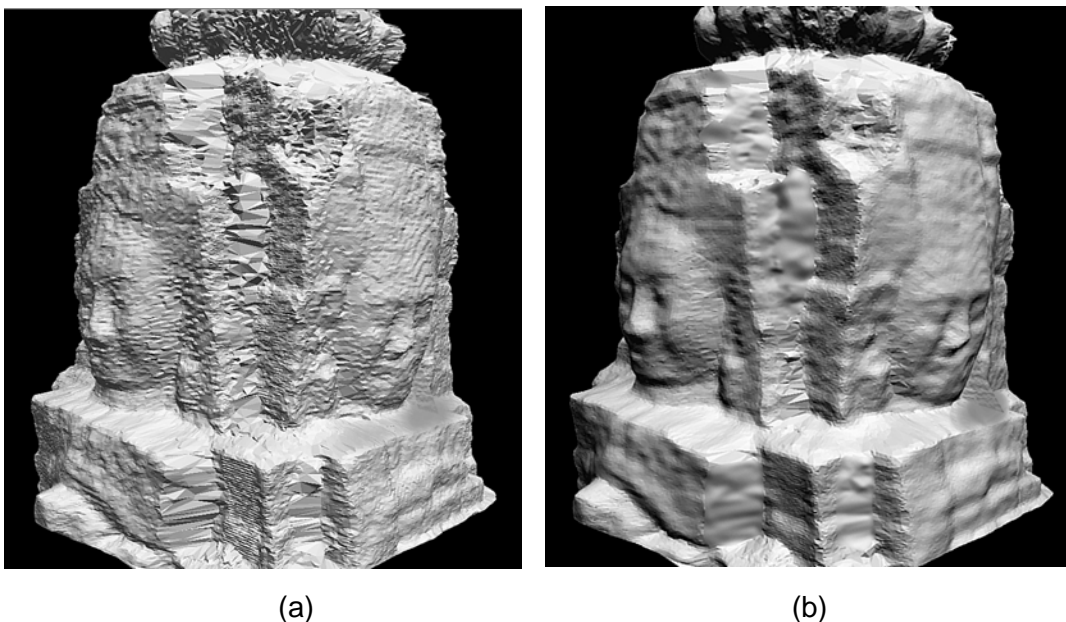


Fig. 7: The shaded triangulated point cloud before (a) and after editing (b).

For the conversion of the point cloud to a triangular surface mesh the 2.5D Delaunay triangulation was applied. Without losing its topology, the 3D surface model of the Bayon Tower was expanded to a plane by transforming the Cartesian coordinate system to a cylinder coordinate frame. In the defined  $\rho\theta z$  cylinder frame  $z$  is the vertical cylinder axis crossing the model center and parallel to the original Y-axis of the Cartesian object coordinate system.  $\rho$  is the Euclidean distance from the surface point to the  $z$ -axis and  $\theta$  is the angle around the  $z$ -axis. The 2.5D Delaunay triangulation was done in the  $\theta z$  plane. The final shaded model of the triangulated mesh is shown in Fig. 7b.

### 3.5 View-dependent texture mapping

With the technique of texture mapping, gray-scale or true color imagery is mapped onto the 3D geometric surface in order to achieve photorealistic virtual models. Knowing the parameters of interior and exterior orientation, to each triangular face of the 3D surface the corresponding image coordinates are calculated. The gray-scale or color RGB values within the projected triangle are then attached to the face.

A common approach of texture mapping is to use one frontal image for a related part of the object. In close-range applications this is often not satisfactory, because not enough image information is available for fully or partially occluded object parts. In the 3D model the texture appears as “stretched” (Fig. 8). Moreover, often-varying lighting conditions during image acquisition do not allow regular light distribution all over the object. This causes sharp transitions between neighbouring object parts, which are texture-mapped from different frontal images. To overcome these problems, a new method of texture mapping was developed – a view-dependent texture mapping.

Our method of view-dependent texture mapping is based on the selection of a combination of optimal image patches for each triangle of a 3D model. According to the best possible geometric and radiometric conditions a combination of image content is calculated from all images where a particular triangle appears. The locations of the image triangles are computed from object faces via collinearity equations. The procedure consists of three steps: pre-processing, selection of a geometrically optimal image and texture weighted averaging.

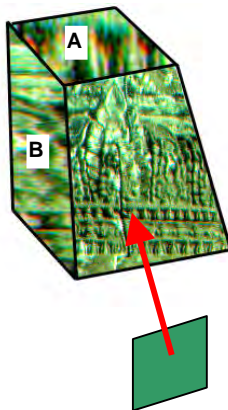


Fig. 8: Texture mapping with one frontal image – sloped faces A and B appear with “stretched” pixels

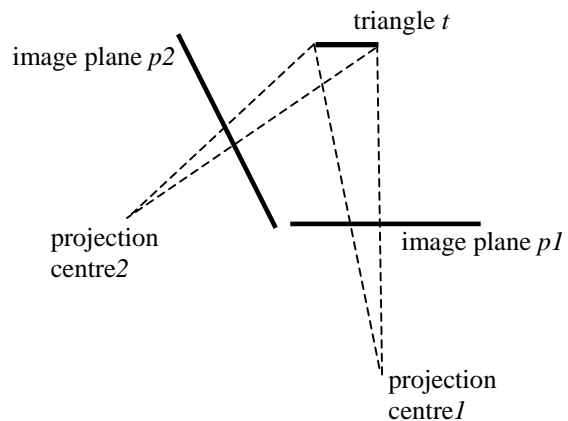


Fig. 9: View-dependent texture mapping: for each object triangle the optimal texture image is selected (image 1 with the bigger area of projected triangle  $t$ )

- (1) Pre-processing. In order to achieve a better local contrast and nearly the same color balance in all images high pass filtering and histogram equalization are used for each RGB channel separately. Similarly to Wallis filtering, the high pass filter enables a strong enhancement of the local contrast by removing low-frequency information in an image. It retains edge details in the specified radius where sharp color transitions occur. We apply high pass filtering with a radius of 50 pixels. Additionally, the equalization is performed

for all three channels in all images. With these procedures we avoid color shifts when merging the separate channels together.

- (2) Selection of a geometrically optimal image (Fig. 9). In all image planes where a particular triangle  $t$  is projected, the area of the triangle is calculated. The image where the triangle  $t$  appears largest contains the most texture information. Thus, it is considered as a geometrically optimal image candidate for texture mapping. However, if we use only one image patch in case of large differences in image radiometry and in case of strong local variability of the surface patch normal, the result will be a checkerboard-type 3D texture map. Therefore, in our procedure the radiometry of adjacent images related to the selected “optimal” image is also considered.
- (3) Texture weighted averaging. We consider all images where a particular triangle  $t$  appears simultaneously. The gray values of these images are averaged according to equation (6)

$$\bar{g}_i = \frac{\sum_{j=1}^n g_{ij} \cdot w_{ij}}{\sum_{j=1}^n w_{ij}}, \quad (6)$$

where  $\bar{g}_i$  .... gray value of the “new” image  $i$   
 $g_{ij}$  .... gray values of “old” images  $j$   
 $n$  .... number of image patches used for texture weighted averaging  
 $w_{ij}$  .... weight factors calculated from the areas of projected triangles

$$w_{ij} = \frac{area_j}{area_{max}} \quad (7)$$

Obviously, the weights are chosen proportional to the area of the image patches, which gives priority to the image patch with the better geometry. Before this weighted averaging can take place the different image patches are transformed by an affine transformation to the geometry of the “optimal” master image. The weighted averaging reduces the effects of radiometric differences in adjacent images.

## 4 Visualization

The final model can be viewed with our own graphics program disp3D in wireframe, shaded or textured mode. Stereo display in form of anaglyphs and polarization is also feasible. Further, the models can be converted to VRML2 for viewing them with standard visualization packages. Some results are depicted in Fig.10.

## 5 Conclusions

We have presented a combination of algorithms that will finally allow us to generate a photorealistic high quality texture-mapped 3D model of a complex object in fully automated mode. Starting with a sequence of amateur images the various processing steps as scanning, interior orientation, relative orientation, tie point measurement, self-calibrating phototriangulation, multi-image matching for surface model generation, point cloud editing, view-dependent texture mapping and visualization are addressed. Novel approaches are specifically used in relative orientation, surface model generation, point cloud editing and texture mapping. The current system does not yet work fully automatically. The selection of tie point image patterns is still done in manual mode. However, we do not consider the automation of this step through interest point selection a particular problem and we will come up with a respective solution in the near future.

With an average coordinate accuracy of 6 mm the triangulation results are well within the usual specifications for such kind of project. It is difficult to give an accuracy figure for the surface model, but it can be expected to be roughly of the same accuracy.

The overall results can be improved by the following measures:

- (a) Use of digital cameras. This saves scanning time and efforts for interior orientation and leads to a faster throughput. In our project such camera was not available on-site.
- (b) Generation of a denser sequence of images. This gives more network strength to triangulation, improves the reliability and precision of matching in relative orientation, tie point measurement and surface model generation and leads to better texture mapping results.
- (c) For image generation choose a better timing and/or artificial lighting. This will result in better texture maps.
- (d) Apply an efficient 3D Delauney triangulator. This will reduce problems in surface modeling (which was not a problem with our test object but could be with others).

Our upcoming work will include some, if not all of these improvements and will hopefully lead to a robust and accurate system to solve such kind of problems within a minimal timespan and with very little operator interference.

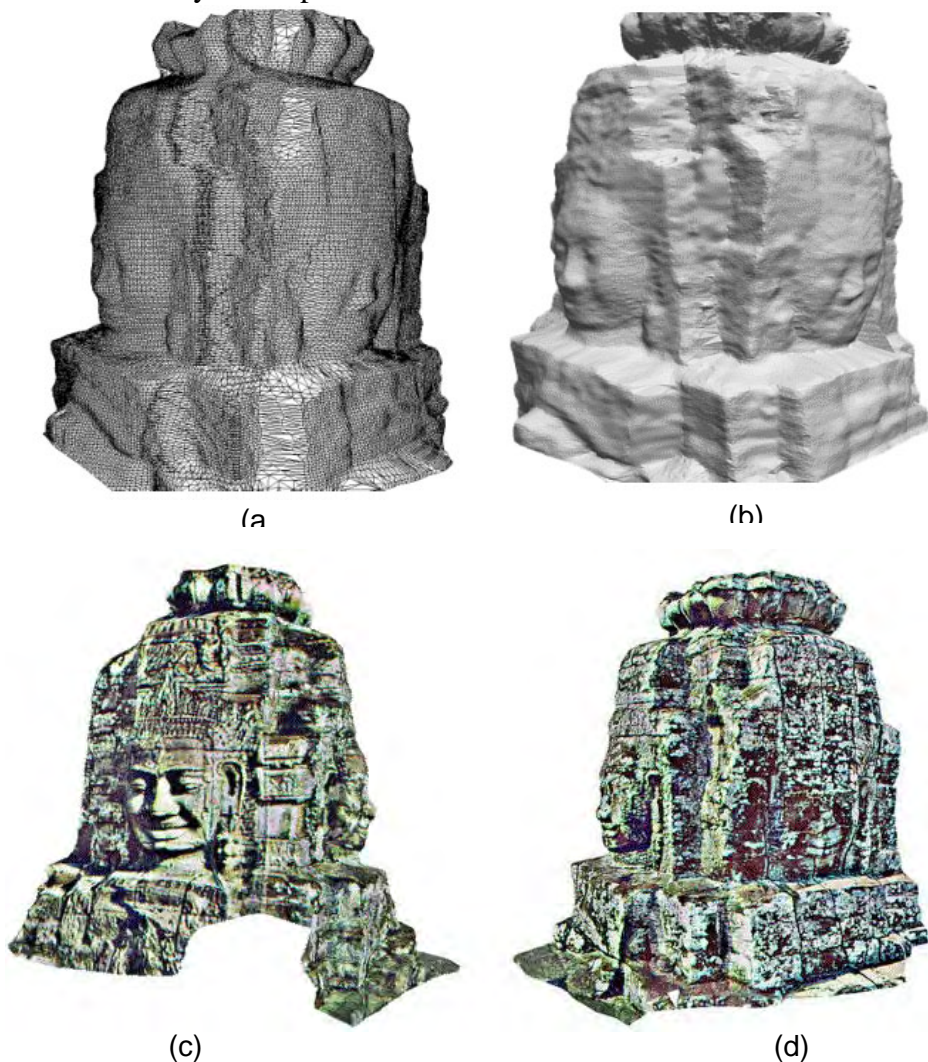


Figure 10: Visualization of the Bayon Tower 3D model: (a) wireframe mode, (b) shaded mode, (c) textured mode of northern view, (d) textured mode of western view. Displays produced by disp3D.

## 6 Acknowledgement.

This is to acknowledge the support given by the JSA (Japanese government team for Safeguarding Angkor) project. Above all we would like to thank Prof. Sachio Kubo, Keio University, Tokyo for giving the first author the opportunity to participate in this campaign.

Also appreciated is the great help that we received in the field from Prof. Kubo's young and ambitious team of surveying, climatology and economy students. Finally, our thanks go to Yoshito Miyatsuka for navigating and controlling the balloon even under the greatest difficulties, such that no harm was done to the precious instrument.

## 7 References

- BALTSAVIAS, E., Multiphoto Geometrically Constrained Matching. Dissertation, IGP, ETH Zürich, Mitteilungen No. 49, Dec. 1991, 221p.
- BEYER, H. A., Geometric and Radiometric Analysis of a CCD-Camera Based Photogrammetric Close-Range System. IGP ETH Zürich, 1992. Mitteilungen Nr. 51, 186p.
- BROWN, D.C., Close-range Camera Calibration. Photogrammetric Engineering, 1971. 37(8), pp. 855 – 866.
- CHANG, B., The Formulae of the Relative Orientation for Non-metric Camera. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 1986, 26(5), pp.14-22
- COHEN, I., COHEN, L., AYACHE, N., Introducing Deformable Surfaces to Segment 3D Images and Infer Differential Structure. Technical Report of INRIA, 1991.
- DAGENS, B., Angkor. Heart of an Asian Empire. Thames & Hudson Ltd., London, 1995, 191 pages.
- FUA, P., SANDER, P., Reconstructing Surfaces from Unstructured 3D Points. Proceedings of the Image Understanding Workshop, San Diego, California, 1991.
- GRUEN, A., Adaptive Least Squares Correlation: A powerful Image Matching Technique. South Africa Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Cartography, 14 (3), 1985, pp 175-187.
- GRUEN, A., BALTSAVIAS, E., Geometrically Constrained Multiphoto Matching. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 54, No. 5, May 1988, pp. 633-641.
- JSA News, JSA Project No 4, Commemorating the Completion of the Conservation and Renovation of the Northern Library of Bayon. JICE, Tokyo, Japan, 1999.
- MALRAUX, A., La voie royale. Editions Grasset & Fasquelle, Paris, 1930.
- MOUHOT, H., Travels in the Central Parts of Indo-China (Siam), Cambodia and Laos. 2 Vols., John Murray, London, 1864.
- MOORE, R., Angkor, Jewel of the Jungle. National Geographic Magazine, 1960, pp. 517-569.
- PRESTON, D., MCCURRY, The Temples of Angkor – Still Under Attack. National Geographic Magazine, August 2000, pp. 84 – 103.
- WHITE, P.T., The Temples of Angkor – Ancient Glory in Stone. National Geographic Magazine, 1982. Vol. 161, No. 5, pp. 552 – 589.

- VISNOVCOVA, J, GRUEN, A., ZHANG, L., Image-based Object Reconstruction and Visualization for Inventory of Cultural Heritage. Proceedings of EVA 2001 Conference – Electronic Imaging and Visual Arts, 2001. Florence, Italy, 26.3.-30.3.2001, pp. 118-122.
- VISNOVCOVA, J, ZHANG, L., GRUEN, A., Generating a 3D Model of a Bayon Tower Using Non-metric Imagery. Proceedings of the International Workshop Recreating the Past-Visualization and Animation of Cultural Heritage. Ayutthaya, Thailand, 26.2.-01.3, 2001, pp. 30 – 39.
- XU, G., ZHANG, Z., Epipolar Geometry in Stereo, Motion and Object Recognition, A Unified Approach, Published by Kluwer Academic Publishers, 1996, ISBN: 0-7923-4199-6. 310p.
- ZHANG, Z., DERICHE, R., FAUGERAS, O., A Robust Technique for Matching Two Uncalibrated Image Through the Recovery of the Unknown Epipolar Geometry, Artificial Intelligence Journal, Vol 78, pp87-119, Oct. 1995.
- ZHANG, Z., Determining the Epipolar Geometry and Its Uncertainty: A Review. Research Report, No. 2927, INRIA Sophia-Antipolis, July, 1996.

# INPHOs aktuelle Entwicklungen für die digitale Photogrammetrie

EBERHARD GÜLCH<sup>1</sup>

*Zusammenfassung: Hier soll ein Überblick über die vielfältigen Einsatzmöglichkeiten neuer Techniken der Bildverarbeitung gegeben werden, wie sie im Rahmen von inpho.grammetry®, INPHOs innovativer Technologie für die digitale Photogrammetrie verwendet werden. So ist die Behandlung von kompletten Bildverbänden nicht mehr allein das vorherrschende Prinzip bei der digitalen Aerotriangulation, sondern stellt nun auch die Basis für die automatische Generierung von Geländemodellen, Orthophotos und Orthophotomosaiken dar. Damit kann ein hoher Grad von Automation ohne ständige Nutzerüberwachung erreicht werden. Bei der automatischen Aerotriangulation und der DGM Generierung stehen die Punktübertragung mit Hilfe von Bildzuordnungsalgorithmen im Vordergrund. Im Bereich der Orthophoto-generierung werden ausgereifte Bildverarbeitungsprozesse für die radiometrische Anpassung und Methoden zur geometrischen Einpassung entlang von automatisch generierten oder manuell vorgegeben Trennlinien eingesetzt. Durch das innovative Multisensorkonzept wird der ständig zunehmenden Zahl neuer Sensoren, ob flugzeug- oder satellitengestützt, Rechnung getragen. Somit können sowohl die klassischen Luftbildaten, aber auch digitale Zeilen- oder Flächenkameras unterstützt werden. In der halbautomatischen Gebäudeerfassung stehen die Einbindung von automatischen Modulen in den Arbeitsfluß und eine optimale Benutzerführung im Vordergrund. Für die Erfassung der geometrischen Information kommen Bildzuordnungsverfahren der verschiedensten Art zum Einsatz. Für Animationszwecke werden die Gebäude mit Hilfe von Texturextraktionsmethoden mit realen Bildern von Dachflächen und Fassaden versehen. Als evolutionärer Schritt in der Photogrammetrie kann die integrale Behandlung der Orthomosaikgenerierung angesehen werden, bei der in einem einzigen Verarbeitungsprozess die Aerotriangulation, DGM Generierung, Orthophotogenerierung und Mosaikerzeugung gelöst werden.*

## 1 Einleitung

Der Markt Photogrammetrie ist ständigen Veränderungen unterworfen. Da das Marktsegment relativ klein ist und zudem von einer kleinen Anzahl Anbietern getragen wird, haben Joint Ventures großen Einfluß auf die Systeme. Seit mehr als 20 Jahren ist die INPHO GmbH Stuttgart ein führender Technologieanbieter für analytische und digitale Photogrammetrie ([www.inpho.de](http://www.inpho.de)). Im Jahr 2000 mußte INPHO auf die veränderten Marktverhältnisse reagieren und hat ein völlig neues Konzept auf dem ISPRS Congress Amsterdam präsentiert. INPHO offeriert nun eine umfassende Produktpalette für photogrammetrische Anwendungen von Datenerfassung zur Orthophotogenerierung und Objekterfassung. Wir wollen uns hier auf einen Überblick über die vielfältigen Einsatzmöglichkeiten neuer Techniken der Bildverarbeitung konzentrieren, wie sie im Rahmen von inpho.grammetry®, INPHOs innovativer Technologie für die digitale Photogrammetrie verwendet werden. Weitere Informationen finden sich in Hakkala & Mayr (2001).

---

<sup>1</sup> Dr.-Ing. Eberhard Gülch, INPHO GmbH, Smaragdweg 1, D-70174 Stuttgart, email: [eberhard.guelch@inpho.de](mailto:eberhard.guelch@inpho.de)

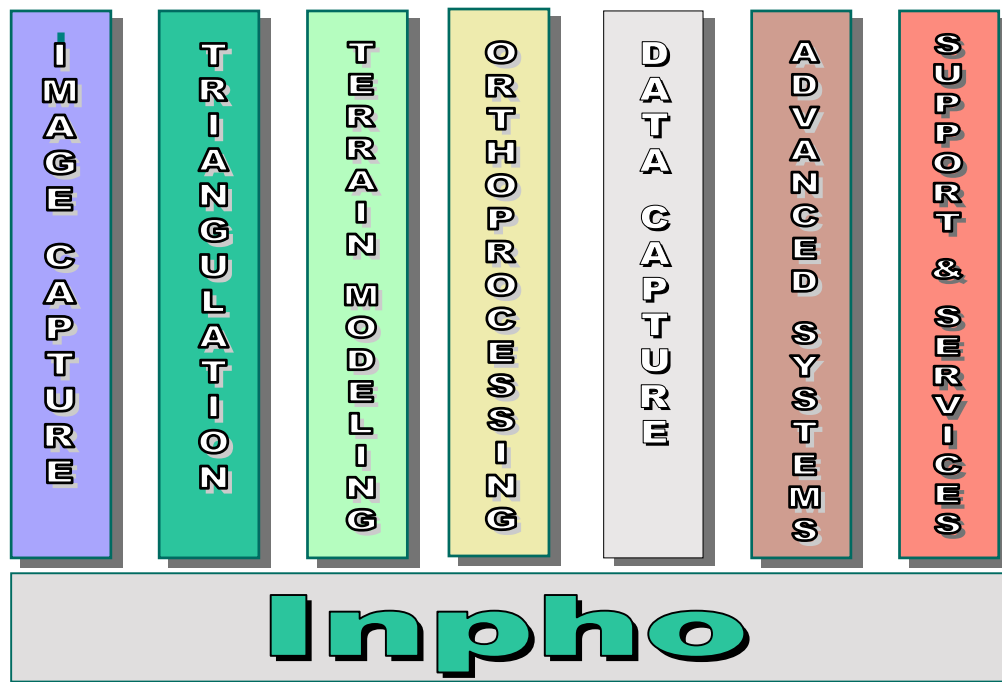


Abbildung 1: Anwendungsgebiete der digitalen Photogrammetrie. Von Bilddatenerfassung zur Orthophotoherstellung, Objekterfassung, neuen Technologien und Dienstleistung.

## 2 Konzept

INPHOs Kernkompetenz liegt auf dem Feld der Triangulierung, Sensorkalibrierung, DGM Modellierung und Objektextraktion. Dazu kommen noch die Felder interaktive Datenerfassung, Orthophotogenerierung und allgemein die Entwicklung innovativer Methoden. INPHO hat sich mit starken, spezialisierten Firmen, verbunden mit dem Ziel komplementäres Wissen zu verbinden, um photogrammetrische Produkte anzubieten. Diese Gruppe wird GeoToolBox Team genannt ([www.geotoolbox.com](http://www.geotoolbox.com)). Dieses Konzept zielt sowohl auf das Marketing als auch den Verkauf, auf den technologischen Fortschritt und auf Kooperation. Jeder Partner konzentriert sich dabei auf seine Stärken, um u.a. auch die Identität zu wahren. Auf horizontaler Ebene arbeiten die Partner daran, einen hochproduktiven Arbeitsfluß zu ermöglichen und durch kombinierte Präsenz am Markt sich zu einer kompletten Produktpalette zu ergänzen. Technisch bedeutet dies, daß INPHOs eigene Produktlinie erweitert und durch neue innovative Technologien die Basis für neue Produktgenerationen zu legen. Beispiele dazu sind *OrthoMaster*, *inBLOCK* oder auch *inJECT*, die im folgenden beschrieben werden. Hierzu hat der Zusammenschluß von INPHO mit der X-Position OY in Espoo, Finnland (jetzt Inpho Technology OY, [www.inphotechnology.com](http://www.inphotechnology.com)) beigetragen. Im Hinblick auf eine größere globale Präsenz wurde Inpho Systems, Inc. (ISI) in Estes Park, Colorado gegründet ([www.inphosystems.com](http://www.inphosystems.com)). Damit wird deutlich, daß INPHOs Konzept den *inpho.grammetry*® Ansatz einzuführen, die Komponenten: Technologie, vollständige Produktpalette und Marktausweitung umfaßt.

Abbildung 1: zeigt die klassischen Anwendungsfelder der Photogrammetrie aus der Sicht eines Systemanbieters, die noch durch das Gebiet Services ergänzt werden, das Training, Ausbildung, Consulting, Pilotprojekte und ähnliches umfaßt. INPHO bietet auf allen diesen Gebieten kompetente und umfassende Produkte und Know-How an. GeoToolBox ist ein



wichtiger Bestandteil dieses Konzeptes.

### **3 Anwendungskomponenten**

Die topologische Unterteilung in verschiedene Anwendungsgebiete ist oben gegeben. Hier soll nun auf die technologischen Fortschritte mit dem Schwerpunkt auf Bildverarbeitungsmethoden eingegangen werden. Zur Vervollständigung werden auch die mehr Hardware orientierten Partnerprodukte auf dem Feld der Datenerfassung oder Objekterfassung mit einbezogen.

#### **3.1 Bilddatenerfassung**

Die Digitale Photogrammetrie und damit verbunden eine große Palette von Automatisierungsmöglichkeiten beruhen auf der Verwendung von digitalen Bildern anstelle von analogem Film. Ein Bildscanner führt diese analog zu digital Wandlung durch. Auch durch das Aufkommen digitaler Luftbildkameras wird Film noch viele Jahre die tragende Rolle spielen, womit das Digitalisieren von Bildern aktuell bleiben wird. Die Firma Vexcel Imaging GmbH, Österreich ([www.vexscan.com](http://www.vexscan.com)) deckt diese Anwendung im GeoToolBox Team ab. Ihr *UltraScan 5000* ist ein Flachbettscanner, der für den grafischen Markt und den photogrammetrischen Markt entworfen wurde. Radiometrisch erfüllt er die hohen Anforderungen der Grafikindustrie, geometrisch die hohen Anforderungen der photogrammetrischen Bildauswertung. Automatischer und manueller Rollfilmeinzug sind erhältlich. Mit einer automatischen Selbstkalibrierung, dem neuartigen Scanverfahren und den zwei Standardauflösungen von 5 $\mu$ m und 29 $\mu$ m können eine Vielzahl verschiedenster Anwendungen bedient werden.

#### **3.2 Triangulation**

Dieses Anwendungsgebiet umfaßt neben der klassischen Aerotriangulation die Kamerakalibrierung, die Georeferenzierung von Satellitenkameras oder auch die geodätische Netzausgleichung. Wir wollen hier zwei Hauptkomponenten hervorheben: die automatische Aerotriangulation und die Blockausgleichung.

##### **3.2.1 Automatische Aerotriangulation und graphische Unterstützung**

Aerotriangulation ist eine der Kernkompetenzen von INPHO. Seit mehr als zwei Jahrzehnten gehören INPHOs *PAT* Programme zu den führenden dieser Art. Dieses Know-how ist mit automatischen Punktverknüpfungsstrategien im *MATCH-AT* Programm gebündelt, dem führenden Produkt für automatische Aerotriangulation. Die neuesten Features umfassen die Behandlung von Inertialen Meßsystemen (IMU), die interaktive Stereomessung, die graphische Unterstützung für die Analyse des Blocks und die Unterteilung großer Blöcke in Sub-Blöcke. Neben der bereits möglichen Nutzung von D/GPS Daten können nun auch IMU Daten von z.B. Applanix oder IGI verwendet werden, um in diesem Fall bessere Näherungswerte für die Orientierungsparameter zu erhalten. Für die Messung von Paßpunkten ist eine Stereomessung vorteilhaft. Diese wurde in Form eines Stereokomparators realisiert, basierend auf OpenGL und ohne weitere Spezialhardware. Die

Messung von Punkten wird dabei durch Bildzuordnungsverfahren unterstützt. Weitere Informationen sind in Sigle & Heuchel (2001) zu finden.

### **3.2.2 Multi-Sensor Blockausgleichung**

In naher Zukunft werden verschiedene Abbildungsgeometrien in digitalen Kameras und Scannern und die kombinierte Verwendung von verschiedenen Sensortypen in der Praxis Einzug halten. INPHO bietet hier ein Multisensorkonzept an, das komplett objektorientiert ausgerichtet ist, um die zukünftige Einbindung neuer digitaler Sensoren zu erleichtern. Dieses Konzept ist die Grundlage von *inBLOCK*, dem neuen Blockausgleichungsprogramm von INPHO. Zur Zeit können Bilddaten klassischer Filmkameras und digitaler Frame-Kameras bearbeitet werden. In naher Zukunft kommt SPOT, aber auch Dreizeilen-Scanner dazu. Für die Blockanalyse wurde eine neuartige graphische Unterstützung in *inBLOCK* eingeführt und neue Techniken für die Bestimmung der Zuverlässigkeit implementiert. Der Nutzer kann für jeden Punkt metrische, statistische und sonstige Analyseergebnisse angezeigt bekommen. Verschiedene Ansichten des Datensatzes unterstützen den Nutzer in der Qualitätskontrolle. Zur Analyse des Netzdesigns ist eine freie Blockausgleichung möglich. Die Ergebnisse können in eine Vielzahl von Anwendungen und Systemen überführt werden.

## **3.3 DGM**

Bereits 1991 hat INPHO Bildzuordnungsmethoden für die Erfassung digitaler Geländemodelle eingeführt. Seit vielen Jahre ist *MATCH-T* das führende Produkt auf diesem Gebiet. Neben der automatischen Messung von mehreren hunderttausend konjugierten Punkten in einem Stereomodell ist die Behandlung der Digitalen Geländemodelle selbst von großer Bedeutung. Seit vielen Jahren bietet INPHO dazu *SCOP* an, das als eines der wenigen Produkte auf dem Markt in der Lage ist, sehr große DGMs mit mehreren hundert Millionen Punkten zu verarbeiten und zu unterhalten. Damit war die Basis geschaffen, um auch die seit einigen Jahren stark zunehmenden Laserscandaten zu verarbeiten.

### **3.3.1 MATCH-T und blockweite DGM Generierung**

*MATCH-T* bietet optional die Möglichkeit einen kompletten Block von Luftbildern automatisch zu verarbeiten. Bildpyramiden, Interestpunkte und Epipolarbildausschnitte werden on-line berechnet. Ist die Blockkonfiguration z.B. aus *MATCH-AT* bekannt, kann das System bei Mehrfachüberdeckungen selbst die optimalen Stereopartner für den Strahlenschnitt bei der Objektpunktmessung bestimmen. Die Mehrfachüberdeckungen werden konsequent in Zwangsbedingungen für eine homogene Oberflächenmessung umgesetzt. Mit dem blockweiten Ansatz wird die Qualität erhöht und es entfallen die komplexen Situationen, die bei benachbarten, aber unabhängig verarbeiteten Stereomodelldaten auftreten können, zudem ist eine unüberwachte Abarbeitung auch für die Produktion interessant. Die automatische DGM Generierung von *MATCH-T* wurde mit den Stereoeditierfunktionalitäten des Stereoplotters *Summit Evolution* von DAT/EM, einem GeoToolBox Partner, vereinigt. Somit sind sowohl eine stereoskopische Erfassung morphologischer Information in der Vorbereitungsphase, als auch eine 3D Editierung in der Qualitätskontrolle möglich.

### 3.3.2 LIDAR

Laserscanning aus Flugzeugen gewinnt zunehmend an Bedeutung für die topographische Oberflächenerfassung. Insbesondere in Waldgebieten wird Laserscanning stark favorisiert. Als wesentliches Merkmal tritt die Behandlung sehr großer Datenmengen in Erscheinung. Die rohen Laserdaten müssen gefiltert werden, um ein DGM abzuleiten. *SCOP* bietet dazu eine robuste Methode an, um insbesondere Vegetationspunkte aus den Daten zu eliminieren.

## 3.4 Orthophoto

Die Gewinnung von Orthophotos nimmt an Bedeutung zu, da Geographische Informationssysteme zunehmend Hintergrundbilder auf Orthophotobasis verwenden. Als Quellen für die Orthophotogenerierung dienen orientierte Luftbilder oder georeferenzierte Satellitenszenen und ein DGM. Bei der Mosaikbildung werden benachbarte oder überlappende Orthobilder in ein nahtloses neues Orthophoto überführt. Hier sind neben geometrischen Operationen vor allem radiometrische Bildverarbeitungsmethoden gefragt.

### 3.4.1 Automatische Generierung von Orthophotos

INPHOs *OrthoMaster* Produkt bietet eine strenge differentielle Orthorektifizierung entweder auf Einzelbilder oder einen Block von Bildern an. In Abbildung 2: wird das Anwendungsfenster in *OrthoMaster* für ein Korridor-Projekt gezeigt. Die Auswahl der Bildbereiche in einem Block erfolgt entweder manuell oder vollautomatisch, wie hier gezeigt, nach Vorgabe des Überlappungsbereichs bei benachbarten Orthobildern. Alle Orthophotos werden nach Akzeptanz aller Einstellungen automatisch im Batchbetrieb berechnet. *OrthoMaster* basiert auf der Multi-Sensor Technologie. Speziell für die Orthorektifizierung einzelner Satellitenbilder bietet INPHO *OrthoWarpER* an, das Satellitenszenen, wie z.B. von SPOT, LANDSAT, IRS oder JERS verarbeitet und Werkzeuge für die interaktive Georeferenzierung bietet. Ein DGM kann genutzt werden, ist aber nicht Voraussetzung. *OrthoWarpER* ist ein Add-On Werkzeug für ER-Mapper von ERM.

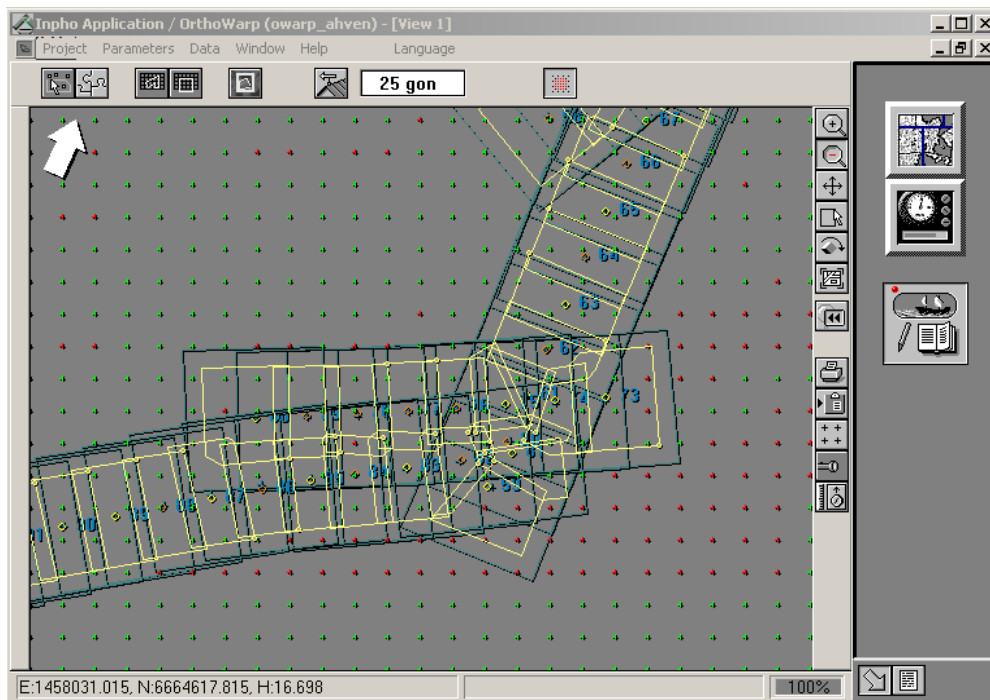


Abbildung 2: *OrthoMaster* – Automatische Auswahl von Bildbereichen.

### 3.4.2 Automatische Orthomosaikerstellung

Bei der Mosaikbildung müssen lokale und globale radiometrische Unterschiede entfernt und entlang einer idealen Schnittlinie eine geometrische Anpassung erfolgen. Der amerikanische GeoToolBox Partner Stellacore entwickelt und unterhält gemeinsam mit INPHO das Programm *OrthoVista* ([www.orthovista.com](http://www.orthovista.com)). *OrthoVista* verarbeitet einzelne Orthobilder zu einem Orthomosaik mit einem sehr hohen Automationsgrad. So kann neuerdings *OrthoVista* auch über Commandfiles gesteuert und somit noch besser in einen existierenden Arbeitsfluß eingebunden werden. Neben der Verarbeitung von mehrkanaligen Bildern (z.B. 5 Kanälen eines LANDSAT Bildes) ist nun auch ein interaktiver Schnittstellen Editor verfügbar. Da *OrthoMaster* bereits Orthomosaik liefern kann, wird *OrthoVista* benutzt, um abschließend eine vollautomatische radiometrische Anpassung und die geometrische Mosaikbildung über den gesamten Bildverband durchzuführen. Die dafür entwickelten Methoden, wie z.B. die radiometrische Anpassung wie sie in Abbildung 3: gezeigt ist, bieten eine bisher unerreichte Bildqualität bei minimaler erforderlicher Interaktion.



Abbildung 3: *Orthovista* - a) Einzelne Orthophotos. b) Radiometrisch korrigiertes Mosaik.

### 3.5 Objektdatenerfassung

Die Objekt- oder Vektordatenerfassung ist eines der Hauptanwendungsgebiete der Photogrammetrie. Bis vor wenigen Jahren war dies eine rein manuelle Arbeit für einen Stereooperateur. Für diese klassische Erfassung bietet INPHO den *Summit Evolution* von DAT/EM an. In diesem Beitrag ist der Schwerpunkt jedoch auf die halb-automatische Objekterfassung gerichtet, die nach mehreren Jahren der Entwicklung auf dem Weg in die Praxis ist. Mit *inJECT* bietet INPHO ein halbautomatisches Erfassungssystem an, das auf die Gebäudeextraktion von 3D volumetrischen Modellen zugeschnitten ist. Hierbei stehen die Einbindung von automatischen Modulen in den Arbeitsfluß und eine optimale Benutzerführung im Vordergrund. Für die Erfassung der geometrischen Information kommen Bildzuordnungsverfahren der verschiedensten Art zum Einsatz. Für Animationszwecke werden die Gebäude mit Hilfe von Texturextraktionsmethoden mit realen Bildern von Dachflächen und Fassaden versehen.

Ein Satz von Standardhaustypen wird zur Erfassung bereitgestellt, die in monoskopischen, sich überlappenden Bildern erfolgt. Die Primitive sind größtenteils parametrisiert, d.h. frei skalierbar. Mit der Booleschen Kombination von Primitiven können komplexere Gebäude modelliert werden, wie es in Abbildung 4:a gezeigt ist. Das Ergebnis der Operation „union“ für die zwei Primitive ist in der Abbildung 4:b zu sehen, bei der die Dachflächen mit automatisch extrahierter Textur aus den Luftbildern versehen sind. Dazu können noch Vererbungs- und Kopierfunktionalität benutzt werden, um z.B. bereits erfaßte Gebäude bzw. Gebäudekomplexe zu kopieren, und damit ähnliche Gebäude in der Nachbarschaft mit deutlich weniger Aufwand zu erfassen. Die Ausgabe der Objekte erfolgt in XML, DXF oder VRML. Hauptanwendungsgebiete in den bisherigen Projekten waren Bildmaßstäbe von 1:8000 bis 1:18000 bei Pixelgrößen von 10-25 µm. *inJECT* ist in einem objektorientierten Ansatz implementiert und offen für die Einbindung von weiteren Automationswerkzeugen. Weitere Details sind in Gülch (2001) zu finden.

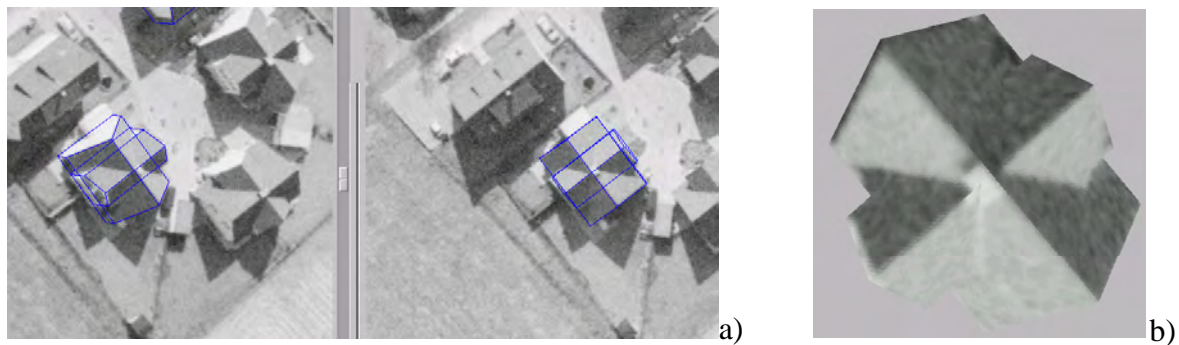


Abbildung 4: *inJECT*. a) Ein Gebäude wurde mit zwei Satteldachprimitiven und der logischen Operation „union“ erfaßt. b) 3D Visualisierung des Gebäudekomplexes mit automatisch extrahierter Textur aus den Luftbildern.

### 3.6 Neue Systeme

Als evolutionärer Schritt in der Photogrammetrie, kann die integrale Behandlung der Orthomosaikgenerierung angesehen werden, bei der in einem einzigen Verarbeitungsprozess, mit einer Kleinsten-Quadrate-Ausgleichung, die Aerotriangulation, die DGM Generierung, die Orthophotogenerierung und die Mosaikerzeugung gelöst werden. Dieses Blackbox-System bietet den derzeit höchstmöglichen Automationsgrad. Der Ansatz ist in INPHOs

*COBRA* System realisiert, das in einer parallelen Umgebung mit LINUX als Betriebssystem arbeitet, und das sich zur Zeit in einer intensiven Optimierungs- und Testphase befindet. Im Prinzip werden für *COBRA* die digitalen Bilder, GPS Daten der Projektionszentren, und einige interaktiv gemessene Paßpunkte bereitgestellt und das Ergebnis ist ein Orthomosaik. Als ein Nebenprodukt kann das erzeugte DOM getrennt abgespeichert werden. Die Mosaikbildung beinhaltet ein Reflektionsmodell, das die Qualität des Mosaiks verbessert, da bei Kenntnis der Flugrichtung, der Sonneinstrahlungswinkel lokal mit berücksichtigt werden kann. Zur Zeit arbeitet *COBRA* nur auf kleinformatischen Bildern, wie sie im folgenden an einem Testbeispiel gezeigt werden. Ein Block von 88 kleinformatischen 2K x 3K Farbbildern einer unkalibrierten Kodak DCS460 CIR Kamera mit 28mm Brennweite, wurden in einer Parallelumgebung mit 4 CPUs in 4 Stunden berechnet, wobei eine Selbstkalibrierung der Kamera inbegriffen war. Insgesamt mußten ca.  $10^8$  Unbekannte bestimmt werden. Auch dieses Programm benutzt das Multi-Sensor Konzept, um auch andere optische Sensoren oder auch Laserscanning Daten zu verarbeiten. In Abbildung 5:a ist eine farbkodierte Ansicht des Digitalen Oberflächenmodells (DOM) gezeigt. Abbildung 5:b zeigt das farbangepaßte Orthomosaik und Abbildung 5:c eine 3D Ansicht des DOM mit dem überlagerten Orthophoto. Weitere Informationen zu *COBRA* sind in Holm (2001a,b) zu finden.

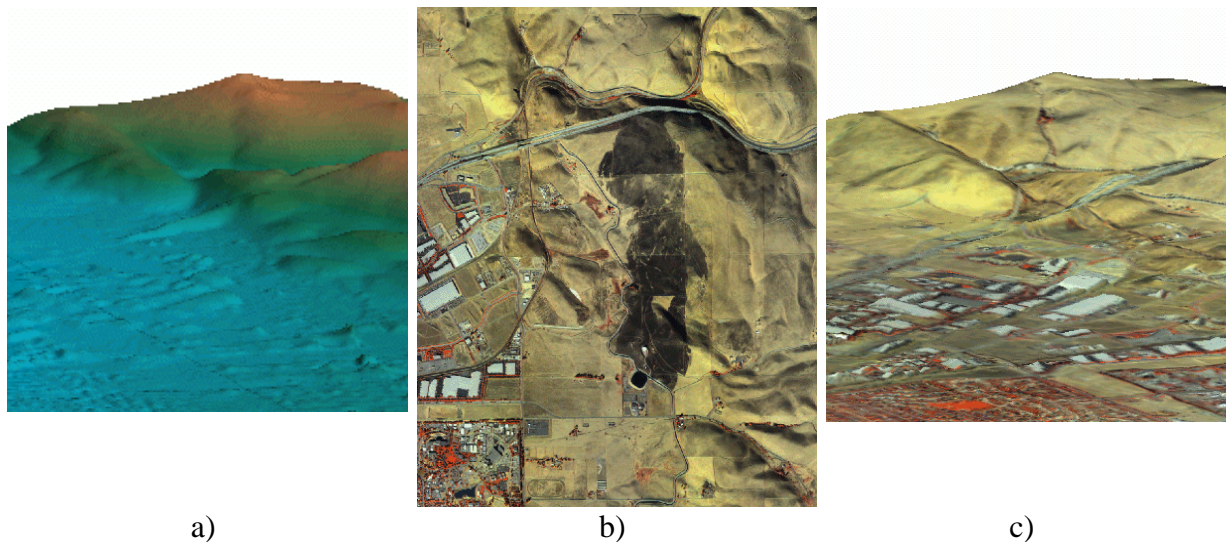


Abbildung 5: Ergebnisse mit *COBRA*. a) Ansicht des farbkodierten DOM, b) nahtloses, farbangepaßtes Orthomosaik. C) 3D Ansicht von DOM und Orthomosaik.

## 4 Schlußbemerkungen

Das Partner Team GeoToolBox hat für bessere Präsenz am Markt und für neue Produktentwicklungen und Produktverbesserungen gesorgt. Die größten Herausforderungen für Neuentwicklungen liegen aus unserer Sicht im Multi-Sensor Konzept, in der weiteren Automation der Objektextraktion und der integrierten, vollautomatischen globalen Rekonstruktion zur Orthobildberechnung. Das Multi-Sensor Konzept als integraler Bestandteil der Softwareprodukte wird die Anwendung der Photogrammetrie auf neue abbildende Sensoren erweitern und verstärkt auch neue Märkte wie Forstwissenschaft, Landwirtschaft, Versicherungswesen etc. ansprechen. Die Möglichkeiten zum weiteren substantiellen Fortschritt in der Photogrammetrie sind vielversprechend, und INPHO versucht mit innovativen Lösungen für die Praxis dazu beizutragen.

## 5 Literatur

- Gülch, E. (2001). New features in semi-automatic building extraction. In: Proceedings ASPRS Conference, St. Louis, USA, April.
- Hakkala, J. & Mayr, W. (2001). INPHO.GRAMMETRY – Advanced Softcopy Technology. In: Proceedings ASPRS Conference, St. Louis, USA, April.
- Holm, M. (2001a). Automatic creation of ortho-mosaics using modular small format digital camera data. In: Proceedings ASPRS Conference, St. Louis, USA, April.
- Holm, M. (2001b). An integrated approach for orthoimage production. Accepted for publication in Proceedings 48<sup>th</sup> Photogrammetric Week, Stuttgart, Germany, September.
- Sigle, M. & Heuchel T. (2001). MATCH-AT: Recent Developments and Performance. Accepted for publication in Proceedings 48<sup>th</sup> Photogrammetric Week, Stuttgart, Germany, September.

# Erfassung und Visualisierung von Gebäuden und Städten auf Basis photogrammetrischer Auswertungen mit dem Programmsystem Phaust<sup>®</sup>

THOMAS HAU<sup>1</sup>

*Zusammenfassung: Die Luftbildphotogrammetrie erlebt seit einigen Jahren eine Neuorientierung, sowohl das Aufgabengebiet betreffend, als auch die sich daraus ergebenden Auswertetechniken. Zu den traditionellen Aufgaben sind Messungen komplexer Geometrien, wie z. B. Stadtmodelle, hinzugekommen, die eine Erweiterung der Auswertetechnik für effiziente Erfassungen dieser Strukturen erfordern.*

*Diese Aufgabenstellungen lassen sich insbesondere durch digitale Auswertetechniken optimieren. Das Programmsystem Phaust<sup>®</sup> wurde daher durch die Komponenten Phaust<sup>®</sup>-StereoModeler, eine digitale photogrammetrische Stereoauswertestation, und Phaust<sup>®</sup>-TextureModeler, ein Tool zur Aufbereitung von Texturen für Visualisierungen, erweitert.*

*Der Beitrag stellt die Konzeption und die Leistungsmerkmale des Programmsystems vor und zeigt an einigen Beispielen die Möglichkeiten zur wirtschaftlichen Rekonstruktion und Visualisierung urbaner Szenen auf, die als Basisinformationen in Geoinformationssysteme integriert werden können.*

## 1. Motivation

Die Hauptaufgabe photogrammetrischer Arbeiten besteht in der dreidimensionalen Objektvermessung und seit einigen Jahren auch in der Visualisierung realer Objekte auf Basis bildhafter Aufzeichnungen. Daher erlebt die Stereophotogrammetrie eine Neuorientierung, sowohl in Bezug auf die Aufgabengebiete, als auch in Bezug auf die sich daraus ergebenden Auswertetechniken. Hinzu kommt der Aufbau von Informationssystemen und Datenbanken, die in den Geowissenschaften neben 2D-Daten zunehmend auch 3D-Daten führen. Neben den reinen Geometriedaten spielt auch detailliertes Wissen über die 3D-Objekte eine Rolle. Eine Möglichkeit dieses Wissen zu repräsentieren sind Attributierungen oder differenzierte Farbgebungen bei thematischen, kartographischen Darstellungen. Eine andere, visuelle Wissensrepräsentation bieten Texturierungen, die sämtliche im Bild speicherbaren Informationen enthalten. Zwar lassen sich diese Informationen in einer Datenbank nicht selektieren, eine Visualisierung gibt jedoch in vielen Anwendungsbereichen aufschlussreich und detailliert Auskunft über die Objekte.

Im Zuge dieser Entwicklungen entstanden im klassischen Geomarkt neue Produkte, die z.B. für das Marketing im Bereich der Industrie oder für Verwaltungen interessant sind. Dies können Gebäudemodelle oder aber auch Modelle ganzer Städte sein. Neben der reinen Geometrieerfassung sind auch Texturerfassungen gefragt. Diese Aufgabenstellungen erfordern eine Erweiterung und Spezialisierung der Auswertetechnik und –software für effiziente Erfassungsprozesse. Das Programmsystem Phaust (Woytowicz, 1993) ist für diese Aufgabenstellungen um die Komponenten Phaust<sup>®</sup>-StereoModeler und Phaust<sup>®</sup>-TextureModeler erweitert worden.

Der Phaust<sup>®</sup>-StereoModeler ist eine digitale Stereoauswertestation, die zur optimierten Erfassung komplexer 3D-Szenen auf PC-Basis konzipiert wurde. So lassen sich z. B. beliebige Gebäudegeometrien zur Erstellung von Stadtmodellen rekonstruieren.

---

<sup>1</sup> Dr.-Ing. Thomas Hau, Firma INVERS, Industrievermessung und Systeme, Kruppstraße 82-100, 45145 Essen, e-mail: [hau@invers-essen.de](mailto:hau@invers-essen.de), Tel.: 0201/8127412.



Die Station bietet über die eigentliche Geometrieerfassung hinaus auch Möglichkeiten zur Texturierung und Visualisierung der erfassten Geometrie. Auf die in den Luftbildern sichtbaren Oberflächen werden die Bildinformationen der Luftbilder aufprojiziert. Den in den Luftbildern nicht sichtbaren Flächen, insbesondere vertikale Fassaden von Gebäuden, werden in einem gesonderten Modus terrestrische Aufnahmen zugeordnet. Die Texturen können in beliebigen Auflösungen (Level Of Detail) berechnet und auf die Objektebenen entzerrt werden.

Zur Aufbereitung der Texturen für die Visualisierung wurden Funktionalitäten entwickelt, die im Programmmodul Phaust<sup>®</sup>-TextureModeler zusammengefasst sind. Es werden sowohl geometrische als auch radiometrische Korrekturfunktionen bereitgestellt.

Im vorliegenden Beitrag werden in Kapitel 2 Konzeption und Aufbau des Phaust<sup>®</sup>-StereoModelers und die Funktionalitäten des Phaust<sup>®</sup>-TextureModelers vorgestellt. Ergebnisse einiger Visualisierungen zeigen in Kapitel 3 die Möglichkeiten der Station auf. Die Zusammenfassung und ein Ausblick auf weitere Entwicklungen in Kapitel 4 schließen den Beitrag ab.

## **2. Konzeption und Aufbau des Phaust<sup>®</sup>-StereoModelers**

Stereoskopische Auswertungen konnten in der Vergangenheit im wesentlichen nur mit Hilfe aufwendiger, analoger und analytischer Auswertesysteme durchgeführt werden, die für einfache Erfassungen zu aufwendig und zu teuer sind. Durch die Entwicklung neuer Rechnertechnologien konnten in der Folgezeit digitale Systeme aufgebaut werden, die zunächst jedoch von aufwendiger Spezialhardware geprägt waren. Die Entwicklung kommerzieller, leistungsstarker Hardware ermöglicht heute nun die Entwicklung kostengünstiger, PC-basierter Systeme, die auch für kleine Büros erschwinglich sind.

Die digitalen Techniken der PC-basierten Systeme bieten neben der Möglichkeit zur Automation bei der Rekonstruktion und Erfassung auch die Möglichkeit die erfassten Daten direkt weiter zu verarbeiten. So können neben der Aufnahme kontinuierlicher Objektstrukturen, Freiformgeometrien und Polyederstrukturen auch Texturierungen für aufwendige und realitätsnahe Visualisierungen durchgeführt werden. Diese Möglichkeiten sind mit dem Phaust<sup>®</sup>-StereoModeler gegeben.

Der Phaust<sup>®</sup>-StereoModeler arbeitet auf Basis des Betriebssystems Windows NT und ist daher auf jedem handelsüblichen PC einsetzbar. Lediglich eine stereofähige Grafikkarte, die jedoch keinen hohen Kostenfaktor mehr darstellt, und eine 3-Tasten-Scroll-Maus sind zur Stereobetrachtung und -auswertung erforderlich. Zur Bearbeitung steht eine Windowsoberfläche zur Verfügung, die im Aufbau durch folgende Elemente charakterisiert ist:

- ein Stereofenster für die Messung,
- ein Übersichtsfenster zur Navigation und Wahl des Messausschnitts und
- ein Messdialog, der die aktuellen Messungen beschreibt.

Aufgrund der großen Vielfalt unterschiedlicher Aufgabenstellungen sind in der Stereoauswertestation eine Vielzahl unterschiedlicher, teilweise auch automatisierter Messoperatoren implementiert. Die Operatoren sind strukturiert

- zur Erfassung einfacher Objektgeometrien,
- zur Erfassung und Modellierung komplexer Objektgeometrien und Polyeder und
- zur Texturierung und Visualisierung der erfassten Objektgeometrien.

## 2.1. Erfassung einfacher Objektgeometrien

Das klassische Feld der Luftbildauswertung erfordert im wesentlichen einfache Messoperatoren. Für diese Arbeiten ist ein Messoperatordialog, wie er in Abb. 1 dargestellt ist, vorhanden. Die Messoperationen bieten die in Tab. 1 aufgeführten Möglichkeiten.

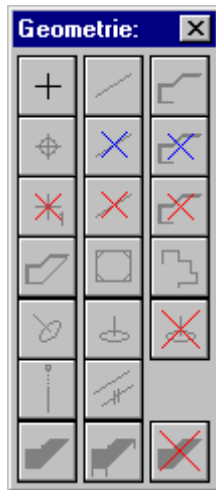


Abb. 1: Dialog für einfache Geometriemessungen

Punkterfassung	Linienfassung	Polygonfassung
Punktwahl	Linie austragen	Polygon austragen
Punkt löschen	Linie löschen	Polygon löschen
Polygon schließen	rechtwinkliges Viereck erfassen	Rechtwinkel-polygon erfassen
räumlichen Kreis erfassen	horizontierten Kreis erfassen	Kreis löschen
Punkt loten	Messlinie ausrichten	
Polygon homogenisieren	Polygon horizontieren	Homogenisierungs-parameter löschen

Tab. 1: Messfunktionalitäten für einfache Geometriemessungen

Neben einfachen Geometriedaten wie Punkten, Linien und Polygonen stehen Konstruktionsoperatoren zur Verfügung, die die Einhaltung von Rechtwinkligkeiten, Parallelität und Ebenheit bei der Erfassung ermöglichen. Diese Ausgleichs- und Homogenisierungsfunktionalitäten unterstützen den Auswerteprozess, so dass eine CAD-Nachbearbeitung der Geometrie nur in seltenen Fällen erforderlich ist.

## 2.2. Erfassung und Modellierung komplexer Objektgeometrien und Polyederstrukturen

In vielen Bereichen der klassischen Aufgabengebiete und modernen Tätigkeitsfelder sind die einfachen Messoperatoren nicht ausreichend, da komplexe Objektmodellierungen gefordert sind. So stellt z. B. der Telekommunikationsbereich ein Anwendungsfeld dar, bei dem ganze Städte dreidimensional erfasst werden müssen (Laing und Ruff 1998). Diese Aufgabe lässt sich ausschließlich mit den in Tabelle 1 beschriebenen Operatoren nicht effizient bewerkstelligen. Die Folge wären aufwendige CAD-Nachbearbeitungen, z. B. zur Modellierung einzelner Gebäude auf Basis der einfachen Geometriemessungen, die zu zeitaufwendig und somit ökonomisch nicht vertretbar sind. Die Auswertestation Phaust®-StereoModeler bietet daher einige semiautomatische Operatoren an. Der Dialog für die zur Verfügung stehenden Erfassungsmöglichkeiten ist in Abbildung 2, die sich dahinter verbergenden Operatoren in Tabelle 2 dargestellt. Es wird unterschieden zwischen der Erfassung

- auf Basis vorhandener Grundrissgeometrien,
- auf Basis eines DHM's oder
- einer Neuerfassung.



Abb. 2: Dialog für komplexe Geometriemessungen

Polyedererfassung durch Extrusion	Polyedererfassung durch Verschneidung mit DHM	Polyedererfassung durch Verschneidung mit Ebene
Giebdacherfassung	Walmdacherfassung	Pultdacherfassung
Polygonanpassung	Polyeder austragen	Polyeder löschen
Zylindererfassung	Zylinder löschen	

Tab. 2: Messfunktionalitäten für komplexe Geometriemessungen

### Erfassung von Volumenelementen auf Basis von Bestandsdaten

In vielen Kommunen, aber auch bei Betrieben der Großindustrie liegen 2D-Bestandsdaten vor (z. B. ALK-Daten), die die vorhandene Bausubstanz repräsentieren. Der Aufbau von 3D-Geodaten soll dabei mit den vorhandenen Daten konsistent bleiben, so dass durch die Erfassung kein neuer Datenbestand aufgebaut wird, der mit den vorhandenen nicht in Einklang steht. Der Phaust<sup>®</sup>-StereoModeler ermöglicht daher die Erfassung von Volumenelementen auf Basis von Bestandsdaten. Diese Daten werden über eine DXF-Schnittstelle in den Phaust<sup>®</sup>-StereoModeler importiert und dort zur 3D-Rekonstruktion genutzt. Liegen die Bestandsdaten nur als 2D-Daten vor, so kann die Höhenkomponente der Polygonpunkte mittels eines DHM's durch Interpolation bestimmt werden.

Die Messoperatoren basieren nun auf einem Grundpolygon, auf dem das Volumenelement aufgebaut wird. Zur Konstruktion eines Polyeders (etwa ein Gebäude mit einem Flachdach) wird zunächst das Bestandspolygon angewählt und aktiviert (Abb. 3a). Durch Messung mindestens eines Punktes der Oberkante des Körpers (Abb. 3b) wird ein Polyedermodell aufgebaut (Abb. 3c). Bei Messung weiterer Kantenpunkte, die nicht mit Eckpunkten des Polyeders identisch sein müssen, werden die Höhenwerte gemittelt.

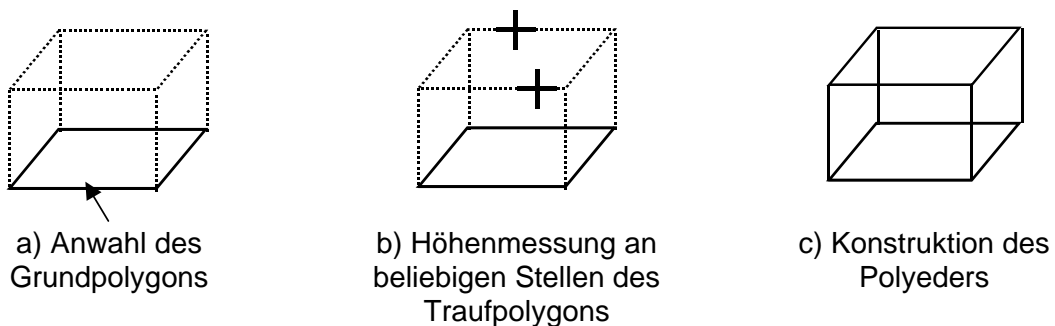


Abb. 3: Konstruktion eines Polyeders

Auch die übrigen Volumenelemente lassen sich durch ähnliche Vorgehensweisen erfassen. Die Dachstrukturen z. B. werden basierend auf den Traufkantenpolygonen erfasst.

Als sehr vorteilhaft erweist sich diese Vorgehensweise nicht nur wegen des hohen Automationsgrades. Auch die Tatsache, ein Polyeder bei Vorhandensein von Bestandsdaten ohne Messung der Eckpunkte des Polyeders modellieren zu können, ermöglicht z. B. trotz Verdeckungen in der Stereobetrachtung oder trotz schlechten Kontrasts in den Aufnahmen die Rekonstruktion der vollständigen Geometrie.

### **Erfassung von Volumenelementen auf Basis eines DHM's**

Liegen für eine 3D-Erfassung keine Bestandsdaten vor, etwa im Falle einer Neuerfassung oder Fortführung eines Datenbestandes, so können die Gebäudevolumen auch basierend auf einem gemessenen Polygon, das z. B. die Gebäudeoberkante definiert, von oben nach unten gemessen werden. Das heißt, die Volumenelemente können auf Basis eines gemessenen Traufpolygons und durch Extrusion des Polygons zur Geländeoberfläche hin aufgebaut werden. Die Bodenpunkte werden durch Interpolation auf Basis eines DHM's ermittelt. Somit wird die Gebäudestruktur klaffungsfrei mit der Geländeoberfläche verschnitten. Die Grundpunkte der Box müssen im Bildmaterial nicht sichtbar sein.

### **Erfassung von Volumenelementen ohne Ausgangsdaten**

Liegen keine Bestandsdaten und auch kein DHM vor, so können die Traufpolygone natürlich auch durch einfache Geländehöhenmessungen extruiert werden. Die Punkte des Gebäudegrundpolygons erhalten somit alle die gleiche Höhe. Eine Höhenmessung der Geländeoberfläche in unmittelbarer Nachbarschaft der Box ist für die Rekonstruktion ausreichend.

## **2.3. Geometrietexturierung zur Visualisierung**

Neben der eigentlichen Erfassung spielt heute auch die Visualisierung für photorealistische Darstellungen, z. B. im Planungsbereich, eine große Rolle. Texturen werden der Geometrie durch einfaches Anwählen der Geometriepolygone zugeordnet. Das 3D-Polygon wird ins Bild projiziert und der entsprechende Bildausschnitt wird in einer JPG-Datei gespeichert. Zur Speicherung sind unterschiedliche Komprimierungsgrade wählbar.

Um eine geometrisch exakte Darstellung der Textur auf der Geometrie zu gewährleisten wird das 3D-Polygon homogenisiert. Die Ausgabe für photorealistische Visualisierungen der Objektszene erfolgt im VRML-Format oder DXF-Format. Animationen können anschließend im CAD berechnet werden.

### **Texturierung von Gelände- und Oberflächenpolygonen**

Die Texturen von Gelände- und Dachpolygonen können bei einer Luftbildaufnahme direkt aus den Luftbildern ausgeschnitten werden. Die 3D-Polygone werden nach manueller Auswahl (manuelle Zuordnung) des zu texturierenden Polygons ins Luftbild projiziert. Der entsprechende Bildausschnitt wird ausgeschnitten. Für die Projektion stehen die Orientierungsparameter zur Verfügung.

Für die Visualisierung der Geländeoberfläche stehen Funktionalitäten zur automatischen Texturierung zur Verfügung (automatische Zuordnung). Auf Basis eines importierten DHM's wird eine Triangulation gerechnet, die das DHM in Dreiecksflächen aufteilt. Diesen Dreieckspolygonen werden dann automatisch die Texturen zugewiesen. Die Eckpunkte werden ins Bild projiziert und die Texturen werden in JPG-Dateien gespeichert.

### **Fassadentexturierung**

Fassaden sind in der Regel in Luftbildern, die zur Stadtmodellerfassung genutzt werden, nicht sichtbar, so dass terrestrische Aufnahmen für die Texturierung herangezogen werden müssen. Für diese Aufnahmen liegen in der Regel keine Orientierungsparameter vor, so dass eine Zuordnung der Geometriepolygonpunkte zu den entsprechenden Bildpunkten in den Aufnahmen nicht automatisch erfolgen kann. Die 3D-Polygone werden daher in die terrestrische Aufnahme eingeblendet und manuell an die zu erfassenden

Bildausschnitte/Fassaden angepasst. Der entsprechende Bildausschnitt wird ausgeschnitten und gespeichert.

Nach der Erfassung der Texturen werden die Bildausschnitte in einem Batch-Job auf die 3D-Geometrie entzerrt. Für die Darstellung in unterschiedlichen Auflösungen können die Pixelgrößen, die die Textur auf der Oberfläche aufweisen soll, frei gewählt werden. Es können so beliebige „Level of Detail“ berechnet werden.

## 2.4. Phaust<sup>®</sup>-TextureModeler

Die Aufnahmen der Fassaden können im allgemeinen nicht ohne Vorverarbeitung zur Texturierung herangezogen werden, da sie in der Regel gewisse Defekte aufweisen, die für eine geometrisch exakte und ästhetische Visualisierung beseitigt werden müssen. Das Programmmodul Phaust<sup>®</sup>-TextureModeler stellt dazu einige Funktionalitäten zur Verfügung. Folgende Arbeiten sind in der Regel vorzunehmen:

- Die Fassaden werden im allgemeinen mit sogenannten „Consumer“-Kameras aufgenommen. Die Aufnahmen weisen meist starke kissenförmige Verzeichnungen auf, so dass die Bilder entsprechend korrigiert werden müssen. Die Kameras werden daher vor der Aufnahme kalibriert. Die Kalibrierparameter werden für die geometrische Korrektur der kissen- oder tonnenförmige Abbildungen genutzt.
- Fassaden können in der Regel nur perspektiv aufgenommen werden. Diese Perspektive muss für eine geometrisch exakte Darstellung der Bildinformation auf den Fassaden beseitigt werden.
- Unter beengten räumlichen Verhältnissen können komplette Fassaden nicht immer in einer Aufnahme abgebildet werden, so dass zur Visualisierung die Einzeltexturen zusammengefügt werden müssen.
- Auch die radiometrischen Verhältnisse der Einzelaufnahmen sind häufig sehr unterschiedlich. Für eine ästhetische und ansprechende Darstellung sind daher entsprechend Korrekturen vorzunehmen.

## 2.5. Rastermessung

Der Rastermodus dient der Erstellung digitaler Höhenmodelle. Diese können zur Produktion klassischer Orthophotos, aber auch zur oben beschriebenen Visualisierung dreidimensionaler Geländeoberflächen genutzt werden. Auf Basis der Vorgaben

- Rasterweiten in beiden Lagekoordinatenrichtungen und
- Festlegung des DHM-Gebiets durch ein Umringspolygon

werden im Raster angeordnete 3D-Punkte berechnet, deren Höhen in einer automatisierten Messung korrigiert werden. Näherungshöhen werden durch eine ausgleichende Ebene durch die Punkte des Polygons, das das DHM-Gebiet definiert, vorgegeben.

Bei der Rastermessung wird der 3D-Cursor automatisch an den berechneten Rasterpositionen vorpositioniert. Rasterpunkte, die nicht messbar sind, können aus dem Raster eliminiert werden. Punkte, die eventuell im Nachbarmodell der Auswertung messbar oder besser messbar sind, können im aktuellen Modell temporär ausgeblendet werden. Sie werden beim Laden des Folge Modells wieder zur Messung angeboten.

## 2.6. Weitere Leistungsmerkmale der Arbeitsstation

Weitere Merkmale und Möglichkeiten des Phaust<sup>®</sup>-StereoModelers sind:

- Homogenisierungsfunktionalitäten von Polygonen (Ebenenausgleichung),
- Layerverwaltung auf Basis der MicroStation Layer-Definition,
- DXF-Import Schnittstelle zum Laden von Bestandsdaten mit der Möglichkeit zur Interpolation der Höhenkomponente bei 2D-Bestandsdaten,
- Export der gemessenen Daten im ASCII-Format, im DXF-Format oder im VRML-Format und
- Filter zur Überprüfung des Datenmodells.

Die Auswertung der Messaufnahmen erfolgt auf Basis von Orientierungsdaten, die mit dem Programmsystem CAP bzw. Vorlaufprogrammen von CAP (Kotowski 1996) orientiert wurden.

## 3. Ergebnisse einiger Visualisierungen mit dem Programmsystem Phaust<sup>®</sup>

Anhand von zwei Beispielen werden nun die Möglichkeiten des Programmsystems Phaust<sup>®</sup> vorgestellt.

### 3.1. Stadtmodell

Abb. 4 zeigt einen Ausschnitt eines Stadtmodells. Es wurde auf Basis von 2D-Bestandsdaten, die über die DXF-Schnittstelle in die Auswertestation Phaust<sup>®</sup>-StereoModeler importiert wurden, erfasst. Die Rekonstruktion erfolgte ausschließlich aus Luftbildern. Die Höhenkomponenten der Bestandslagepunkte wurden auf Grundlage einer vorausgegangenen Rastermessung und DHM-Berechnung beim Import der Daten durch Interpolation bestimmt. Abb. 4 zeigt einen Ausschnitt des Modells, visualisiert mittels eines VRML-Browsers.

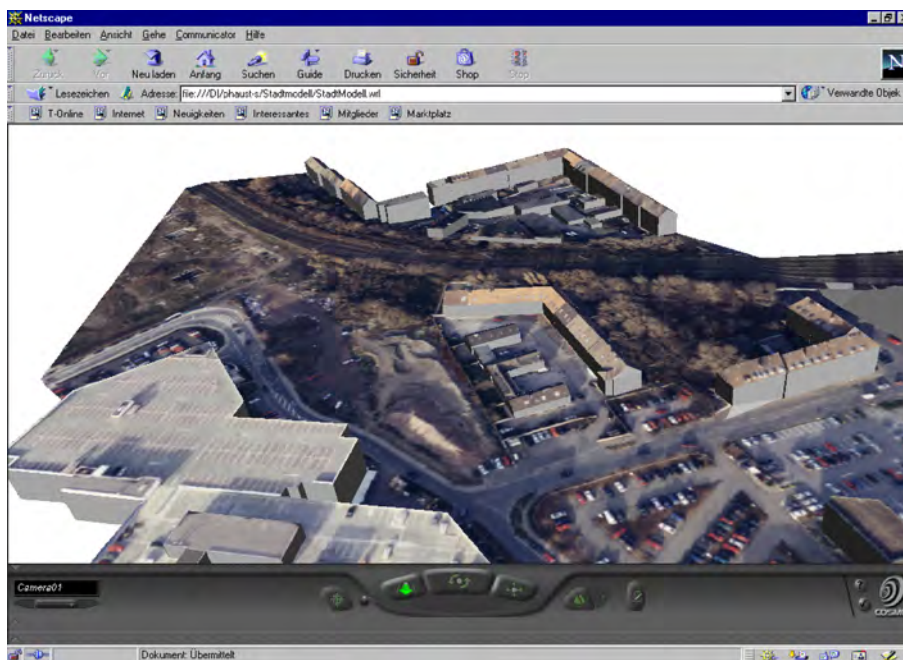


Abb. 4: VRML-Darstellung eines Stadtmodellausschnitts

Ein zweites Beispiel zeigt in Abb. 5 die Erfassung und Modellierung eines Einzelgebäudes, das auf Basis von Luftbildern und terrestrischen Aufnahmen rekonstruiert wurde. Die Erfassung erfolgte ohne Bestandsdaten und a priori bekannten Geometrien. Die Aufnahme der terrestrischen Aufnahmen für die Rekonstruktion erfolgte mit einer Kodak DCS460, die Aufnahme der Texturen erfolgte mit einer Olympus CL2500.



Abb. 5: Visualisierung eines Einzelgebäudes

#### **4. Zusammenfassung und Ausblick**

Im vorliegenden Beitrag wurden die photogrammetrische Stereoauswertestation Phaust<sup>®</sup>-StereoModeler und der Phaust<sup>®</sup>-TextureModeler mit ihren Erfassungs- und Modellierungswerkzeugen vorgestellt. Die Stereostation ist primär zur dreidimensionalen Erfassung realer Objektgeometrien konzipiert. Da jedoch in vielen Bereichen der klassischen Vermessung und auch in fachübergreifenden Disziplinen weitergehende Ansprüche bestehen, wurden entsprechende Funktionalitäten, z. B. zur Texturierung, implementiert. Die Beispiele zeigen einige Möglichkeiten auf, welche mit dem Phaust<sup>®</sup>-StereoModeler effizient realisierbar sind.

Weitere automatisierte Messfunktionalitäten stehen in naher Zukunft zur Verfügung. Insbesondere zur effizienten und hochgenauen Rastermessung werden Matching-Funktionalitäten implementiert, die die Zuverlässigkeit und Nutzerunabhängigkeit weiter steigern werden.

#### **5. Literatur:**

Kotowski, R. 1996: Photogrammetrische Bündelausgleichung zur 3D-Objektrekonstruktion und simultanen Sensorkalibrierung in der Nahbereichsphotogrammetrie. VDV-Schriftenreihe Bd. 12, S. 22-31, Verlag Chmielorz, Wiesbaden.

Laing, R. und Ruff, B. 1998: 3D-Stadtmodelle für den Mobilfunk. In: Der Vermessungsingenieur, Heft 5, S. 241-248.

Woytowicz, D. 1993: PHAUST-A photogrammetric evaluation system for digital images. In: Optical 3D Measurement Techniques II, Wichmann-Verlag, S. 81-87.

# On-Line Pose Messsystem für Roboter

Jürgen Hefe<sup>1</sup>

*Dieser Bericht beschreibt den Aufbau eines photogrammetrischen Messsystems zur Bestimmung der räumlichen Position und Orientierung des Tool Center Points eines Roboters, wie es am Institut für Photogrammetrie der Universität Stuttgart entwickelt wird. Prinzipiell stehen zwei Verfahren zur Verfügung, der räumliche Rückwärtseinschnitt und der räumliche Vorwärtseinschnitt. Dieser Bericht geht nun auf den räumlichen Rückwärtseinschnitt ein. Er beschreibt die verwendeten Algorithmen und zeigt die erreichbaren Genauigkeiten auf. Getestet wird das Verfahren an einem 6-Achs-Industrieroboter. Zum Einsatz kommt daneben noch eine hochauflösende Digitalkamera mit 12 Bilder/Sekunde. Verglichen werden die Ergebnisse mit einem hochgenauen kommerziellen Messsystem.*

## 1 Einführung

Massenproduktion von Gütern ist heutzutage ohne den Einsatz von Industrierobotern nicht mehr denkbar. Rohkarosserien beispielsweise werden nahezu vollständig von Robotern gefertigt. Bisher werden 95 Prozent der Roboter im so genannten Teach-in Verfahren programmiert. Das heißt nach der Installation des Roboters muss ein Werker die vorher definierten Raumpunkte über das Handsteuergerät einzeln anfahren und programmieren. Muss nun ein defekter Roboter ersetzt werden, so hat dies lange Stillstandzeiten der gesamten Anlage zur Folge. Bei Einsatz von kalibrierten Industrierobotern entfällt die aufwendige Handprogrammierung, da die Programme im Büro erstellt und getestet werden können. Auf Grund der konstruktiven Bauweise besitzen Industrieroboter eine relative Wiederholgenauigkeit (Anfahren des selben Punktes unter konstanten Bedingungen) von 0.03 – 0.15 mm. Kalibrierte Roboter erreichen in der Absolutgenauigkeit (Anfahren des Punktes auf unterschiedlichen Wegen mit verschiedenen Geschwindigkeiten und Beschleunigungen) Genauigkeiten in der gleichen Größenordnung (0.1 – 0.5 mm), nicht kalibrierte Roboter hingegen nur Genauigkeiten im Bereich von 2 bis 10 mm. Herstellerfirmen von Robotern bieten ihren Kunden als zusätzliche Option die Roboterkalibrierung an. Hier werden über verschiedene Messverfahren, auch unter Einsatz von photogrammetrischen Methoden, die Abweichungen von den Modellparametern (Länge der Achsen, Winkelfehler) bestimmt (WIEST, 2001). Durch das einmalige Kalibrieren der Roboter werden aber zeitliche Einflüsse wie Temperaturänderung, Abnutzung und dynamische Kräfte nicht berücksichtigt. Um den Einfluss dieser Fehler Rechnung zu tragen, müssen die Modellparameter des Roboters in kurzen Zeitabständen aktualisiert werden. Der erste Schritt dahin ist die on-line Bestimmung der Position und Orientierung (Pose) des Tool Center Points (TCP) des Roboters.

Bei bekannten Kameraparametern stellt die Photogrammetrie prinzipiell zwei Verfahren zur Bestimmung der Pose zur Verfügung: den räumliche Rückwärtsschnitt und den räumliche Vorwärtseinschnitt. Dieser Bericht zeigt unsere ersten Erfahrungen zur Bestimmung der Roboter Pose mit Hilfe des räumlichen Rückwärtsschnittes.

## 2 Pose Bestimmung der Kamera

Für den räumlichen Rückwärtsschnitt müssen sowohl Modellparameter der Kamera als auch 3D-Koordinaten von Messmarken vorliegen. Das verwendete Kameramodell und die

---

<sup>1</sup> Jürgen Hefe, Institut für Photogrammetrie, Universität Stuttgart, Geschwister-Scholl-Str. 24, 70174 Stuttgart, e-Mail: juergen.hefele@ifp.uni-stuttgart.de



Erkennung der Messmarken werden im nächsten Abschnitt beschrieben. Ebenso wird noch auf den verwendeten Algorithmus des räumlichen Rückwärtsschnittes eingegangen.

## 2.1 Kameramodell

Als Basis für das Kameramodell dienen Teile des Parametersatzes von BROWN (1971). Neben den Standardparametern Bildhauptpunkt und Kamerakonstante werden weitere Parameter zur Bildkorrektur bestimmt. Wir halten uns dabei an die Notation wie sie FRASER (1997) einführte. Die Korrektur setzt sich aus der radial-symmetrischen Verzeichnung ( $*x_r, *y_r$ ), der radial-asymmetrischen und tangentialen Verzeichnung ( $*x_d, *y_d$ ), sowie Parameter für die Affinität und Scherung ( $*x_f, *y_f$ ), zusammen.

Die Bestimmung des Parametersatzes und der Raumkoordinaten der Messmarken erfolgt über die freie Netzausgleichung mit dem Bündelprogramm Australis der Universität Melbourne (Australien).

## 2.2 Markenerkennung

Die Pose Bestimmung der Kamera erfolgt über ein ebenes Testfeld mit kreisförmigen retro-reflektierenden Messmarken (Abbildung 1). Für die automatische Identifizierung sind im Testfeld kodierte Marken vorhanden. Diese besitzen neben der kreisförmigen Messmarke (große Marken in Abbildung 1) zusätzlich einen radial um die Marke angebrachten Kode. Der Algorithmus berechnet den gewichteten Schwerpunkt jeder kreisförmigen Messmarke und ermittelt zusätzlich den Kode der kodierten Marken.

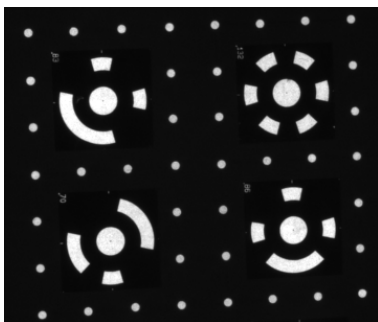


Abb. 1: Ausschnitt Testfeld

Im ersten Schritt der Markenerkennung wird das Grauwertbild der Kamera in ein Binärbild gewandelt. Die Schwellwertberechnung für die Binarisierung erfolgt nach der Methode von OTSU (1979). Nach der Binarisierung wird für jeden zusammenhängenden Bereich (Blob-Detection) die Fläche und die Kreisförmigkeit berechnet. Die Kreisförmigkeit  $C$  definiert sich durch:

$$C = \frac{F}{\pi m^2}$$

Wobei  $F$  die Fläche und  $m$  der größte Abstand vom Schwerpunkt zum Rand des Bereiches ist. Besitzt eine Fläche die Kreisförmigkeit  $C=1$ , so liegt ein Kreis vor. Als Messmarken werden somit jene Bereiche erkannt, deren Fläche größer als 10 Pixel und die Kreisförmigkeit größer als 0.5 ist. Die Kode suche erfolgt mit Hilfe einer Ellipsenschätzung. Um jeden kreisförmigen Bereich wird eine Ellipse geschätzt, die dann um einen konstanten Faktor (hier 2.7) vergrößert wird. Entlang der vergrößerten Ellipse wird dann der Kode gelesen. Nicht kodierten Messmarken wird der Kode 0 zugeordnet.

## 2.3 Räumlicher Rückwärtsschnitt

FISCHLER und BOLLES (1981) veröffentlichten eine direkte Lösung des räumlichen Rückwärtsschnittes ausgehend von vier, in einer Ebene liegenden, Punkten. Ihre Lösung wird zur Bestimmung der Kameraposition verwendet. Die Berechnung der Kameraorientierung erfolgt nach dem Verfahren wie sie KRAUS (1996) vorschlägt. Verwendet werden die 4 am

weitesten auseinander liegenden kodierten Messmarken im Bild um eine möglichst optimale Verteilung zu erhalten. Die Identifikation der nicht kodierten Marken erfolgt durch Transformation der Messmarken in den Bildraum. Um Singularitäten in der Drehmatrix zu vermeiden, wird die Drehmatrix mit Hilfe von Quaternionen parametrisiert:

$$q = \begin{bmatrix} q_0, \vec{q}^T \end{bmatrix} \text{ mit } q = \sin\left(\frac{\phi}{2}\right)\vec{k}, \quad q_0 = \cos\left(\frac{\phi}{2}\right)$$

Dabei ist  $\vec{k}$  die Drehachse und  $\phi$  der Drehwinkel. Die Rotationsmatrix besitzt damit folgende Gestalt:

$$R = \begin{bmatrix} q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 & 2(q_1q_2 - q_0q_3) & 2(q_1q_3 + q_0q_2) \\ 2(q_1q_2 + q_0q_3) & q_0^2 - q_1^2 + q_2^2 - q_3^2 & 2(q_2q_3 - q_0q_1) \\ 2(q_1q_3 - q_0q_2) & 2(q_2q_3 + q_0q_1) & q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2 \end{bmatrix}$$

Die Ausgleichung erfolgt dann nach dem Schema der Vermittelnden Ausgleichung mit folgender Bedingung zwischen den Unbekannten:

$$1 = q_0^2 + q_1^2 + q_2^2 + q_3^2$$

## 3 Ergebnisse

### 3.1 Verwendete Hardware und Software

Für die experimentelle Untersuchung benutzen wir den am Institut für Photogrammetrie vorhandenen 6-Achs-Industrieroboter KR15/2 der Firma Kuka aus Augsburg (Abbildung 3). Die maximale Tragfähigkeit des Roboters beträgt 15 kg bei einer Reichweite von ca. 1.5 m. Der Roboter hat laut Hersteller eine Wiederholgenauigkeit von • 0.1 mm. Über die Absolutpositioniergenauigkeit liegen keine Angaben vor.

Für die Bildaufnahme kommt die digitale Kamera Basler A113 mit einem 12 mm Objektiv zum Einsatz. Sie zeichnet sich durch eine hohe Auflösung von 1300• 1030 Pixel bei einer Bildrate von 12 Bilder/Sekunde aus. Die Datenübertragung in den PC erfolgt über die digitale Schnittstelle RS644 und der Framegrabber-Karte Matrox Meteor II DIG.

Um eine möglichst einfache Binärbilderzeugung zu erreichen, wird zur Beleuchtung einen LED-Ring mit IR-LEDs (Wellenlänge 880 nm) verwendet. Vor dem Objektiv befindet sich ein Tageslichtfilter, der das Licht im Frequenzbereich von 400 - 800 nm herausfiltert (Abbildung 3).

Das Grundgerüst für die Bildverarbeitung bildet die Software HALCON 6.0 der Firma MVTec. Über die vorhandene C-Schnittstelle wurde das System um die benötigten Funktionen, wie beispielsweise für den Bildeinzug über die Framegrabber-Karte Meteor II DIG, die Binärbilderzeugung nach Otsu, die Markenerkennung und natürlich für den räumlicher Rückwärtsschnitt, erweitert.



Abb.2: KR15/2

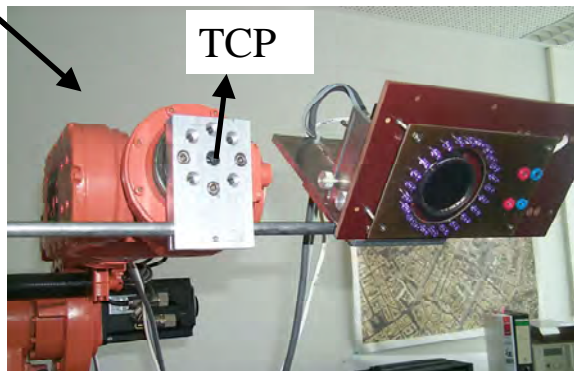


Abb.3: Basler A113 mit Beleuchtungsmodul

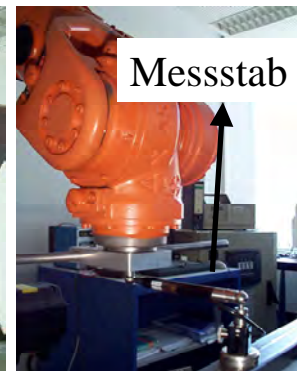


Abb. 4: Ball-Bar-System

### 3.2 Rechenzeiten

Der Zeitaufwand für die Bestimmung der Kameraposition und Orientierung auf einem handelsüblichen Pentium III Rechner (500 MHz, 128 MB RAM) beträgt durchschnittlich etwa 440 ms. Die Aufschlüsselung der Zeiten ist in Tabelle 1 wiedergegeben. Es zeigt sich, dass für die Markenerkennung die meiste Zeit benötigt wird. Hier ist vor allem das Lesen der einzelnen Grauwerte aus dem Bild entlang des Codes sehr zeitintensiv.

In der Zeile Bildaufbereitung ist der Zeitaufwand für das Ermitteln des Schwellwertes, für die Binarisierung, die Binarisierung an sich und das Ermitteln der möglichen Kandidaten für die Marken, zusammengefasst.

Aktion	Zeit [ms]
Bildaufbereitung	90
Markenerkennung	330
Räumlicher Rückwärtsschnitt	20

Tabelle 1: Zeitaufwand

Bei etwa 30 kodierten und 200 unkodierten Marken pro Bild kommen werden 500 Marken /Sekunde erreicht, was im Schnitt 2-4 Bilder/Sekunde bedeutet.

### 3.3 Bestimmung der Bahngenaugigkeit durch Kreisformtest

Im Maschinenbau wird im allgemeinen der Kreisformtest zur Bestimmung der Genauigkeiten einer programmierbaren Maschine benutzt. Dabei wird die Bewegung des TCP auf einer Kreisbahn registriert. Die Abweichung vom Idealkreis wird dann als Maß für die Genauigkeiten herangezogen. Um einen einheitlichen Test zu gewährleisten hat die „International Organisation for Standardization“ die Norm ISO230-4 (1996) herausgebracht. Diese beschreibt die exakte Vorgehensweise und die zu ermittelnden Parameter des Kreisformtests die da wären:

1. Durchmesser (Radius) des nominellen Kreises
2. Pfadverlauf

### 3. Maximale Abweichung vom Kreis

Mehrere kommerzielle Anbieter bieten in ihren Sortiment Geräte zur Durchführung des Kreisformtests an. Wir benutzen als Referenzsystem das „Ball-Bar-System“ der Firma Renishaw. Dieses besteht aus einem längenempfindlichen Messstab mit einer Länge von 150 mm der über Magnete an zwei Kugeln befestigt wird. Eine Kugel wird am TCP des Roboters montiert, die andere Kugel kommt in den Kreismittelpunkt wie es in Abbildung 5 zu sehen ist. Bewegt sich der Roboter auf einer Kreisbahn, so registriert der Messstab die radiale Abweichung vom Idealkreis. Die wichtigsten Parameter des Ball-Bar-System sind in Tabelle 2 aufgeführt.

Auflösung	0.1 • m
Messgenauigkeit	• 1 • m
Messbereich	• 1 mm
Messfrequenz	300 Hz

Tabelle 2: Ball-Bar-Messsystem

Der Kreisradius für den Test ist durch das Ball-Bar-System (Messstablänge 150 mm) fest vorgegeben. Die Bahngeschwindigkeit wurde auf 10 mm/s festgesetzt, so dass mit über 100 Pose Bestimmungen pro Vollkreis durch das photogrammetrische System zu rechnen ist. Tatsächlich waren es 125, während das Ball-Bar-System durch die hohe Messfrequenz 882 Messungen durchführte.

In Tabelle 3 sind die durch die Ausgleichsrechnung ermittelten Standardabweichungen unseres photogrammetrischen Systems aufgeführt .

	Simulation		Experimentelle Untersuchung
Bildmessgenauigkeit	1/5 Pixel	1/10 Pixel	1/10 – 1/20 Pixel
Rückwärtsschnitt in X	0.06 mm	0.03 mm	0.05 – 0.14 mm
Rückwärtsschnitt in Y	0.06 mm	0.03 mm	0.05 – 0.14 mm
Rückwärtsschnitt in Z	0.02 mm	0.009 mm	0.05 – 0.07 mm

Tabelle 3: Standardabweichungen des räumlichen Rückwärtsschnitts

Eine gleichzeitige Erfassung der Kreisbahn mit Kamera und Ball-Bar-System ist nicht möglich, da der Messstab des Ball-Bar-Systems einen Teil des Bildes verdecken würde. Untersuchungen zeigen aber, dass in kurzem zeitlichem Abstand durchgeführten Tests sich die Bahn nur sehr geringfügig ändert (Abbildung 5, Abweichungen gegenüber dem Idealkreis um Faktor 200 verstärkt abgebildet).

Abbildung 6 zeigt den Idealkreis und die Kreisbahnen wie sie mit Ball-Bar-System der Firma Renishaw und mit dem photogrammetrischen System registriert wurden (Abweichung vom Idealkreis um Faktor 200 erhöht). Das photogrammetrische System zeigt bei zweimaligen durchfahren des Kreises nur geringfügige Abweichungen die innerhalb der Mess- Ungenauigkeit liegen. Verglichen mit dem Referenzsystem zeigen sich aber deutliche Abweichungen (Maximal 0.4 mm). Die Ursache dürfte in den verschiedenen Aufnahmepunkten liegen. Während das Ball-Bar-System ungefähr im TCP befestigt wurde (Abstand circa 10 mm), musste auf Grund von mechanischen Gegebenheiten die Kamera (Projektionszentrum) circa 100 mm vom TCP entfernt befestigt werden. Kleine Änderung in der Orientierung des TCP haben über den größeren Hebel eine wesentlich stärkere Auswirkung auf die Kameraposition wie auf das Ball-Bar-System. Im nächste Schritt muss nun durch die Bestimmung der Transformation zwischen TCP und Kamera (Hand-Eye-Transformation) dieser Fehler eliminiert werden.

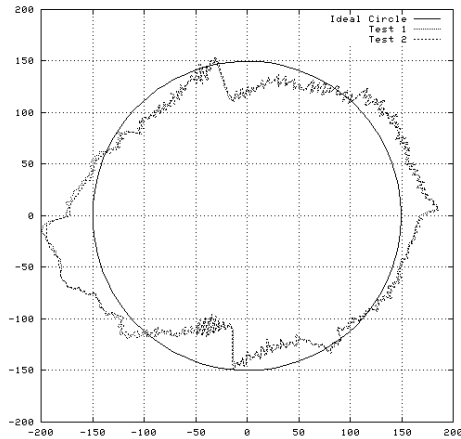


Abb. 5: Ball-Bar-System

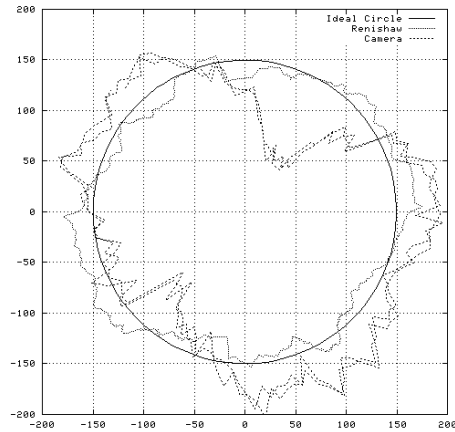


Abb. 6: Kamera-System

## 4 Zusammenfassung

Mit unserem jetzigen System erreichen wir nicht die Genauigkeiten wie sie von kommerziellen Systemen erreicht werden. Durch Verwendung von Objektiven mit kleinerer Brennweite ist eine Genauigkeitssteigerung erreichbar, so dass das photogrammetrische System zur Kontrolle eingesetzt werden kann. Ein großer Vorteil unseres Systems gegenüber anderen Systemen liegt in der flexiblen Handhabung und in der zusätzlichen Erfassung der Orientierung des TCP.

## 5 Literatur

- BROWN D.C., 1971: Close-Range Camera Calibration – Photogrammetric Engineering 37(8) 855-866
- FISCHLER, M. A. und BOLLES, R. C., 1981: Random sample consensus : A paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. – Communications of the ACM, 24(6):381-393, Juni 1981.
- FRASER, C., 1997: Digital camera self-calibration.- ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 52 149-159
- ISO, 230-4,1996: Test code for machine tools – Part 4: Circular tests for numerically controlled machine tools.
- KRAUS, K., 1996: Photogrammetrie Band 2, Dümmler Verlag
- OTSU, N., 1979: A Threshold Selection Method from Grey-Level Histograms. –IEEE Transactions on Systems , Man, And Cybernetics, SMC-9 (62-66, Januar 1979
- TSAI R.Y. and LENZ R.K., 1989: A New Technique for Fully Autonomous and Efficient 3D Robotics Hand/Eye Calibration. –IEEE Transaction on Robotics and Automation, 5(3) 345-358, Juni 1989
- WIEST, U., 2001: Kinematische Kalibrierung von Industrierobotern, Shaker Verlag

# Kartierung und Strukturerkundung tiefreichender Hangdeformationen in den östlichen Alpen mittels Luftbildfernerkundung und digitalen Orthofotos.

SIEGFRIED W. HERMANN<sup>1</sup>

*Abstract: Research on deep-seated gravitational slope deformations indicates that many more sites, than are known so far, occur along the Niedere Tauern mountains. To examine modes and frequency of occurrence in more detail, a coverage of 1.500 km<sup>2</sup> was studied conventionally by field mapping and remote sensing data. Thereby, some 43 sites have been detected, 70 % of all sites by the use of stereoscopic images. Orthographic photography are an excellent tool for detailed structural mapping. Interpretation of such maps by a viewpoint of brittle tectonics might infer the deep structure of slope deformation.*

## 1. Einleitung

Seit 1994 ist am Institut für Geologie und Paläontologie, der Universität Graz eine Arbeitsgruppe mit der Erkundung riesenhafter Massenbewegungen befasst. Diese werden unter dem Begriff „tiefreichende Hangdeformationen“ zusammengefasst und katalogisiert. Die morphologischen Phänomene dieser Massenbewegungen wurden bei AMPFERER (1939) als *Bergzerreißung* und bei STINI (1941) als *Talzus Schub* beschrieben, finden aber auch im Synonym *Sackung* (ZISCHINSKY, 1969; HUTCHINSON, 1988) bzw. *tiefreichendes Felskriechen* oder „*lateral spreading*“ (MAHR, 1977; NEMCOK, 1972; SAVAGE & VARNES, 1987) ihren Niederschlag.

Bis zum Sommer 2001 konnten im Gebiet der Niederen Tauern, in einem Areal von etwa 1500 km<sup>2</sup>, 43 Beispiele tiefreichender Hangdeformationen kartiert werden (Abb.1).

In den Ostalpen sind nur wenige Fallbeispiele tiefreichender Hangdeformationen eingehend erforscht (z.B., MOSER & WEIDNER, 1998; TENTSCHERT, 1998; MAURITSCH ET AL, 2000; MOSER & GLAWE, 1994). Es sind dies Beispiele, die im Zuge von Großprojekten erkannt und erkundet wurden. Flächendeckend ist jedoch nur kleines Areal bearbeitet und es besteht Forschungsbedarf bezüglich der Kenntnis ihrer Verbreitung, weil (i) tiefreichende Hangdeformationen neben ihrem primären Gefährdungspotential sich zu Großrutschungen zu entwickeln können (CHIGARA & KIHIO, 1994), (ii) ihr Potential sekundäre Massenbewegungen, wie Murgänge, Rutschungen und Felsstürze zu provozieren (z.B. HERMANN, 1996; MORTARA & SORANZA, 1987) evident ist und (iii) tiefreichende Hangdeformationen einen wesentlichen Faktor inneralpiner Erosionsdynamik darstellen.

Es ist Deshalb unser Ziel die Verbreitung von Hangdeformationen in den Alpen großräumig und flächendeckend zu erfassen und einer Datenbank zuzuführen. Erkenntnisse eines diesbezüglichen Pilotprojektes werden hier vorgestellt. Weiters wollen wir an einem Beispiel aufzeigen, dass digitale Orthofotos eine wesentliche Hilfe bei der detaillierten Strukturerkundung von Hangdeformation darstellen und neue Ansätze zum Verstehen ihrer Deformationsgeometrie und Mechanik eröffnen.

---

<sup>1</sup> Dr. Siegfried Willibald Hermann, Institut für Geologie und Paläontologie, Karl-Franzens Universität Graz, Heinrichstrasse 26, A-8010 Graz, email: siegfried.hermann@uni-graz.at

## 1.1. Merkmale tiefreichender Hangdeformationen

Tiefreichende Hangdeformationen unterscheiden sich von Rutschungen durch geringe Versatzbeträge und eigenständige Strukturen im deformierten Hangabschnitt. Die Verformungsraten hoch aktiver Hangdeformationen liegen bei  $10^{-8}$  bis  $10^{-6}$  m/s ( $10^{-1}$  bis 10 m/Jahr), die inaktiver oder „ruhender“ Hangdeformationen unter  $10^{-8}$  m/s. Sowohl bei aktiven als auch bei ruhenden Hangdeformationen sind jene morphologischen Merkmale, die die Bergzerreibung (Doppelgrate, einfachen oder multiple Abrißkanten, hangparallele, asymmetrische Gräben) und den Talzuschub im Fußbereich definieren, zu erkennen.

In Abhängigkeit von der lithologischen Konstellation des Gebirges können drei Grundtypen unterschieden werden: (a) Hangdeformationen in rigiden, unterlagert von plastisch deformierbaren Sequenzen (z.B. Karbonatplattformen über Phylliten), (b) Hangdeformationen in Lithologien hoher mechanischer Anisotropie (Metamorphite oder klastische Sedimente) und (c) Hangdeformationen in Lithologien hoher Foliationsdichte aber „mechanisch isotroper“ (z.B. stark geklüftete Magmatite) Gebirge.

Lagerungsverhältnisse und die Orientierung mechanisch wirksamer Gefügeelemente bezogen auf die Exposition des Hanges steuern maßgebend die morphologischen Charakteristika einer Hangdeformation. Gemäß der dominierenden morphologischen Merkmale können drei Typen unterschieden werden, die bei BARLA & CHIRIOTTI (1995) und HERMANN (1997) als Entwicklungsstadien interpretiert wurden:

*Morphotyp 1: Initialstadien* zeigen nur geringe Versatzbeträge am Hauptabriß, es ist keine Talzuschubsstruktur vorhanden.

*Morphotyp 2: Entwickelte Stadien* kennzeichnen deutliche Abrißkanten oder Doppelgratstrukturen sowie konvexe Hangprofile, der Talzuschub fehlt.

*Morphotyp 3: Nur Finalstadien* sind durch einen Talzuschub im klassischen Sinne - konkaver Oberhang, konvexer vorgewölbter Fußbereich – gekennzeichnet.

## 1.2. Geologie und Morphologie der Niederen Tauern

Eine krustenmaßstäbliche Antiklinalstruktur polymetamorpher Kristallineinheiten des mittelostapinen Grundgebirges (TOLLMANN, 1987) formt den Hauptkamm der Niederen Tauern. In deren hangenden Einheiten dokumentieren silurische und devonische, metasiliklastische Abfolgen des Wölzer Glimmerschiefer Komplex (BECKER, 1981) zumindest zwei metamorphe Überprägungen. Sie können einer variskischen, grünschieferfaziellen und einer alpidischen amphibolitfaziellen Metamorphose und Deformation zugeordnet werden (APART & MARTINELLI, 1991).

Die Mittelgebirgskette der Niederen Tauern entwässert ein streng nach tektonischen Großstrukturen orientiertes Talnetz (HERMANN ET AL., 2000). Alle Haupttäler sind glazial überprägt, wobei der präglaziale Talboden durch Gletschererosion durchschnittlich 600 m bis 900 m tiefer gelegt wurde.

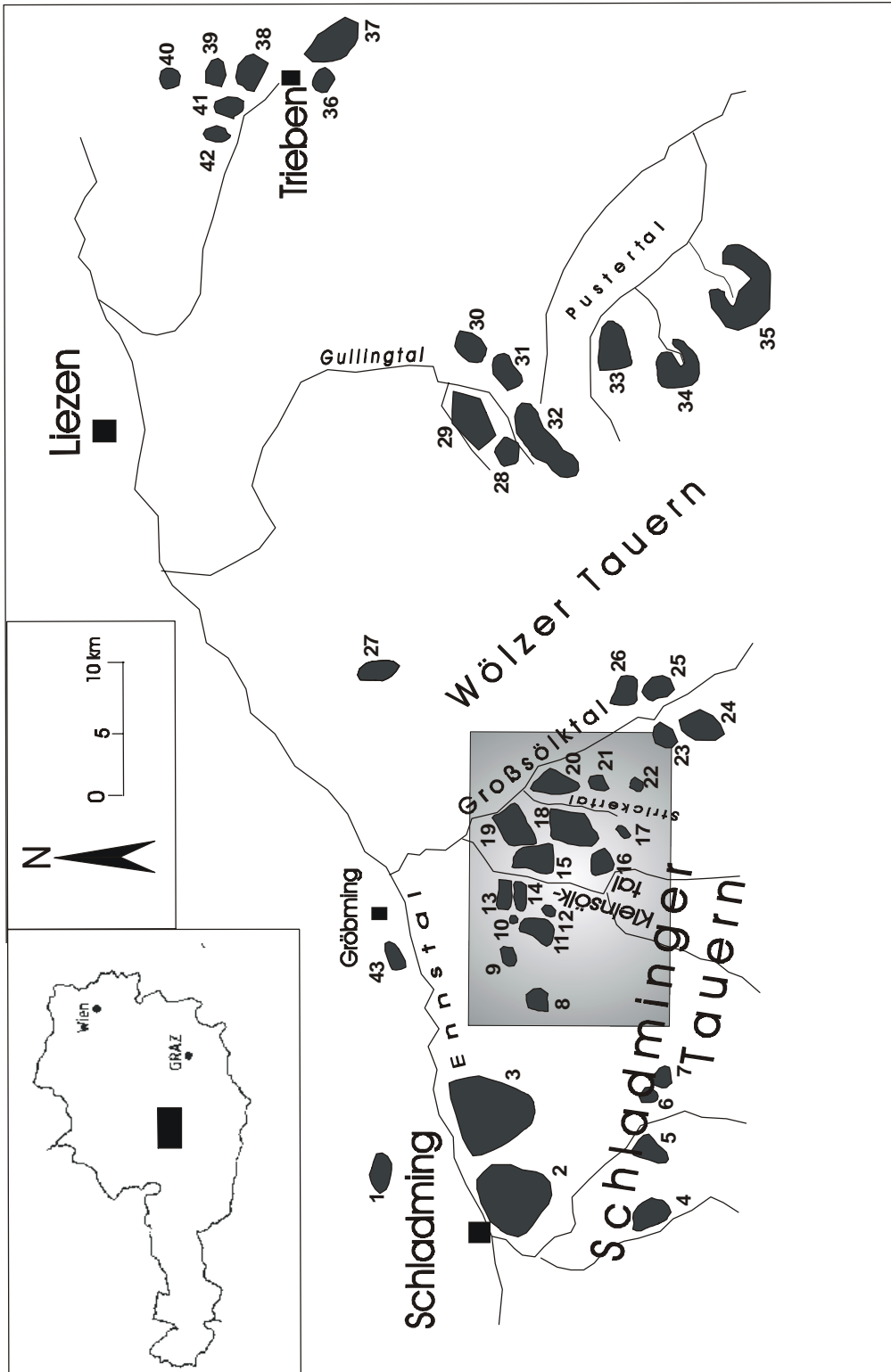


Abb.1: Verbreitung tiefreichender Hangdeformationen in den nördlichen Niederen Tauern. In der Pilotstudie konnten 43 Hangdeformationen, 70% davon durch Fernerkundung, eruiert werden. Das Graufeld umgrenzt das Areal des Testfeldes.



## 2. Iteratives Kartieren im Testgebiet Vordere Sölktäler

Im folgenden wird eine Vorgangsweise diskutiert, die, so glauben wir, zu einer gesicherten Erfassung aller Hangdeformationen im definierten Areal führte. Als Testgebiet wird ein etwa 120 km<sup>2</sup> großes Areal im Bereich des vorderen Kleinsölktales und des vorderen Großsölktales und einiger Seitentäler (siehe Abb. 1) vorgestellt. Vergleichbare geomorphologische und geologische Randbedingungen (Täler glazial überprägt, relativer Höhenunterschied Talboden/Berggrücken zwischen 700 bis 900 Meter bzw. Gneise und Glimmerschiefer) sind vorzufinden. Darin sind nunmehr 15 Subjekte tiefreichender Hangdeformationen (Tab. 1) bekannt.

Das Testgebiet wurde im Verlauf eines Jahres mittels (i) stereoskopischen Luftbildern im Maßstab 1: 15.000 und (ii) durch Geländekartierungen im Maßstab 1: 5.000 bis 1:10.000 flächendeckend kartiert. Dabei wurde, gleichsam als „quasi-iterative“ Methodik, die Luftbildkartierung zweifach, vor und nach der Geländebegehung, durchgeführt. Insgesamt wurden damit, die Literatursuche eingeschlossen, vier Erhebungsphasen (Tab.1) erreicht.

### 2.1. Erhebungsphasen

Aus Erhebungsphase 1, dem Literaturstudium, war die Existenz der Hangdeformation Eben-eck/Großsölktales (BECKER, 1980/1996) bekannt (Nr. 19). Es ist dies eine Hangdeformation des Morphotyps 3, markiert durch einen ausgeprägten Lobus eines Talzuschubes und einem durchschnittlich 22,5° geneigten Hang. Die Hangneigung ist hier um etwa 15° geringer als die der umliegenden, bis 35° geneigten glazial geformten Trogwände.

Bei Erhebungsphase 2, der ersten Luftbildfernerkundung an Stereopaaren konnten drei weitere Hangdeformationen erkannt werden (Nr. 11, 15, 18). Diese wurden vor allem aufgrund deutlich entwickelter Doppelgratstrukturen, Abrißkanten, Nackentäler und hangparalleler Leisten erkannt. An den Doppelgraten und Abrißkanten wurden Versatzweiten bis zu 120 Meter gemessen.

Mit der Geländebegehung (Erhebungsphase 3), die eigentlich die Richtigkeit der Luftbildkartierung beweisen sollte, konnten sechs weitere Hangdeformationen kartiert werden (Nr. 13, 14, 16, 17, 20, 21). Diese Hangdeformationen zeigen nur unscharfe morphologische Merkmale von Hangdeformationen. So zeigt etwa die Hangdeformation Ahrns Spitze (Nr. 20) nahezu keine Merkmale der Bergzerreißung, das Plateau der Ahrns Spitze ist lediglich durch eine flache Depression unterbrochen. Der Hang unterhalb der Ahrns Spitze zeigt jedoch ein deutlich konvexes Hangprofil (Morphotypus 2) in dem zahlreiche Abrisskanten und Gräben im stark bewaldeten Hang kartierbar sind. Ähnliche Verhältnisse sind an den Hangdeformationen Moditzen (Nr. 21), Hahlberg (Nr. 16) und Schusterstuhl (Nr. 17) gegeben. Die Hangdeformationen Lafenbergalm (Nr. 13) und Fleischkögel (14) zeigen keine offensichtlichen Merkmale der Bergzerreißung, auch die glaziale Formgebung der Hänge ist erhalten. Die Einstufung dieser Hänge als Hangdeformationen erfolgte durch eine Detailkartierung der Talbodenterrassen, die Loben von Talzuschüben nachzeichnen.

In Erhebungsphase 4, einer zweiten stereoskopischen Luftbilderkundung, die mit stärker vergrößernden Objektiven (3 fach und 8 fach) durchgeführt wurde, konnten fünf weitere Hangdeformationen, Ochsenkarhöhe (Nr. 8), Galsterbergalm (Nr. 9), Schlagerwald (Nr. 10), Dromeispitz (Nr. 12) sowie Schusterstuhl (Nr. 22) erkundet werden. Diese Hangdeformatio-

nen haben nur geringe Ausdehnung (unter 0,5 km<sup>2</sup>) und sind häufig an hochliegende Kare gebunden.

Von den im Testgebiet eruierten Hangdeformationen wurden mehr als die Hälfte der Fälle durch Luftbilderkundungen (Erkundungsphase 2, Luftbildvorerkundung: 20 %; Erkundungsphase 4, Luftbildnacherkundung: 33 %) und etwa 40 % durch Geländebegehungen erkannt. Weniger als 10 % der Fälle waren literaturbekannt.

Nr.	Bezeichnung	Erkundungsphase	Ausdehnung (km <sup>2</sup> )	Morphotyp
19	Ebeneck / Großsölkatal	1	2,90	3
11	Schladmingeralm / Sattental	2	1,80	3
15	Zinken / Kleinsölkatal	2	2,20	2
18	Speiereck / Strickertal	2	1,90	2
13	Lafenbergalm / Kleinsölkatal	3	1,60	2
14	Fleischkögel / Kleinsölkatal	3	1,70	2
16	Hahnberg / Kleinsölkatal	3	1,15	2
17	Schusterstuhl / Strickertal	3	0,18	1
20	Moditzen / Großsölkatal	3	1,60	2
21	Ahrnspitze / Großsölkatal	3	0,12	1
8	Ochsenkarhöhe / Sattental	4	0,15	2
9	Galsterbergalm / Sattental	4	0,54	2
10	Schlagewald / Sattental	4	0,12	1
12	Dromeispitz / Kleinsölkatal	4	0,04	1
22	Schusterstuhl / Strickertal	4	0,18	1

Tab.1: Tiefreichende Hangdeformationen im Bereich der vorderen Sölkäler, sortiert nach dem Zeitpunkt ihrer Erkennung (Spalte 3, Erkundungsphase), Daten aus HERMANN (1997). Spalte 1 gibt die Nummern der Hangdeformationen wie in Abb. 1 verwendet, Spalte 4 ihre Größe und Spalte 5 den morphologischen Grundtypus an.

Im Testgebiet war bezeichnenderweise die größte Hangdeformation schon vor Beginn der Studie bekannt. Während der stereoskopischen Vorerkundung (Erhebungsphase 2) wurden ebenfalls nur sehr große Hangdeformationen (etwa 2 km<sup>2</sup> Ausdehnung) erkannt, die den Morphotypen 1 oder 2, also jenen Hangdeformationen, die markante Strukturen des Talzuschubes oder der Bergzerreißung zeigen, zuzuordnen. Erst mit steigenden Erfahrungswerten konnten auch jene Hangdeformationen identifiziert werden, die nur undeutliche morphologische Erkennungsmerkmale aufweisen (Morphotyp 1). Aus Tabelle 1 ist zu erkennen, dass erst mit zunehmender Erfahrung, auch kleinflächigere und wenig deutlich entwickelte Hangdeformationen zu erkennen waren. Somit gilt die in Tabelle 1 ablesbare indirekte Proportionalität zwischen Zeitpunkt der Erkundung (Spalte 3) und Ausdehnung bzw. Morphotyp wohl nur für die Pilotphase.

Mit den Erfahrungen, die aus der Luftbildanalyse des Testgebietes gewonnen wurden, wurde das weitere Gebiet der Niederen Tauern auf die Existenz von Hangdeformationen untersucht und es konnten bis Mai 2001 insgesamt 43 Beispiele erkundet werden (Abb.1). Von diesen sind 2 Fälle (Nr. 19, 36) bzw. 5 % in der Literatur bekannt. 12 Fälle (Nr. 13, 14, 16, 17, 20, 21, 26, 28, 33, 38, 41, 42) bzw. 28 % wurden nach dem Geländebefunden eruiert und insgesamt 29 Fälle (Nr. 1-12, 15, 18, 22-25, 27, 29-32, 34, 35, 37-40, 43) bzw. 67 % konnten durch Luftbildkartierungen aufgestöbert werden.

### 3. Strukturerkundung am Beispiel der Hangdeformation Zinken/Kleinsölktal.

Die Verformung von Hängen schafft an der Oberfläche lineare Strukturen, wie Steilstufen, Hangleisten, Gräben oder Depressionen, die den Verschnitt gravitativ induzierter Verwerfungen und Störungen mit der Hangoberfläche markieren. Das Erkennen genannter morphologischer Strukturelemente, und die Bestimmung von Versatzbeträge und relativen Versatzrichtungen ermöglicht es, die Deformationsgeometrie und die Bewegungsmechanik einer Hanginstabilität zu konstruieren. Besonders wichtig ist dabei die exakte Positionierung bewegungsindikativer Strukturen. Dafür haben sich orthophotographischen Bilder im Maßstab 1:5.000 oder 1:10.000 als Kartierbasis besonders bewährt.

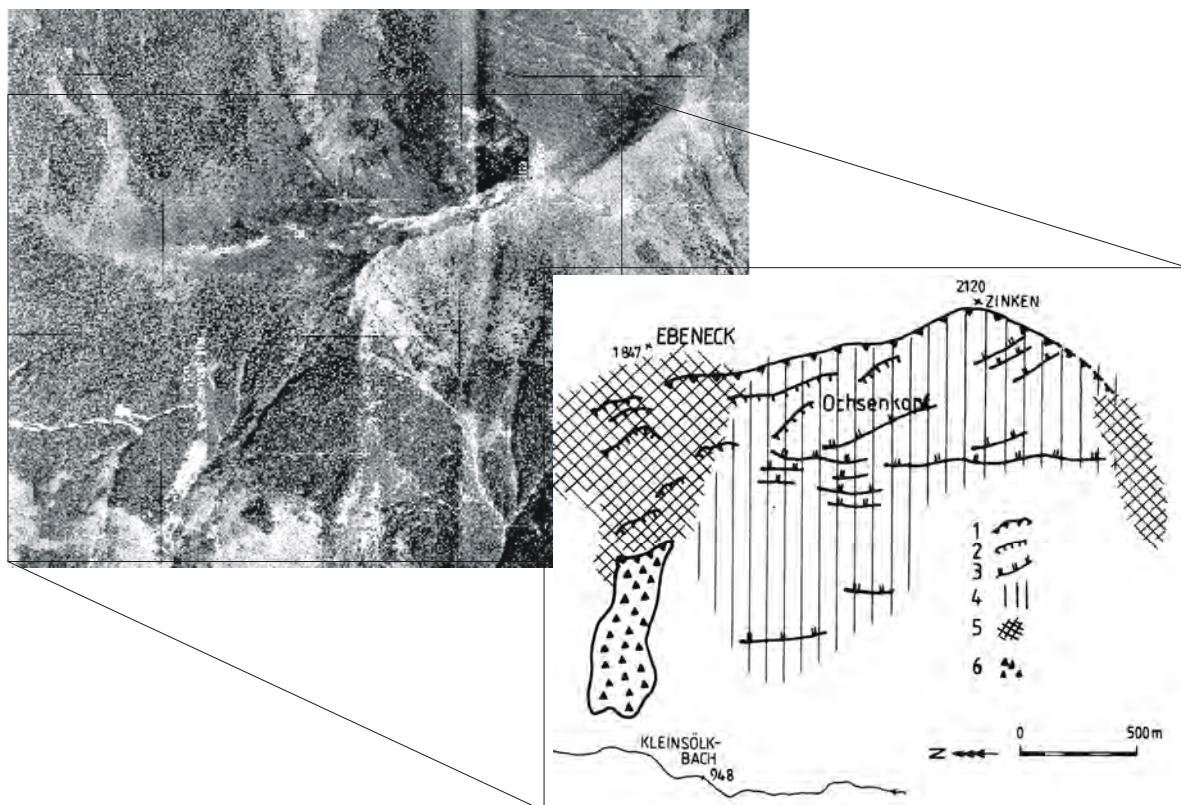


Abb. 2: *Links*: Orthophotographischer Ausschnitt der Hangdeformation Zinken/Kleinsölktal (Nr. 15). In Bildmitte ist der etwa 100 Meter breite Halbgraben einer Doppelgratstruktur erkennbar. Er erstreckt sich vom Ebeneck bis zum Zinken über 1.700 Meter. *Rechts*: Vereinfachte Strukturkarte, 1 Hauptabriß, 2 Sekundärabriß, 3 hangeinwärts fallender Graben, 4 Areal der Hangdeformation, 5 stark entfestigte Randzone, 6 Aktiver Rutschhang.

Die Hangdeformation Zinken/Kleinsölktal (Nr. 15) kennzeichnet eine singuläre Doppelgratstruktur. Diese markante Struktur am Grat zwischen Zinken und Ebeneck erstreckt sich über 1 700 m (Abb. 2 links) und war unschwer in der Erkundungsphase 2 zu erkennen. Die darauffolgende Geländebegehung (Erkundungsphase 3) bestätigte die Struktur des Zweifachgrates, zudem konnten weitere morphologische Strukturelemente innerhalb der Hangdeformation kartiert werden, insbesondere hangparallele Leisten und Gräben geringer Versatzbeträge (bis maximal 1,5 m), sowie einzelne Gräben senkrecht zum Streichen der Doppelgratstruktur. Detailbeobachtungen in Erkundungsphase 4 ließen zusätzliche Strukturelemente in unvermutet tiefen Hangbereichen sowie Strukturen an den seitlichen Randzo-

nen, die deutliche Strukturmerkmale spröder Scherzonen tragen, erkennen. An diesen Untersuchungen konnte auch der Nachweis geführt werden, dass eine seit langem beobachtete, aktive Großrutschung (BECKER & HERMANN, 1998) in direktem Zusammenhang mit der Hangdeformation Zinken steht (Abb.2 rechts).

Analysiert man die morphologischen Strukturen der Hangdeformation Zinken nach strukturgeologischen Kriterien, so ergibt sich daraus ein Modellfall einer singulären Abschiebungsstruktur. Der Zweifachgrat zeichnet die Form eines asymmetrischen Halbgrabens, gebunden an eine Hauptabschiebung, nach. Innerhalb der Hangdeformation markieren hangeinwärts fallende Gräben ein System konjugierter oder antithetischer Abschiebungen und führen zur Bildung einer Horst- und Graben Geometrie. Senkrecht zur Bewegungsrichtung der Hauptabschiebung sind Transferschiebungen entwickelt. Seitlich wird die Bewegung von Verformungsbereichen mit hohem Anteil an Scherdeformation kompensiert.

#### **4. Zusammenfassung**

Eine Pilotstudie zur Erkundung tiefreichender Hangdeformationen zeigte, dass im Gebiet der Niederen Tauern eine überraschend hohe Zahl von Hangdeformationen vorhanden ist. In einigen Talabschnitten, etwa dem vorderen Kleinsölktal oder dem Großsölktal, sind bis zu 70% aller Hangflanken von Hangdeformationen erfasst. Insgesamt konnten 43 Fallbeispiele ruhender, wenig aktiver Hangdeformationen in einem Areal von etwa 1500 km<sup>2</sup> eruiert werden. Eine derart hohe Dichte an Hangdeformationen ist vorerst überraschend, steht aber im Einklang mit einer Häufigkeit, die bereits an anderen alpinotypen Gebirgen aufgezeigt wurde (MORTARA & SORANZA, 1987; MAHR & BALIAK, 1973). Bei der Annahme ähnlich hoher Verbreitungsdichte im den gesamten Alpen existieren etwa 200 bis 500 weitere, bis dato nicht erkannte Hangdeformation. Diese ausfindig zu machen wäre neben Fragen der Risiko- beurteilung und der Raumplanung auch für Untersuchungen zur Neotektonik oder für Untersuchungen zu rezenten Exhumations- bzw. Denutationsraten des Alpenkörpers von Interesse.

Zwei Drittel der aufgefundenen Hangdeformationen konnten mittels stereoskopischer Luftbildkartierung, etwa ein Drittel nach Geländebefunden geortet werden. Eine derartige Relation (etwa 70 prozentige „Erfolgsrate“ durch Fernerkundung) sollte auch für Erkundungen in unbekanntem Gebieten möglich sein. Erste Versuche der Erkundung mit Landsat 7 ETM Vollszene ergaben, dass Hangdeformationen der Morphotypen 2 und 3 bei einer Ausdehnung von zumindest 1,5 km<sup>2</sup> detektierbar sind.

#### **5. Literaturverzeichnis**

- AMPFERER, O., (1939): Über einige Formen der Bergzerreißung. - Sitzber. Akad. Wiss. Math., 148, 1-14, Wien.
- APART R. & MARTINELLI, W. (1991): Variszische und Alpidische Entwicklungsgeschichte des Wölzer Kristallins (Steiermark, Österreich). – Mitt. Ges. Geol. Bergbaustud. Österr., 37: 1-14.
- BARLA, G. & CHIRIOTTI, E., (1995): Insights into the behaviour of the large Deep-Seated Gravitational Slope Deformation of Rosone, in the Piemont region (Italy). – Felsbau, 13, 425-432.

- BECKER, L.P. (1981): Zur Gliederung des obersteirischen Altkristallins (Muriden). Mit Bemerkungen zu den Erzvorkommen in den einzelnen Kristallinkomplexen. – Verh. Geol. B.-A., 1981 (2), 3-17.
- BECKER, L.P. (1980-1996): Unveröffentlichte Gutachten und Berichte im Auftrag der Steirerische Bergbauverwaltung, Graz.
- BECKER, L.P. & HERMANN, S. (1998): Eine rezente Großbrutschung im Kleinen Sölketal der zentralen Obersteiermark. – Mit. Ref. Geol. Pal. Landesmuseum Joanneum, SH 2: 65-80, Graz.
- CHIGARA, M. & KIHU, K. (1994): Deep-seated rock slide-avalanches preceded by mass rock creep of sedimentary rocks in the Akaishi Mountains, Central Japan.- Eng. Geol., 38, 221-230.
- HERMANN, S. (1996): Initiale Bergzerreißung als Gefahrenherd für Bergstürze, Nährgebiet für Muren und Großbrutschungen. Beispiele aus dem Naturpark Sölktaletal, Österreich.- Interraevent 1996 - Garmisch-Partenkirchen, Bd. 1, 409-418.
- HERMANN, S. (1997): Tiefreichende Hangbewegungen im Kristallin der Niederen Tauern. – Unpubl.PhD, Thesis, 191+36pp, University of Graz.
- HERMANN, S., MADRITSCH, G., RAUTH, H. & BECKER, L.P. (2000): Modes and structural conditions of large scale mass-movements (Sackungen) on crystalline basement units of the Eastern Alps (Niedere Tauern, Austria). Mitt. Nat. Ver. Steiermark, 130: 31-42, Graz.
- HUTCHINSON, J.N. (1988): General report: Morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrology. – In: Bonnard, C. (ed), Proceed 5th Int. Symp. On Landslides, Vol.1: 3-35, Rotterdam (Balkema).
- MAHR, T. (1977): Deep-reaching gravitational deformations of high mountain slopes. Bull. Int. Assoc. Eng. Geol., 16, 121-127.
- MAHR, T. & BALLIAK, F. (1973): Regional investigations of slope deformation in the high mountain areas of the West Carpathians.- Proc.10th.Congr.Carpäthian–Balkan Geol. Assoc., Sect.V, 169-178.
- MAURITSCH, H.J., SEIBERL, W., ARNDT, R., RÖMER, A., SCHEIDERBAUER, K. & SENDLHOFER, G.P. (2000): geophysical investigations of large landslides in the Carnic region of southern Austria. – Eng. Geol., 56, 373-388.
- MORTARA, G. & SORZANA, P.F. (1987): Fenomeni di deformazione gravitativa profonda nell' arco alpino occidentale italiano. Considerazioni litostrutturali e morfologiche. Boll. Soc. Geol. It., 106, 303-314.
- MOSER, M. & GLAWE, U. (1994): Das Naßfeld in Kärnten – geotechnisch betrachtet. – Abh. Geol. B.-A., 50: 319-340, Wien.
- MOSER, M. & WEIDNER, S. (1998): Die Auswirkungen von Talzuschüben auf die alpine Umwelt. – N. Jb. Geol. Pal., 208, 531-548, Stuttgart.
- NEMCOK, A. (1972): Gravitational slope deformation in high mountains. – Proc. 24th Int. Geol. Cong., Sect. 13, 132-141, Montreal.
- SAVAGE, W.Z. & VARNES, D.J. (1987): Mechanics of gravitational spreading of steep-sided ridges (“Sackung”). – Bull. Int. Assoc. Eng. Geol., 35, 31-36.
- STINI, J. (1941): Unsere Täler wachsen zu.- Geol.u.Bauwesen, 1, 71-79.
- TENTSCHERT, E. (1998): Das Langzeitverhalten der Sackungshänge im Speicher Gepatsch (Tirol, Österreich). – Felsbau, 16/3, 194-200, Essen.
- TOLLMANN, A. (1987): The alpidic evolution of the Eastern Alps. – In: Flügel, H.W. & Faupl, H.W. (Eds), Geodynamics of the Eastern Alps, 361-378, Wien (Deuticke).
- ZISCHINSKY, U. (1969): Über Sackungen.- Rock Mechanics, 1, 30-52.

# Klassifikation von Forstbestandsstruktur in sehr hochauflösenden Multiblickwinkeldaten durch direktionale Variogramme und Integration in das GIS "GRASS"

S. HESE<sup>1</sup>

*Mit der Verfügbarkeit sehr hochauflösender flugzeuggestützter Stereozeilenscannerdaten stellt sich die Frage nach dem Anwendungspotential derartiger Datensätze für automatische Verfahren im Bereich der hochauflösenden Forstfernerkundung. In dieser Arbeit wird ein Verfahren vorgestellt, das über die Ableitung von Variogrammtextursignaturen Bestandsstruktureigenschaften klassifiziert. Dafür wird in den Stereo- und in einigen Multispektralkanälen der HRSC-A (High Resolution Stereo Camera - Airborne) der geostatistische Variogrammparameter "Range" durch Anpassung einer sphärischen Funktion an den Variogrammverlauf durch das Verfahren der „gewichteten kleinsten Quadrate“ abgeleitet. Bei der Richtung der Variogrammberechnung wird den beleuchtungsbedingten direktionalen Eigenschaften im Datensatz, die in Forstbeständen die Textur in hohem Maße beeinflussen, Rechnung getragen. Zusätzlich ist die Richtung der blickwinkelbedingten Objektgeometrieänderungen an den Kronen in den Stereokanälen zu berücksichtigen. Durch die Ableitung derartiger direktonaler Range-Texturmerkmale werden hochdimensionale Merkmalssignaturen erstellt, mit denen dann der Bestand durch ein überwacht Verfahren klassifiziert werden kann (Variogramm Texturklassifikation). Durch die Integration dieses Verfahren in die Raster-GIS Umgebung „GRASS“ (Geographic Resources Analysis Support System) können zonale Funktionen und bestehende Bestandsabgrenzungen bei der Ableitung von strukturellen Eigenschaften genutzt werden.*

## 1 Einführung

Seit 1997 wird die digitale Stereozeilenkamera HRSC-A operationell für unterschiedliche Fernerkundungsanwendungen genutzt. Mit der vollautomatischen photogrammetrischen Datenverarbeitung können aus den multispektralen und panchromatischen Datensätzen orthoprojizierte Multispektraldaten erstellt werden und digitale Oberflächenmodelle berechnet werden (WEWEL ET AL. 1998, WEWEL ET AL. 2000). Die Datengeometrie unterscheidet sich vom Luftbild aufgrund der jedem Kanal eigenen Blickwinkel und aufgrund des Aufnahmeprinzips des Zeilenscanners (Parallelperspektive in Flugrichtung) erheblich. So können in den äußeren Kanälen nach der Lagekorrektur deutliche blickwinkelbedingte Geometrieänderungen im Forstbestand erkannt werden. Innerhalb eines Kanals ist die Geometrie jedoch hochgradig stabil, da in Flugrichtung eine parallelperspektivische Abbildung vorliegt und rechtwinklig zur Flugrichtung (across track) praktisch kaum blickwinkelbedingte Geometrieänderungen entstehen, da der Öffnungswinkel des optischen Systems der HRSC-A sehr gering ist. Durch die Stereo- und Multispektralkanäle liegen definierte Blickwinkelgeometrien vor. Dies sind sehr gute Ausgangsbedingungen für die Entwicklung von Klassifikationsmethoden, welche die Multiblickwinkeleigenschaften des Systems nutzen und texturellen Merkmale ableiten. Im Anwendungsbereich der Forstwirtschaft sind operationelle Verfahren der Ableitung von Bestandsparametern von hohem Wert, da wirtschaftlich wichtige Eigenschaften (und in letzter Zeit auch vermehrt ökologische Eigenschaften) von Forst- und Waldgebieten so einfacher und kostensparender ermittelt werden

---

<sup>1</sup> Sören Hese, DLR (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt), Institut für Weltraumsensorik und Planetenerkundung, Rutherfordstraße 2, 12489 Berlin, email: soeren.hese@dlr.de

können. Bereits früh wurden erste Untersuchungen von hochauflösenden Daten für derartige Anwendungsbereiche durchgeführt. Erfolgreiche und z.T. auch operationell eingesetzte Verfahren sind z.B. das ITC (Individual Tree Crown delineation) (GOUGEON 1994), das mithilfe von Datensätzen des MEIS (Multi-detector Electro-optical Imaging Sensor), einem frühen Zeilenscanner System, entwickelt wurde. Zu berücksichtigen sind bei Verfahren der Auswertung sehr hochauflösender Datensätze die hohe spektrale Variabilität einzelner Klassen. Dieses auch als „high-resolution-problem“ bezeichnete (HAY ET AL. 1996) Problem führt zu Verfahren, die in erster Linie Nachbarschaften von Pixelwerten untersuchen, um Objekteigenschaften zu erfassen. Im besonderen Maße sind objekterfassende Verfahren, welche als sekundären Schritt die spektrale Variabilität der Objekte untersuchen, von hohem Anwendungswert (SCHNEIDER ET AL. 2000).

## 2 Daten

Für diese Untersuchungen wurden Daten der HRSC-A vom Mai 1999 vom Tharandter Wald (bei Dresden), die im Rahmen der PROSMART (Pro Systematic Market Development Approach for Remote Sensing Technologies) Flugkampagne aufgenommen wurden, verwendet. Die HRSC-A ist eine Stereozeilenkamera, die nach dem Pushbroom-Prinzip mit 9 CCD-Zeilen Daten aufnimmt. 4 der 9 Zeilen sind mit Farbfiltern versehen (Tab. 1) und mit den restlichen 5 panchromatischen Kanälen werden Stereodaten erzeugt, um über eine photogrammetrische Datenverarbeitung digitale Oberflächenmodelle abzuleiten und eine Orthokorrektur der multispektralen Daten zu ermöglichen.

HRSC-A / QM (Qualifikationsmodell)	
Brennweite	175 mm
Total Field of View	36° x 11.8°
Anzahl der CCD-Zeilen	9
Stereowinkel	18,9° 12,8°
Pixel /CCD-Zeile	5272 (5184 Bildpixel)
Pixelgröße	7 µm
Radiometrische Auflösung	10 bit reduziert auf 8 bit
Auslesegeschwindigkeit	450 Zeilen/Sek
Spektrale Auflösung	blau: 395 – 485 nm; grün: 485 – 575 nm, rot: 730 – 770 nm; nir: 925 – 1015 nm, Nadir/Stereo: 585 – 765 nm
Gewicht	32 kg
Plattform	Zeiss T-AS Stabilisierungsplattform, Kreisel (fest verbunden mit der Kamera),
Datenrate/ Datenaufzeichnung	10 Mbytes/s / Sony High Speed Tape Recorder 100 Gbytes/Tape
Flugparameter (Cessna 208)	3500 m AGL (6000 m maximal), v=250 km/h
Stabilisierung/ Lagedatenaufzeichnung/ Flugnavigationsdatenaufzeichnung	Carl Zeiss T-AS Stabilisierungsplattform / IMU auf der Kamera montiert / Applanix DGPS , PC, GPS

Tab. 1: Technische Daten der HRSC-A (High Resolution Stereo Camera-Airborne)

Der genutzte Datensatz wurde aus 3000 m Flughöhe aufgenommen. Die geometrischen Auflösungen liegen dabei bei 15 cm für den Nadirkanal, 30 cm für die Stereokanäle und bei 60 cm für die Multispektralkanäle.

### 3 Methode

#### 3.1 Variogrammparameterableitung

Die Grundlegende Methode des hier vorgestellten Verfahrens basiert auf der Ableitung der sogenannten "range of continuity", dem Abstandswert (Rangewert), bei dem benachbarte Pixelwerte in einem Untersuchungsfenster nicht mehr miteinander korreliert sind. Das diesem Verfahren zugrundeliegende Prinzip geht auf das geostatistische Variogramm zurück und berechnet sich nach Formel (1) aus der Summe der quadrierten Differenz aller möglichen Wertepaare in einem Datensatz in Abhängigkeit von steigendem Abstandswert und der Richtung der Paarberechnungen (Abb. 1). Das die Richtung berücksichtigt werden kann macht dieses Verfahren besonders gut anwendbar, um Direktionalitäten oder Anisotropien in der Textur zu erfassen und zu vergleichen. Da sich nach Formel (1) für das Variogramm ergibt, daß Variogramme in eine Richtung berechnet identisch mit der Gegenrichtung sind, können Anisotropien im Datensatz mit nur wenigen direktionalen Variogrammen abgebildet werden. Dies bedingt bei der Visualisierung eine achsensymmetrische Darstellung der Rangewerte in den unterschiedlichen Himmelsrichtungen (Abb. 2). Um eine vollständige Erfassung des Autokorrelationsverhaltens in den verschiedenen Richtungen zu erhalten, werden Variogramme i.d.R. mit einer bestimmten Richtungstoleranz berechnet, die in der Regel der Winkeldistanz zur benachbarten gerichteten Variogrammberechnung entspricht.

Das Semivariogramm berechnet sich mit h als Abstandswert wie folgt:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^N [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (1)$$

Bisher wurden geostatistische Verfahren in der Fernerkundung selten angewendet. Eine Einführung in das Variogramm in der Fernerkundung kann in CURRAN (1988) nachgelesen werden. Erfolgreich wurde Semivariogrammstatistik bereits durch ST. ONGE (1997) mit MEIS – Datensätzen genutzt, um Forstbestände zu untersuchen..

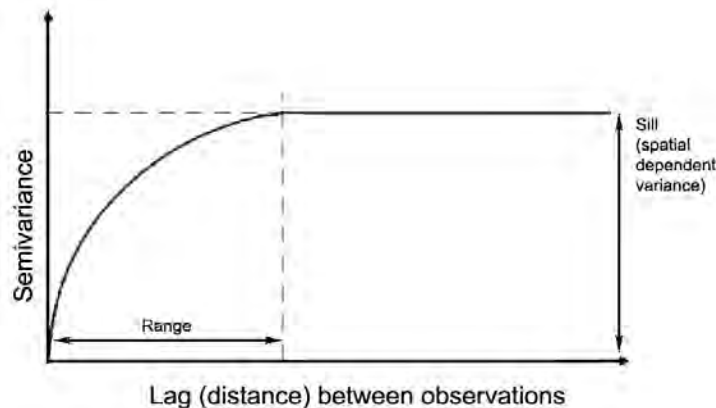


Abb. 1: Das Semivariogramm und die Beschreibungsparameter Sill und Range



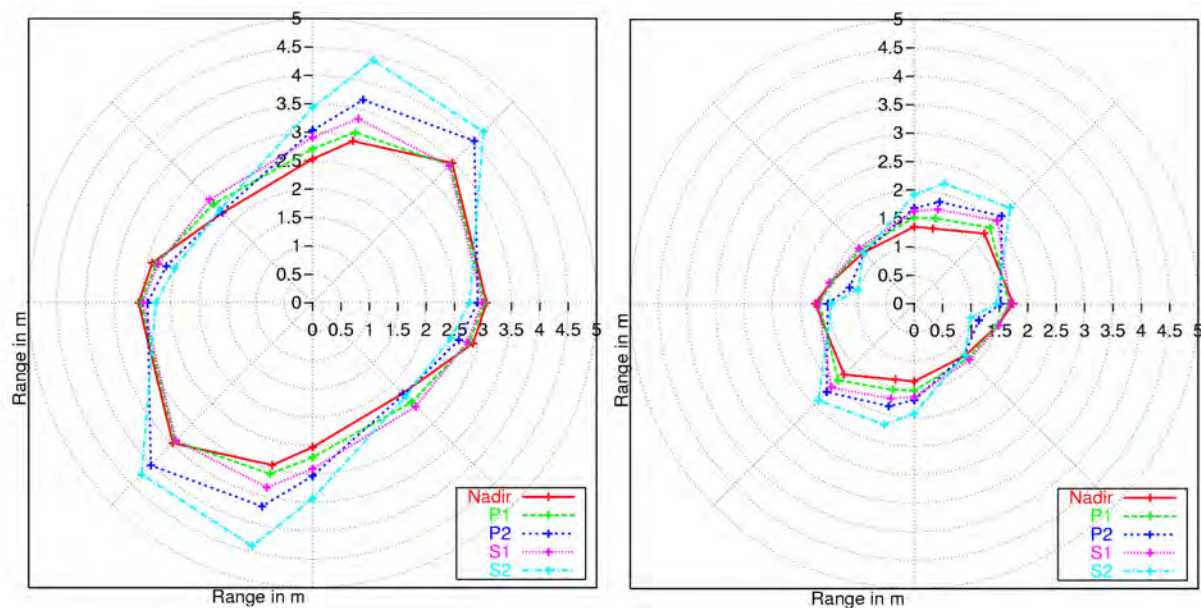


Abb. 2: Polardiagramme: Rangewerte dargestellt für die unterschiedlichen Stereokanäle der HRSC-A in verschiedene Himmelsrichtungen (links: Fichtenbestand-Baumholz, rechts: Fichtenbestand-Stangenholz).

Auch sind in letzter Zeit zur Interpolation von Punktdatensätzen für die Ableitung von Oberflächenmodellen Anwendungen geostatistischer Methoden veröffentlicht worden (Kriging-Interpolation)(DELGADO ET AL. 2000).

Um die Autokorrelationswerte in verschiedenen Richtungen im Datensatz darzustellen und damit die geometrische Anisotropie zu visualisieren, sind Polardiagramme sehr gut geeignet (Abb. 2). Derartige Polardiagramme stellen so die Rauigkeit der Textur in verschiedenen Richtungen dar. Deutlich werden bei den untersuchten Fichtenbeständen (Abb. 2) Anisotropien parallel und rechtwinklig zur Beleuchtungsrichtung (von  $30^\circ$ ) und Veränderungen in der Anisotropie zwischen den einzelnen Stereokanälen der HRSC-A. Besonders hohe Anisotropien sind gut erkennbar in den äußeren Stereokanälen, die mit der Beleuchtungsrichtung orientiert sind (die Stereokanäle S2 ( $18,9^\circ$ ) und P2 ( $12,8^\circ$ )).

Die absoluten Rangewerte der untersuchten Bestände (Fichtenbestand-Baumholz und Fichtenbestand-Stangenholz) lassen sich bereits gut differenzieren und auf die unterschiedlichen Objektgrößen (Kronendurchmesser) im Datensatz zurückführen.

Für die automatische Ableitung der Rangewerte aus einem Datensatz der HRSC-A von Forstbeständen werden die Variogrammberechnungen ausschnittsweise (Moving-Window-Ansatz) für die wichtigen relevanten Hauptrichtungen im Datensatz berechnet (Beleuchtungsrichtung und die Richtung des Objektversatzes in den Stereokanälen (Abhängigkeit von der Flugrichtung)). Die Rücktransformation der Rangewerte in das Rasterformat wird durch Attributierung der originalen Ausschnittskordinaten der Untersuchungsfenster an den Rangewert umgesetzt. Nach der Attributierung können diese Range Merkmale als hochdimensionale Signaturen („Multilayer-Rasterdatensatz“) für ein Klassifikationsverfahren der Bestandsstruktur genutzt werden. So können Merkmalsattributtabelle erstellt werden, die geometrische Information aus den unterschiedlichen Richtungen der einzelnen Stereokanäle beinhalten. Über ein überwacht Verfahren, bei dem bekannte Bestandsbereiche für eine

Ableitung der Signaturen genutzt werden (Training) und bei dem diese dann auf andere Bereiche im Untersuchungsgebiet angewendet werden wird so Bestandsstruktur klassifizierbar.

Erheblich für die Ableitung unterschiedlicher geometrischer Eigenschaften einzelner Fichtenbestandsstrukturen aus den Stereodaten ist eine ausschließlich geometrische Korrektur der HRSC-A Daten und nicht eine Orthoprojektion der Datensätze über ein hochauflösendes Oberflächenmodell. So können die auf die Blickwinkel der Stereokanäle zurückzuführenden Objektgeometrieänderungen, welche die Gesamtgeometrie des jeweiligen Bestands im Bilddatensatz bestimmen, für eine Strukturdifferenzierung und eine Ableitung hochdimensionaler Merkmale erhalten werden. Ein weiterer wichtiger Parameter bei der Ableitung von Variogrammangewerten ist die Ausschnittsgröße des Untersuchungsfensters. Um eine höhere räumliche Dichte der Untersuchungsfenster zu erreichen - die Fenstergröße dabei jedoch nicht zu verringern - ist eine Überlappung der Variogrammberechnungsausschnitte sinnvoll. So sind benachbarte Variogrammangewerte zwar in geringem Maße miteinander korreliert, für die Ableitung der strukturellen Eigenschaften von Forstgebieten ist so jedoch bei höherer Merkmalsdichte eine immer noch repräsentative Ausschnittsgröße gegeben. Bei zu klein gewählten Untersuchungsfenstern steigt die Variabilität der Rangewerte innerhalb eines Bestands stark an. Bei den resultierenden Klassifikationsergebnissen für unterschiedliche Fichtenbestandsstrukturen werden Zuordnungsgenauigkeiten von 75% bis 95% erreicht (Abb. 3), wenn homogene Bestände untersucht werden. Gemischte Bestände können jedoch nur bedingt genau erfasst werden, da die strukturelle Variabilität zu einer starken Überlappung der geometrischen „Range“- Signaturen führt. Da sich directionale Eigenschaften in einem HRSC-A Datensatz auch in anderen Teilen der Bildinformation wiederfinden lassen, könne derartige Objekte durch directionale Variogrammeigenschaften auch gut erkannt werden.

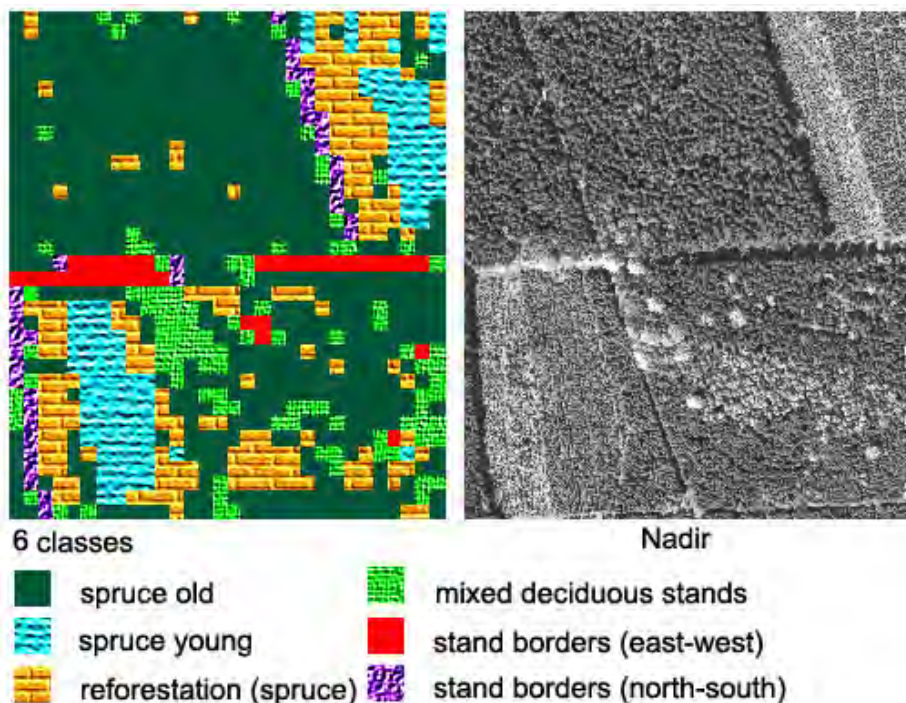


Abb. 3: Klassifikationsergebnisse von Fichtenbestandsstrukturen durch 12 directionale Semivariogramm „Range“- Parameter aus Stereodaten der HRSC-A.

So sind Schattenbereiche z.B. an Bestandsgrenzen durch Rangeparameter gut erfaßbar, wenn die Richtung dieser Strukturen bekannt ist (Abb.3) und die entsprechenden Variogramm-berechnungsrichtungen so berücksichtigt werden können. Denkbar ist auch eine Ableitung von Bestandsregionen über ein „region growing“ der Rangewerte und anschließendes Flächen-Thresholding, wenn die Bestände in einem hohen Maße homogene Eigenschaften haben (HESE 2001).

## 3.2 GIS Integration

Ziel der Variogramm Textur Klassifikation (VTC) ist die Ableitung von Bestandsstruktureigenschaften. Durch die Empfindlichkeit des Verfahrens für strukturelle Bestandsdiversität ist jedoch auch die Erfassung dieser Variabilität denkbar. Dafür ist die Verschneidung mit externen Datenformaten sinnvoll (z.B. Bestandsabgrenzungen aus der Forsteinrichtung).

Um die Anwendung des vorgestellten Verfahrens in diesem Rahmen zu ermöglichen, wird eine Integration in das Geoinformationssystem GRASS (Geographic Resources Analysis Support System) (NETELER 2000) vorgenommen. GRASS ist ein Open Source Geoinformationssystem mit Schwerpunkt auf Raster-GIS Funktionalitäten.

In GRASS können sowohl Vektordatensätze genutzt werden als auch gängige Datenformate (e00) exportiert werden. Die Integration der bestehenden Variogramm Texturparameterableitung wird durch die Anbindung an das GRASS Raster Importprogramm „r.in.ascii“ umgesetzt. Dafür werden die ASCII Attributtabelle mit den Variogrammrangemerkmalen konvertiert und einem GRASS ASCII-Header nachgestellt.

Nach dem Import liegen so Rasterdatensätze mit Rangewerten im ursprünglichen x-y-Koordinatensystemen vor, die in GRASS durch überwachte Klassifikation der Rangewerte oder durch Berechnung zonaler Funktionen für eine Bestandsdiversitätsuntersuchung unter Verwendung externer Informationen über die Bestandsgrenzen genutzt werden können. Interessant stellt sich in diesem Zusammenhang die Nutzung der Variogrammtexturerfassung zusammen mit Methoden, die für die Untersuchung der „Landschaftsstruktur“ (auch: „Landscape Metrics“) konzipiert wurden dar (Abb. 4). Hier sind besonders die Programme der „r.le-Gruppe“ (BAKER 1999) innerhalb von GRASS für eine kombinierte Anwendung nutzbar.

## 4 Zusammenfassung

Durch richtungsabhängige Variogrammtexturparameter können in hochauflösenden Stereozeilenscannerdaten der Art der HRSC-A (High Resolution Stereo Camera –Airborne) wichtige Informationen über die Bestandsstruktur von Forstgebieten abgeleitet werden. Aufgrund der veränderten geometrischen Abbildung von Beständen unter Blickwinkeln lassen sich wichtige differenzierende Merkmale ableiten. Die so gebildeten Signaturen können für eine Bestandsklassifikation genutzt werden. Wichtige Voraussetzung ist die Verwendung nur lagekorrigierter Datensätze (ohne Orthoprojektion) und Kenntnisse der Beleuchtungs- bzw. Flugrichtung. Mit den entsprechenden Winkelinformationen können so gerichtete Variogramme berechnet werden, die die Anisotropie der Forstbestandstextur in den HRSC-A Bilddatensätzen wiedergeben.

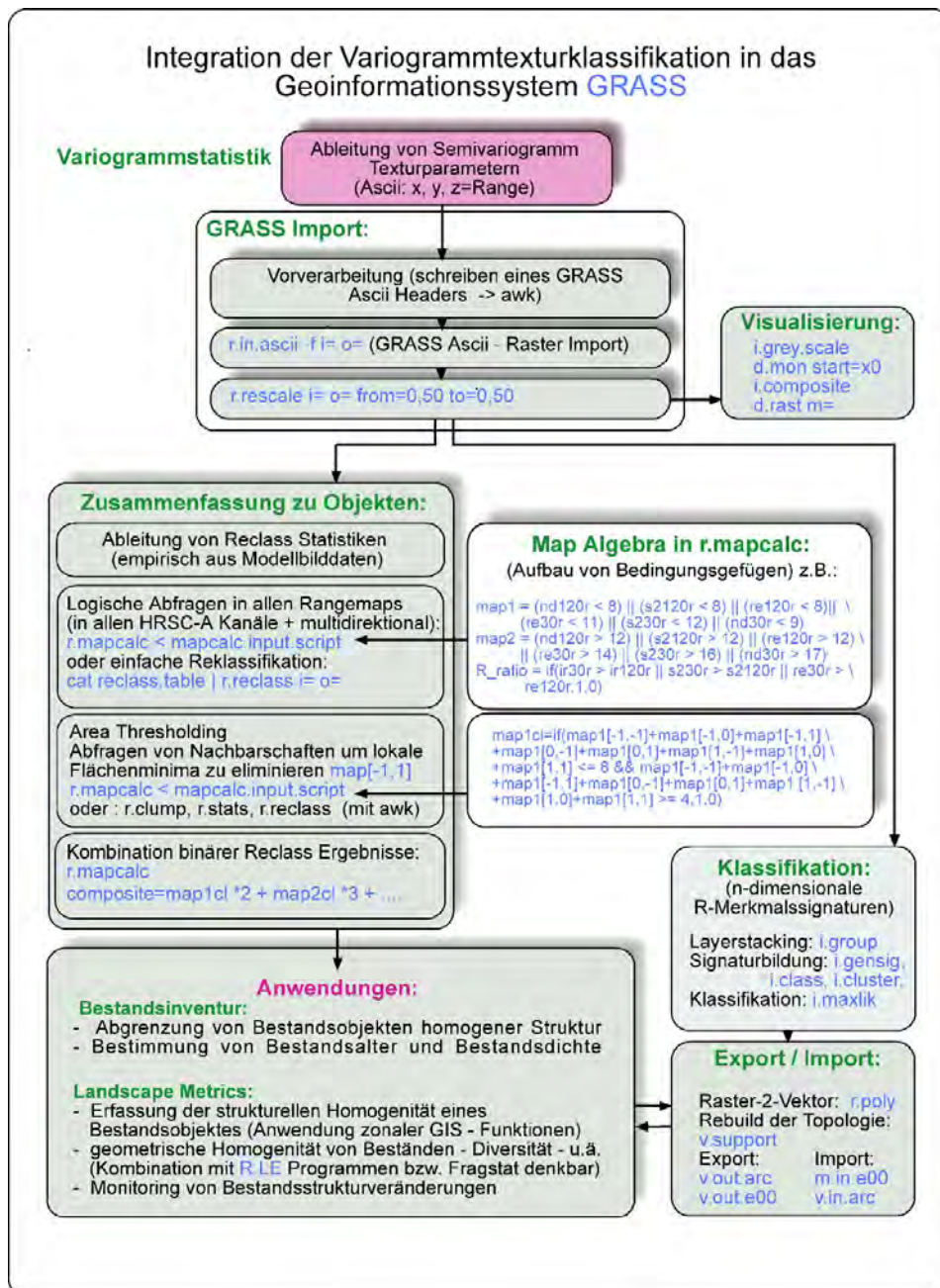


Abb. 4: Modell einer Integration der Variogramm Texturklassifikation (VTC) in das Geoinformationssystem GRASS (Geographic Resources Analysis Support System).

Durch die Integration des Verfahrens in das Geoinformationssystem GRASS lassen sich externe Informationen über Bestandsgrenzen nutzen, um die strukturelle Diversität über die Variabilität der Texturparameter des Variogramms abzuleiten. Besonders interessant ist die Methode des vorgestellten Verfahrens jedoch aufgrund der Nutzung der Multiblickwinkeleigenschaften der Stereodaten der HRSC-A. Bereits SCHNEIDER & MANAKOS (2000) und BARNESLEY ET AL. (1997) haben die Multiwinkeleigenschaften als mögliches Merkmal zur Verbesserung von Klassifikationen genutzt. Derartige Ansätze sind bisher in der Fernerkundung selten umgesetzt worden, ergeben jedoch mit den sehr neuartigen Datensätzen der HRSC-A neue methodische

Möglichkeiten. Dies wird in einem hohen Maße unterstützt durch den sehr geringen Öffnungswinkel des HRSC-A- Systems in across-track-Richtung und parallelperspektivische Abbildung along-track. So ist gewährleistet, daß Strukturen der Landoberfläche in den einzelnen Stereo- und Multispektralkanälen mit konstanter Geometrie aufgenommen werden. Blickwinkel bedingte Objektverkippen, die vom Luftbild bekannt sind, entstehen in HRSC-A Daten nur in den entsprechenden Stereodatensätzen jedoch mit sehr konstanter Geometrie. So kann die blickwinkelbedingte Texturveränderung direkt als Merkmal genutzt werden.

## 5 Literaturverzeichnis

- BAKER, W.L., 1999. The r.le program users guide, GRASS 4.3 (Geographic Resources Analysis Support System) Dokumentation.
- BARNESLEY, M.J., ALLISON, D., LEWIS, P., 1997. On the information content of multiple view angle (MVA) images, *Int. Journal of RS*, Vol.18, No.9, S. 1937-1960.
- CURRAN, P., J., 1988. The Semivariogram in Remote Sensing: An Introduction, *Remote Sensing of Environment*, 24, S. 439-507.
- DELGADO, J., CARDENAL, J., GOMEZ, A., 2000. On the use of the geostatistical estimation techniques to the generation, debugging and analysis of digital surface models, *IAPRS XXXIII*, Part B4, Amsterdam 2000.
- GOUGEON, F.A., 1994. Comparison of possible Multispectral classification schemes for tree crown individually delineated on high spatial resolution MEIS images, *Canadian Journal of Remote Sensing* 11, 1994.
- HAY, G.J., NIEMANN, K.O., MCLEAN, G.F., 1996. An Object-Specific Image-Texture Analysis of H-Resolution Forest Imagery, *Remote Sensing of Environment*, 55, S. 108-122.
- HESE, S., 2001. Segmentation of Forest Stands in very High Resolution Stereo Data, *IGARSS 2001*, Sydney, Australia.
- NETELER, M., 2000. *Grass-Handbuch, Der praktische Leitfaden zum Geographischen Informationssystem GRASS*, *Geosynthesis* 11, *Physische Geographie und Landschaftsökologie*, Universität Hannover.
- SCHNEIDER, T., MANAKOS, I., 2000. Anisotropie der Rückstrahlung – Störfaktor oder Informationsquelle? Erörterungen anhand des Beispiels “precision farming”, *Referat der GIL-Jahrestagung in Freising – Weihenstephan 2000*, *GIL*, Band 13, S. 187-190.
- SCHNEIDER, T., DE KOK, R., BUCK, A., MANAKOS, I., 2000. Objektorientierte Bildanalyse – Paradigmenwechsel in der thematischen Auswertung von Erdbeobachtungsdaten? *Festschrift zur Emeritierung von Prof. Dr. U. Ammer, Lehrstuhl für Landnutzungsplanung und Naturschutz (Hrsg.)*, TU München, Freising, Deutschland, S. 234-258.
- ST-ONGE, B., CAVAYAS, F., 1997. Automated Forest Structure Mapping from High Resolution Imagery Based on Directional Semivariogram Estimates, *Remote Sens. Environ.*, 61, S. 82-95.
- WEWEL, F., SCHOLTEN, F., NEUKUM, G., ALBERTZ, J., 1998. Digitale Luftbildaufnahmen mit der HRSC – Ein Schritt in die Zukunft der Photogrammetrie, *PFG* 6/1998, S. 337-348.
- WEWEL, F., SCHOLTEN, F., GWINNER, K., 2000. High Resolution Stereo Camera (HRSC) – Multispectral 3D-Data Acquisition and Photogrammetric Data Processing, *CJoRS*, Vol.26, No.5, 10.2000.

# Das Projekt CIRSTEN: Kartierung von Naturkatastrophen mit optischen und SAR Fernerkundungsdaten

M. HONIKEL<sup>1</sup>, U. WEGMÜLLER<sup>2</sup>, A. WIESMANN<sup>2</sup>

*Übersicht: Bei der Aufzeichnung von grossräumigen Naturkatastrophen spielen Zeit, Genauigkeit und Vollständigkeit der Erfassung von Daten eine wichtige Rolle für die Einleitung von Massnahmen. Satellitendaten bieten sich für eine erste Sichtung der Schäden an, um Ausmass und Ort der Katastrophe zu kartieren, da diese Informationen über einen Ort in unterschiedlicher räumlicher und zeitlicher Auflösung fast ständig zur Verfügung stehen.*

*Anhand der Schäden des verheerenden Orkans Lothar, der Ende 1999 weite Teile Westeuropas verwüstete, wurde die Operationalität einer Schadenserfassung mit SAR und optischen Fernerkundungsdaten getestet. Zur Detektion der Schäden wurden ERS-1/2 SAR Daten verwendet, da entsprechende Daten von der Schweiz bereits wenige Tage nach Lothar verfügbar waren. Es zeigte sich, dass sich diese hervorragend für eine Detektion von Schäden im mittleren Massstab eignen. Es war dadurch möglich, bereits zwei Wochen nach dem Sturm eine Schadenskarte anzufertigen, die ein Gebiet von etwa 10.000km<sup>2</sup> abdeckte. Die Genauigkeit der Detektion von grossflächigen Schäden lag bei 89%. Gleichzeitig wurde mit optischen und SAR Satellitendaten mehrere digitale Geländemodelle gemessen und fusioniert. Der absolute Fehler nach der Fusion lag in voralpinem Gelände bei sehr guten 4-5m.*

## 1. Einleitung

Das Projekt CIRSTEN (Combined Remote Sensing Natural Disaster Monitoring), gemeinsam durchgeführt vom Institut für Geodäsie und Photogrammetrie der ETH Zürich und Gamma Remote Sensing, ging am 1.1.2000 an den Start. Ziel ist es, auch im Hinblick auf die neue Generation von hochauflösenden Satelliten, Techniken zu entwickeln mit denen aus Satellitenbildern Ausmass und Ort von Naturkatastrophen detektiert und kartiert werden können. Diese Techniken sollen anhand realer Ereignisse getestet werden, um deren Operationalität zu belegen.

Der Projektstart fiel fast zeitgleich mit dem verheerenden Sturm Lothar, der weite Teile Westeuropas verwüstete. In der Schweiz entstanden hierdurch Sachschäden im Wert von mehreren Milliarden Franken. Insbesondere der Wald war betroffen: Grosse Waldgebiete wurden abgeholzt, ein Teil der Kantone verzeichnete einen Windwurf von bis zum Zehnfachen des normalen Jahreseinschlags. Das Ausmass der Schäden war so gross, dass sie selbst von gängigen Satellitensystemen mittlerer Auflösung erfasst werden konnten. Es war daher naheliegend unsere vorgeschlagene Methode zur Detektion und Kartierung von Katastrophen an einem Testdatensatz der betroffenen schweizerischen Gebiete zu erproben und weiterzuentwickeln. Zur Detektion kamen Radar Satellitendaten zum Einsatz, da entsprechende Daten von der Schweiz bereits zwei Wochen nach Lothar verfügbar waren. Es zeigte sich, dass sich diese durch geeignete Prozessierung hervorragend für eine Detektion von Schäden im mittleren Massstab eignen. Es war dadurch möglich, bereits wenige Wochen nach dem Sturm eine

---

<sup>1</sup>Marc Honikel, Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, ETH Zürich, CH 8093 Zürich.  
email: mhonikel@geod.baug.ethz.ch

<sup>2</sup>Dr. Urs Wegmüller, Dr. Andreas Wiesmann, Gamma Remote Sensing, Thunstr. 130, CH 3074 Muri. email: gamma@gamma-rs.ch

Schadenskarte anzufertigen, die ein Gebiet von etwa 10.000km<sup>2</sup> abdeckte. Der Schwerpunkt unserer Untersuchungen bildete hierbei der Kanton Bern, der sehr stark vom Sturm betroffen war (Abb. 1, 2).

Schadensdetektion, also die thematische Auswertung der Bilder, stellte nur ein Projektziel dar. Zusätzlich gilt es, die thematische Information von der Bildgeometrie (Pixelkoordinaten) in eine geeignete kartographische Projektion (z.B. Landeskoordinaten) zu transferieren um sie im Kontext bestehender Datenbasen interpretieren zu können. Das hierfür benötigte Geländemodell lässt sich ebenfalls aus den verwendeten optischen und SAR Satellitendaten erzeugen. Leider weisen beide Verfahren Schwächen auf, so dass die Genauigkeiten der so erzeugten Geländemodelle sind nicht immer für eine Entzerrung der Bilder ausreichend sind. Es wurde untersucht wie sich durch Fusion der Geländemodelle individuellen Schwächen zumindest mindern lassen um so Geländemodelle in ausreichender Genauigkeit zu erzeugen.

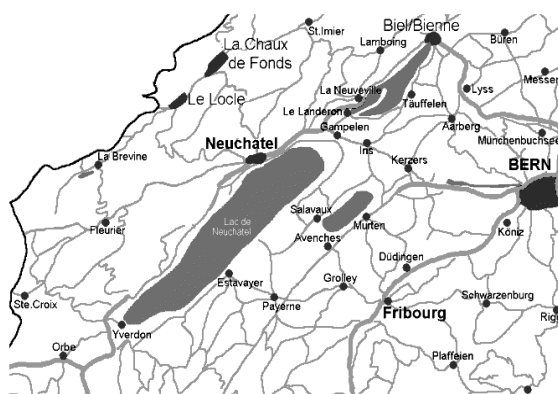


Abb. 1.: Schwerpunkt der Untersuchungen bildete die Westschweiz. Später kamen noch Gebiete in Frankreich hinzu.

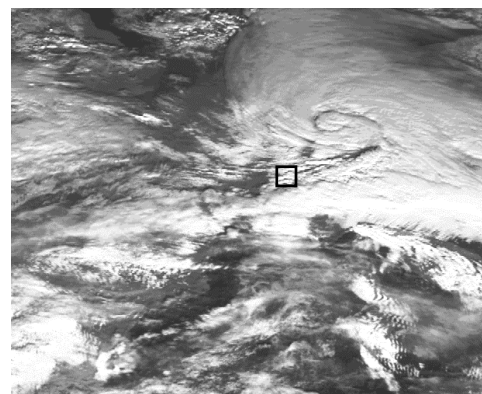


Abb. 2: Wetterlage in Mitteleuropa um 12 Uhr am 26.12.1999 (EUMETSAT). Um diese Zeit erreichte der Sturm die Schweiz. Testgebiet (Abb. 1.) ist angedeutet.

## 2. Methoden

### 2.1 Hintergrund

Zur Erfassung von Naturkatastrophen bieten sich SAR Sensoren an, da sie im Vergleich zu optischen Systemen über eine weitaus höhere zeitliche Auflösung verfügen, bedingt durch die Tatsache, dass sie zeit- und wetterunabhängig bei praktisch jedem Überflug Informationen liefern. Aufgrund ihrer monochromatischen Eigenschaften gelten SAR Bilder als weniger aussagekräftig. Hinzu kommt, dass die SAR Amplitude nur relativ wenig auf Änderungen des lokalen Rückstreuverhaltens reagiert, was zusätzlich den Einsatz für die Änderungsdetektion erschwert. Durch den Start des ERS-1 Satelliten waren erstmals regelmässig, in relativ kurzen Abständen, SAR Daten verfügbar, die den Einsatz einer damals relativ neuen Technik, der SAR Interferometrie, vereinfachten. Mit der Interferometrie lässt sich die Position eines Rückstreuelements über eine Entfernungsmessung bestimmen. Benötigt werden hierzu zwei Aufnahmen, die von einer geringfügig unterschiedlichen Position aufgenommen wurden. Die Aufnahmen werden hierzu registriert und anschliessend wird der Phasengradient ermittelt. Verändert sich zwischen den Aufnahmen die Rückstreugeometrie eines Bodenauflosungselements, sinkt mit der Kohärenz des Phasenwertes auch die Genauigkeit dieser Phasenmessung. Geringe Kohärenz stellt ein grosses Problem für die SAR Entfernungsmessung und Geländemodellgenerierung speziell mit kurzen Wellenlängen dar, bietet sich aber gleichzeitig ausgezeichnet für eine Änderungsdetektion an.

## 2.2 Änderungsdetektion mittels SAR Interferometrie

Die Kohärenz wurde wiederholt zur Landnutzungsklassifikation speziell von Wald verwendet (WEGMÜLLER, 1995). Sie sinkt mit steigender Volumenstreuung im Auflösungselement und, wie bereits angesprochen, mit der zeitlichen Veränderung des Rückstreuquerschnitts zwischen den Aufnahmen. Zusammen mit dem stabilen Amplitudenverhalten lässt sich damit z.B. Wald sehr gut klassifizieren. Wald besitzt eine relativ geringe Kohärenz von etwa 0.3 und einem Rückstreukoeffizienten von -8 bis -12dB. Beide Werte Verhalten sich zwischen zwei Aufnahmen sehr stabil, unterliegen jedoch natürlichen Schwankungen, die eine wirkungsvolle Waldänderungsdetektion mit einem interferometrischen Bildpaar, eines vor und eines nach einer Katastrophe, erschweren würde. Abbildung 3 zeigt ein Bild für die Landklassifikation, das für die einzelnen Bänder die temporalen Rückstreuereigenschaften ausnutzt. Für eine RGB Kodierung (z.B. zur Landnutzungsklassifikation) werden die Kanäle wie folgt belegt: Rot: Kohärenz. Grün: Gemittelte Rückstreuungsamplitude der Szenen. Blau: Änderung der Rückstreuung

Auf der anderen Seite bedeutet ein Waldschaden eine wesentliche Veränderung in der Rückstreugeometrie. Die Verringerung der Höhe der Vegetation, einhergehend mit der Verringerung der Volumenstreuung, und der Beseitigung stark veränderlicher Rückstreuer (Äste, Zweige etc.) sind Voraussetzung für eine hohe Kohärenz zweier Aufnahmen *nach* einer Abholzung. Damit stellt sich die Vorgehensweise für eine Detektion von Veränderungen wie folgt dar: Die Kohärenz eines Bildpaares *vor* dem Schadensereignis wird ausgewertet und dient als Referenz für die Kohärenz *nach* dem Ereignis, die im Falle einer Änderung höher sein wird. Um die natürlichen Schwankungen zwischen den Paaren so gering wie möglich zu halten, sollten die Zeit zwischen den Überflügen möglichst kurz gewählt werden. Die ERS-1/2 Tandem Mission mit ihrem kurzen Intervall von nur einem Tag bietet sich hierfür an.

Mit diesem Verfahren ist es nun möglich für ein vergleichsweise grosses Gebiet, ein ERS full frame umfasst eine Fläche von  $100 \times 100 \text{ km}^2$ , die Dynamik der Kohärenz zu erfassen und sie einem Schadensfall zuzuordnen. Die Pixelgrösse von den benötigten ERS SLC (single look complex) Daten beträgt hierbei etwa 20m.

Abbildung 4 zeigt einen Ausschnitt aus einem so ausgewerteten ERS Frame in der Westschweiz. Waldschäden, hervorgerufen durch den Orkan Lothar werden durch eine geeignete Farbkodierung hervorgehoben und geben einen guten Schadensüberblick im mittlerem Massstab (Rot: Gebiete mit gesteigener Kohärenz nach dem Sturm, Grün: Gemittelte Amplitude vor dem Sturm, Blau: Kohärenz vor dem Sturm).

Vor der Auswertung mit bestehenden Datenbasen müssen die durch ihre Aufnahmegeometrie stark verzerrten SAR Bilder entzerrt werden.

## 2.3 Fusion von stereo-optischen und InSAR DGMs

Neben der reinen Orthobildgenerierung werden Digitale Geländemodelle (DGM) für eine ganze Reihe von Anwendungen der Naturkatastrophenüberwachung benötigt. Hydrologie und Tektonik seien hier als Beispiele erwähnt. In den seltensten Fällen kann man von einem existierenden DGM in ausreichendem Massstab und ausreichender Genauigkeit ausgehen. Bei der Grösse der mit einer Fernerkundungsszene abgedeckten Fläche kommt noch der finanzielle Aspekt hinzu.



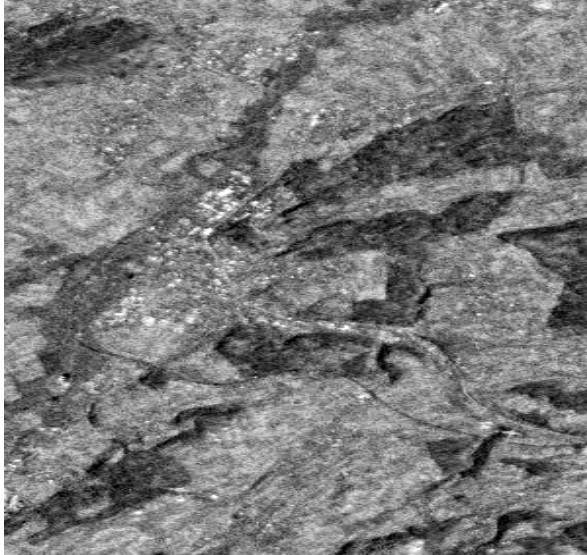


Abb. 3: Multitemporales SAR Bild (original RGB) zur Landnutzungs-klassifikation. Auch im Graustufen Modus lassen sich verschiedene Klassen noch zu unterscheiden (z.B. Wald, Stadt, Strassen)

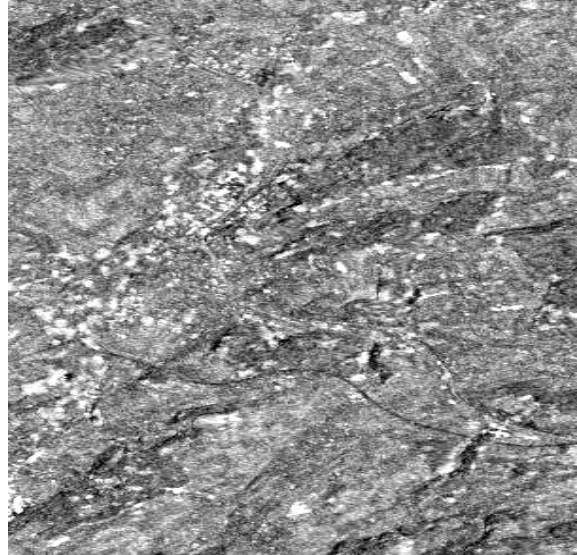


Abb. 4: Waldschadensdetektion mit der vorgeschlagenen Methode über dem selben Gebiet wie in Abb. 1.. Deutlich heben sich Gebiete mit gesteigener Kohärenz nach dem Sturm ab.

Um bei der Katastrophenaufzeichnung möglichst unabhängig von einer bestehenden Datenbasis zu sein, bietet sich eine grossmassstäbliche DGM Generierung mit Satellitenfernerkundungsdaten an. Mit der photogrammetrischen Methode, bis heute überwiegend mit den französischen SPOT Satelliten durchgeführt, erreicht man im Normalfall absolute Genauigkeiten von 0.75-1.5 x Pixelgrösse (SPOT PAN: 10m) (BALTSAVIAS 1999). Genauigkeit und Anzahl der gemessenen Punkte hängt vom Basis-Höhe Verhältnis und dem Zeitraum zwischen den Aufnahmen ab. Oftmals können aber grosse Gebiete mangels (ähnlicher) Textur etc. nicht gemessen werden und es entstehen inakzeptabel grosse Lücken im DGM. Wolkenbehang macht vielerorts eine Messung ganz unmöglich.

Wie bereits angesprochen, eignet sich die SAR Interferometrie zur 3D Lokalisierung eines Punktes an der Erdoberfläche und damit zur Geländemodellgenerierung. Sie stellt hinsichtlich Verfügbarkeit, Anzahl und Genauigkeit der Messungen und Automatisierung (und damit Preis) theoretisch eine echte Alternative zur traditionellen photogrammetrischen Geländemodellgenerierung in diesem Massstab dar. Laufzeitmessverfahren wie die SAR Interferometrie haben jedoch einige schwerwiegende Nachteile.

1. Für eine Messung der Entfernung Sensor-Objekt benötigt man eine hochgenaue Positionsbestimmung des Sensors. Für den ERS Sensor liegt diese Genauigkeit zwischen 0.5-1cm (ZEBKER, 1994) und ist selbst mit den besten Orbitdaten des Sensors (5-10cm) nicht zu erreichen. Zur Verbesserung bedient man sich Passpunkten, die jedoch selten in dieser Genauigkeit verfügbar sind. Mangelnde Genauigkeit der Sensorposition führt zur Verkantung des Geländemodells.
2. Repeat pass Interferometrie setzt gleichbleibende Bedingungen für die Signalausbreitung durch die Atmosphäre voraus. Verändern sich die jedoch die atmosphärischen Bedingungen zwischen den Überflügen führt dies zu Topographie unabhängigen Laufzeitänderungen und somit zu einem systematischen planimetrischen und altimetrischen Messfehler. Eine eingehende Beschreibung befindet sich in ZEBKER (1996). Leider beschränkt sich dieses Phänomen nicht nur auf humide Gebiete, sondern wurde ebenfalls über Wüstengebieten registriert (GOLDSTEIN 1995, MASSONNET 1995).
3. Auf den Zusammenhang zwischen temporalen Veränderungen an der Oberfläche und der Messgenauigkeit wurde bereits eingegangen. Diese Veränderungen bedingen im Interfe-

rogramm auch eine Zunahme des Rauschens und erschweren damit die Lösung der Phasemehrdeutigkeit (phase unwrapping). Unwrapping ist notwendig um den kontinuierlichen Verlauf der Phase zu bestimmen, da diese nur im Bereich  $0-2\pi$  gemessen werden kann. Als Folge dieser Veränderungen kann in solchen Gebieten im Interferogramm die Höhe nicht oder nur ungenau bestimmt werden.

Aus den dargestellten Gründen erreichen interferometrische DGMs nur selten höhere Genauigkeiten als die optischer Systeme. Hinzu kommt, dass steile Gebiete vom Sensor nicht aufgelöst werden. Eine Fusion mit optischen Messungen ist jedoch nur sinnvoll, wenn diese, teilweise systematischen, Probleme gelöst sind.

HONIKEL (2001) zeigt, dass sich alle genannten Effekte auf die SAR Interferometrie durch den Einsatz eines bestehenden Geländemodells auch von geringerer Rasterweite und Genauigkeit schon während der Messung weitgehend beseitigen lassen. Verkantungen des SAR DGM, hervorgerufen durch fehlerhafte Bestimmung der Basislinie, werden durch eine kompensierende Ebene beseitigt. Atmosphärische Deformationen im DGM werden während der Prozessierung durch Polynome kompensiert, die den niederfrequenten Charakter dieser Störung approximieren. Auch für das phase unwrapping in verrauschten Gebieten wurde eine Lösung vorgeschlagen. Sie bedient sich einer Signalschätzung, basierend auf dem Wiener Verfahren. Hierdurch wurde es möglich, die wesentlichen Fehlerursachen der SAR Interferometrie zu beseitigen und nach Fusion mit den optischen Messungen sehr genaue Geländemodelle zu erzeugen.

### 3. Ergebnisse der Lothar Auswertung

#### 3.1 Daten

Zwei ERS Tandem Bildpaare, eines vor und eines nach dem Orkan wurden zur Auswertung verwendet. Das Gebiet deckt die Westschweiz von Basel bis zum Neuenburger See ab (Abb. 1). Während die ERS Daten schon kurz nach der Katastrophe verfügbar waren, konnten optische Daten von Landsat erst im März mit ausreichend geringer Wolkenbedeckung geordert werden. Die Landsat Daten, sowohl multispektral (MS) als auch panchromatisch (Pan), wurden in erster Linie zur Validierung und Visualisierung der Resultate der Schadensauswertung eingesetzt, eigneten sich jedoch auch zum Auffüllen der SAR Daten in steilem Gelände.

Sensor	ERS-1/2	Landsat	SPOT
Pixelgrösse, Modus	20m, SLC	30m, MS; 15m, Pan	10m, Pan
Ausgewertete Fläche Schaden	100x100km <sup>2</sup>	210x180km <sup>2</sup>	
DGM CH	120km <sup>2</sup> (25m Raster)		120km <sup>2</sup>
DGM ES (2x)	30x25km <sup>2</sup> (30m)		60x60km <sup>2</sup>
Datum (Schaden)	9./10.1.2000 26./27.11.1995	28.3.2000	
Datum (DGM CH)	26./27.10.1995		20.7./27.8.1988
Datum (DGM ES)	9./12.9.1991		3./7. 9. 1986

Tabelle 1: Spezifikation der verwendeten Daten

Für die DGM Generierung kamen SPOT und ERS Daten zum Einsatz. Die Ergebnisse der Fusion der Daten eines Testgebietes aus der Schweiz und Spanien dienten zu Demonstration der

Methode, da wir für die Entzerrung der thematischen Ergebnisse Zugriff auf das nationale DHM mit 25m Rasterweite hatten. Einzelheiten zu den Daten zeigt Tabelle 1.

### 3.2 Ergebnisse der Schadenserfassung

Mit der in 2.2 vorgestellten Methode war Mitte Januar eine Schadenskarte für das gesamte Gebiet erstellt. Da zu diesem Zeitpunkt noch keine schweizweite Schadenserhebung durchgeführt worden war, mussten die Ergebnisse durch Ortsbegehungen anhand der Schadenskarte validiert werden. In allen begangenen Gebieten (Lyss, Bern, Treiten) wurden die Ergebnisse bestätigt. Es sei angemerkt, dass die ERS Schadenskarte zu diesem Zeitpunkt (Mitte Januar) wahrscheinlich die einzige grossflächige zusammenhängende Schadensinformation in der Schweiz war. Befliegungen fanden im erst im Verlauf des Jahres 2000 statt. Die Luftbilder und die bis dahin ebenfalls verfügbaren optischen Satellitenbilder bestätigten noch einmal eindrucksvoll die ERS Ergebnisse (Abb. 5, 6).

Eine quantitative Auswertung fand mit Hilfe von Luftbildern als Referenz in den französischen Gebieten um Corrèze und später Rambouillet statt. In Corrèze wurde aus 68 Luftbildern der Schaden durch manuelle Interpretation erhoben. Beim Vergleich erzielte die automatische Methode mit ERS eine statistische Genauigkeit bei der Detektion von grossflächigen Schäden von 89% und bei der Detektion der Gesamtheit aller Schäden immer noch 68% (WIESMANN, 2001).

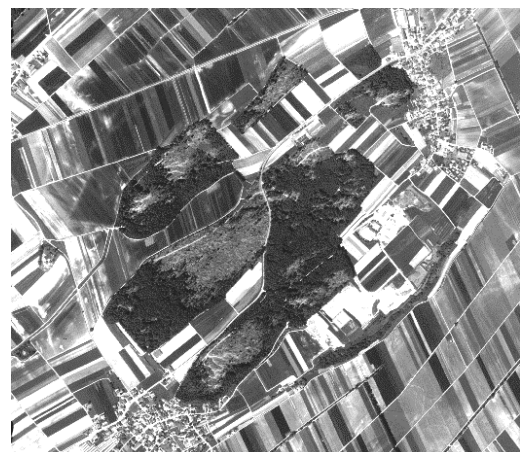
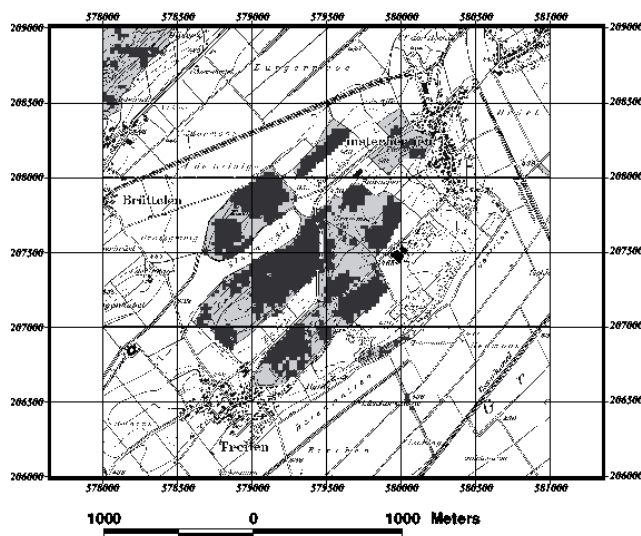


Abb. 5: Resultat der Auswertung (Beispiel). Schadenskarte bestehend aus beschädigtem Waldgebiet (dunkel) und nationaler Pixelkarte (© Bundesamt für Landestopografie).

Abb. 6: Luftbild des Gebietes von Abb. 1 (Massstab 1:17.000). Die klar erkennbaren Schäden bestätigten die ERS Ergebnisse.

### 3.3 Geländemodellgenerierung

Zur Evaluation der DGM Fusion wurden bewusst für beide Sensoren anspruchsvolle Gebiete und Umstände gewählt. In der Schweiz wurde das Gebiet des Landeskartenblatts 1224 (Moudon) zur Validierung benutzt. Voralpines Terrain mit starker Landwirtschaftlicher Nutzung zeichnet das Gebiet aus. Markante Gebiete sind eine Schlucht entlang der Broye im Westen und das Vorgebirge Les Alpettes mit einer maximalen Höhe von 1412m im Südosten. Bedingt durch die grossen temporären Unterschiede der SPOT Szenen hervorgerufen durch das lange

Überflugintervall, wies das resultierende DGM grosse Lücken auf. Die absolute Genauigkeit lag bei 11.8m. Hinzu kamen schwerwiegende extreme Fehler. Das gebirgige Gelände sorgte für Probleme mit der Phasenabwicklung beim ERS Tandem Paar, auch wenn die verwendete Basislänge mit 100m dem Gelände angepasst war. Da aus den oben genannten Gründen ein „flattening“, also eine Differenzbildung zwischen Interferogramm und simulierten Phasen vom SPOT DGM, nicht in Frage kam, wurden die unter 2.3 genannten Methoden eingesetzt um eine möglichst hohe Messdichte beim ERS DEM zu erreichen. Die Phasenabwicklung wurde in kritischen Gebieten mit einer Wiener Signalschätzung basierend auf den Näherungswerten vom SPOT DEM durchgeführt. Aufgrund mangelnder Passpunktqualität musste der Baselinefehler in DGM ausgeglichen werden. Die resultierende Verkantung wurde mit dem SPOT DGM als Datum ausgeglichen. Im spanischen Datensatz minderten zusätzlich schwerwiegende Deformationen durch atmosphärische Einflüsse die Qualität des ERS DGMS. Auch diese konnten mit Hilfe des optischen DGMS beseitigt werden. Nachdem die InSAR Probleme gemildert waren, wurden optische und SAR Messungen in beiden Testgebieten mit der Methode der kleinsten Quadrate ausgeglichen. Eine ausgiebige Beschreibung der Vorgehensweisen befindet sich in HONIKEL (2001).

Die Ergebnisse sind für beide Testgebiete in Tabelle 2 festgehalten. Die Messfehler wurden durch Vergleich mit den Referenzdaten ermittelt. Da es sich bei den Referenzen in beiden Fällen um DHMs handelte, wurden bei den Vergleichen zwischen allen Messungen und solchen ohne Einfluss der Vegetation unterschieden (Schweiz: alle Messungen). Der rms Fehler verhielt sich entsprechend.

Im Vergleich zu den ursprünglichen Messfehlern, die beide im Erwartungsbereich lagen, ist eine Senkung des absoluten Fehlers um mehr als 50% festzustellen. Grobe Fehler konnten durch die Redundanz ganz beseitigt werden. Gleichzeitig nahm die Anzahl der gemessenen Punkte in allen Fällen zu. Die Genauigkeit erreichte im schweizerischen Testgebiet fast diejenige der Referenz und liegt im Subpixel Bereich. Trotz ungünstiger Bedingungen im spanischen Testgebiet konnten auch hier sehr gute Ergebnisse erzielt werden, wobei beide Gebiete fast doppelt so gross waren wie das schweizerische.

Gebiet	Schweiz	Spanien 1	Spanien 2
<b>ERS</b>			
Punkte	281'624	514'635 (296'915)	642'730 (201'290)
$\sigma_{\mu}, \sigma_{rms}$ [m]	-2.3, 12.8	0.23, 11.9 (-2.55, 10.9)	0.1, 13.2 (1.0, 10.1)
$\sigma \geq  40m $ [%]	0.9	0.01 (0)	1.0 (0.1)
<b>SPOT</b>			
Punkte	269'725	514'635 (296'915)	694'910, 205'038
$\sigma_{\mu}, \sigma_{rms}$ [m]	2.8, 11.8	0.7, 9.5 (-1.15, 8.8)	1.56, 10.9 (3.1, 8.2)
$\sigma \geq  40m $ [%]	0.97	5.2 (5.5)	4.7 (5.0)
<b>Fusion</b>			
Punkte	257'000	451'837 (269'837)	454'442 (168'258)
$\sigma_{\mu}, \sigma_{rms}$ [m]	0.22, 4.7	-0.15, 5.5 (-0.7, 4.6)	0.03 6.26 (0.5, 5.2)
$\sigma \geq  40m $ [%]	0.29	0 (0)	0 (0)
Tabelle 2: Analyse der Messgenauigkeiten von ERS, SPOT und fusioniertem DGM. In Klammern sind die Werte ohne Einfluss der Vegetation (reiner Höhenvergleich mit DHM) angegeben.			

## 4. Zusammenfassung und Ausblick

Die Ergebnisse nach einem Jahr CIRSTEN sind sehr positiv zu bewerten. Es wurde eine Methode entwickelt und getestet, mit der sich Naturkatastrophenschäden automatisch, d.h. rasch und vergleichsweise kostengünstig nach Auftreten des Schadens detektieren lassen. Beim Vergleich mit manuell ausgewerteten Luftbildern erzielte die Methode eine Genauigkeit von ausgezeichneten 89%. Die Methode erfordert im Vergleich zur optischen Auswertung keine manuelle Interaktion. Aufgrund der Pixelgrösse heutiger SAR Systeme sind nur relativ grossflächige Schäden zu erkennen. Ob sich hochauflösende Satellitendaten (wie z.B. von Ikonos 2) für eine detaillierte Waldschadenkartierung eignen, bleibt fraglich, da Luftbilder immer noch wesentlich höher auflösen und sich besser zur Streuschädendetektion eignen. Hinzu kommt der für solche Flächen nicht unerhebliche Preis für die Ikonos Szenen.

Neben der thematischen Genauigkeit, wird bei Bedarf die geometrische Genauigkeit durch Datenfusion optischer und SAR DGMs gewährleistet. Methoden wurden entwickelt, um die Geländehöhe gemeinsam möglichst genau zu erfassen. Die wesentlichen Nachteile der interferometrischen SAR DGMs wurden durch die Verwendung des optischen DGM vermieden, so dass sehr genaue DGMs in mittlerem Massstab gemessen werden können. Gleichzeitig wurden die Probleme der optischen Messung vermindert. Die Methoden zur DGM Fusion wurden ausgiebig getestet. Bei Vergleichen des Produktes mit Referenzdaten wurden hohe Genauigkeiten erzielt. Der absolute Fehler in voralpinen Testgebieten von 4-5m lag dabei nur unwesentlich über dem Bereich der amtlichen Referenzdaten.

Die Arbeit wird von der schweizerischen Kommission für Technologie und Innovation unterstützt (KTI Projekt 4526.1). Alle verwendeten Daten sind urheberrechtlich geschützt. Wir danken dem Bundesamt für Landestopografie für die Bereitstellung der Referenzen, SPOT und Landsat Bilder und dem ICC für den spanischen Datensatz. Alle anderen ERS Daten sind Eigentum der ESA.

## 5. Literaturverzeichnis

- BALTSAVIAS, E., Verfahren und Möglichkeiten der modernen Photogrammetrie zur DTM Generierung, Vortrag auf der Fachtagung "Digitale Geländemodelle: Technologie und Produkte", Universität Zürich-Irchel, Zürich, März, 1999
- GOLDSTEIN, R., Atmospheric limitations to repeat track radar interferometry, *Geophysical Research Letters*, vol.22, no. 18, pp. 2517-2520, Sept. 1995
- HONIKEL M., High-quality spaceborne InSAR DEMs generation for height database update, ISPRS Comm. II/2 Workshop Three-Dimensional Mapping from InSAR and LIDAR, Banff, July 2001
- MASSONNET, D., Rossi, M., Carmona, C. et. al. The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry, *Nature*, Vol. 364, pp. 138-142, July 1993
- WEGMÜLLER, U. and C.L. Werner, SAR interferometric signatures of forest, *IEEE Geosci. Remote Sensing*, Vol. 33, No. 5, pp. 1153-1161, 1995.
- WIESMANN A., Ribbes F., Honikel M., Forest storm damage assessment with ERS Tandem data, submitted to *Intl. J. of Remote Sensing*, 2001.
- ZEBKER, H., Werner, C., Rosen, P., 1994. Accuracy of Topographic Maps Derived from ERS-1 Interferometric Radar, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 32(4), pp. 823-836.
- ZEBKER, H. Rosen, P., Hensley, S., Atmospheric artifacts in interferometric SAR surface deformation and topographic maps, *Journal Geophys. Res.* 102, 7547, 1997

# Der Einsatz der Nahbereichsphotogrammetrie beim Aufbaus des CMS-Detektors am CERN

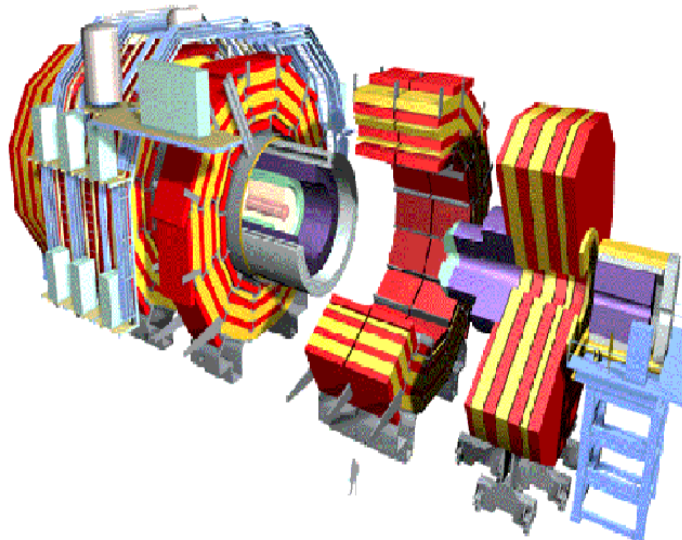
JEAN-CHRISTOPHE GAYDE, RAPHAEL GOUDARD, CÉLINE HUMBERTCLAUDE,  
CHRISTIAN LASSEUR, DIRK MERGELKUH<sup>1</sup>

*Zusammenfassung: Am CERN wurde im Zuge der Konstruktion des LHC (Large Hadron Collider), einem 27 km langen Teilchenbeschleunigerprojekt am CERN, ein photogrammetrisches System eingeführt. Die Genauigkeitsanforderungen an die 3-D-Koordinaten für die Detektoren des LHC-Projekts bewegen sich zwischen 0,05 mm für Bauteile mittlerer Größe und einige zehntel Millimeter für große Objekte. Das photogrammetrische System hat sich als leistungsfähiges Werkzeug für die Aufgaben in den Bereichen Qualitätskontrolle und geometrische Positionierung erwiesen. Der Einsatz dieses Systems und die Vorgehensweise wird am Beispiel der Barrels des CMS-Detektors erläutert.*

## 1. Einleitung

Der LHC (Large Hadron Collider) ist der neue 27 km lange Teilchenbeschleuniger, der am CERN (Europäisches Kernforschungszentrum) in Genf gebaut wird. Physikalische Großdetektoren, ALICE, ATLAS, CMS und LHC-B, werden um die verschiedenen Kollisionspunkte, die sich 100 m unter der Erde befinden, herum gebaut. Hierbei werden erhöhte Anforderungen an die Vermessung in Bezug auf räumliche und zeitliche Beschränkungen gestellt.

Das Ziel dieser Detektoren ist die Untersuchung von Kollisionen extrem energiereicher Teilchenstrahlen mit der höchstmöglichen Genauigkeit. Die Großdetektoren werden aus vielen verschiedenen Detektoren zusammengesetzt, die im Aufbau dem Modell einer zylindrischen Zwiebel mit vielen Schalen oder einer russischen Puppe ähneln. Dieses Modell ist in Abb. 1 beispielhaft für den CMS (Compact Muon Solenoid) dargestellt.



Durchmesser: 14.60 m  
Länge : 21.60 m  
Gewicht: 14.600 Tonnen  
5 Barrel Yoke Ringe

Abb.1: CMS Konstruktionsskizze

<sup>1</sup>Jean-Christophe Gayde, Raphael Goudard, Celine Humbertclaude, Christian Lasseur, Dirk Mergelkuhl, Positioning Metrology and Surveying Group, CERN, 1211 Geneva 23, Switzerland, e-mail: firstname.lastname@cern.ch

Die Genauigkeit für die Rekonstruktion der Teilchenspuren hängt wesentlich von der inneren Genauigkeit jedes einzelnen Detektors und ihrer Position zueinander ab. Die geforderten Genauigkeiten für die Experimente im LHC bewegen sich zwischen 0,05 mm für Teile mittlere Größe und einige zehntel Millimeter für große Bauteile (GOUDARD et al., 2000).

Am CERN ist ein digitales photogrammetrisches System bestehend aus Kodak® DCS460 Kameras und der AICON DPA-WIN Software vorhanden, das zu einem wichtigen Instrument zur Lösung der verschiedenen Vermessungsaufgaben wie Deformationsvermessungen im Sinne von Belastungstests, dimensionelle Qualitätskontrolle und die Positionierung der verschiedenen Bauteile geworden ist.

Die photogrammetrischen Arbeiten werden von einem kleinen, gut ausgebildeten Team durchgeführt und greifen so wenig wie möglich in den geplanten Montageablauf ein. Durch die Flexibilität der Photogrammetrie können die Vermessungen gut auf die Umgebungsbedingungen eingestellt werden. Objekte von 15-20 m Höhe müssen aufgrund des begrenzten, zur Verfügung stehenden Platzes mit vielen Hindernisse bei Aufnahmeentfernungen von nur wenigen Metern vermessen werden.

## **2. Welche Rolle spielt die Photogrammetrie am CERN?**

Die Photogrammetrie wurde am CERN vor allen Dingen wegen der kurzen Arbeitszeiten vor Ort trotz großer Punktzahl - was mehrfach von den verschiedenen Firmen gefordert wurde - und des hohen Genauigkeitspotentials ausgewählt. Der Aufbau eines lokalen Festpunktfeldes und die Arbeit mit Theodoliten ist immer häufiger nicht möglich.

Die Flexibilität bei der Aufnahmekonfiguration, die durch die mögliche Nutzung von Wechselobjektiven und die freie Standpunktwahl erreicht wird, ist für Vermessungen in den Kavernen von besonderer Bedeutung. Dort werden die Verkabelung des Experiments sowie andere Arbeiten die Vermessung deutlich behindern.

Die Nahbereichsphotogrammetrie ist am CERN nur eins der verfügbaren Vermessungssysteme und viele Vermessungen werden weiterhin mit elektronischen Tachymetern durchgeführt, da diese häufig geeigneter erscheinen.

Im Bereich Photogrammetrie wird am CERN keine Forschungs- und Entwicklungsarbeit betrieben.

## **3. Simulation für die Vermessung der Barrel-Yokes**

### **3.1 Projektbeschreibung**

Die Barrel-Yokes sind mit über 14 m Durchmesser die größten Einzelteile des CMS-Detektors und werden vor der Inbetriebnahme 2006 über 20 mal vermessen werden. Die Vermessungen finden in der Produktionsstätte und am CERN jeweils mehrfach statt, um die Montage zu überwachen. Für die Simulation wurden bereits die räumlichen Beschränkungen in den späteren Produktionshallen berücksichtigt. Hierbei sind vor allem die Montagegerüste, die Stützen des Barrels sowie die begrenzte Hallenhöhe zu erwähnen, die die Verbindung der beiden Objektseiten schwierig gestalten.

Da die Vermessung bereits bei der Planung stark berücksichtigt wird, sind die Referenzpunkte durch Paßbohrungen markiert und können hervorragend mit photogrammetrischen Zielmarken signalisiert werden.

Um die Genauigkeit der photogrammetrischen Vermessung für die Barrels zu garantieren wurde eine „praktische Simulation“ durchgeführt. Diese Tests, die während Diplomarbeiten

durchgeführt wurden, hatten eine geeignete Aufnahmekonfiguration und Verteilung der Zielmarken als Ziel. Die geforderte Punktgenauigkeit (1 Sigma) war besser als 1 mm. Für diesen Zweck wurde das Objekt im Maßstab 2 : 3 aus Betonelementen nachgebaut.

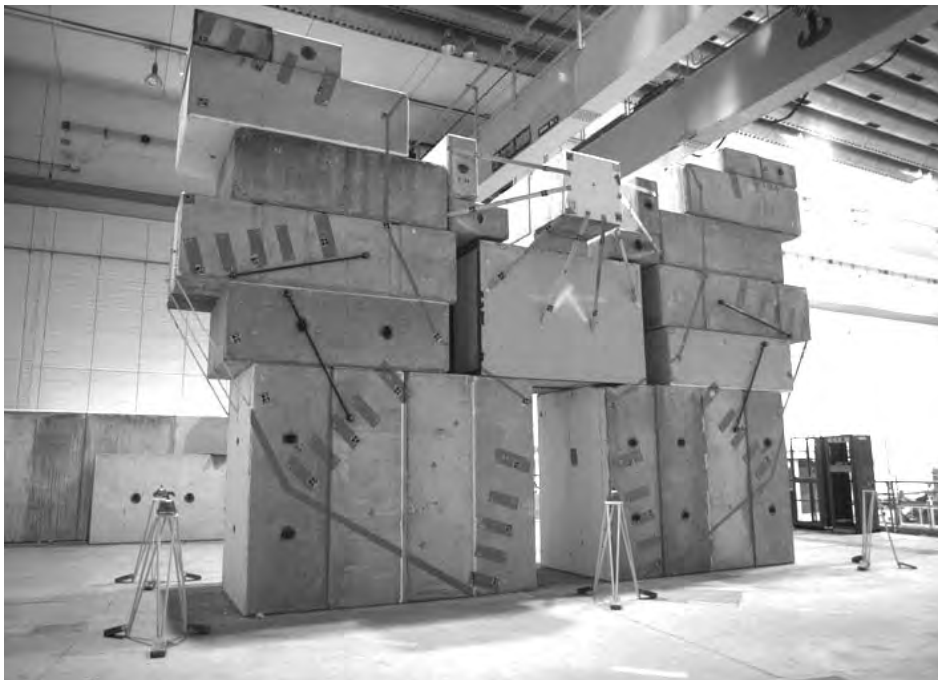


Abb. 2: Versuchsaufbau für die Simulation

Dies war gleichzeitig ein weiterer Test für das neu eingeführte photogrammetrische System. Außerdem sollte die Verbindung der zwei Seiten des Objektes getestet werden und die notwendigen Unterbrechungen des Arbeitsprozesses können durch die Simulation in etwa abgeschätzt werden. Die Verbindung der zwei gegenüberliegenden Seiten stellt eine weitere Frage dar, die mit der Simulation beantwortet werden soll.

### 3.2 Zielmarken

Bei retro-reflektierenden Zielmarken beträgt der maximalen Einfallswinkel 45-50 Grad. Bei einem größeren Einfallswinkel reicht das von den Marken reflektierte Licht des Blitzes häufig nicht mehr für eine Messung aus. Um die Verbindung der zwei Seiten des Objektes im Bündelblock zu stabilisieren, werden deshalb auch kugelförmige retro-reflektierende Zielmarken verwendet.

Die Bildkoordinatenmessung dieser Zielmarken ist von geringerer Genauigkeit, da die Abbildungseigenschaften für diese Zielmarken schlechter sind als für herkömmliche Zielmarken. Der Kontrast am Zielmarkenrand ist wesentlich geringer und somit die Kantenbestimmung schwieriger. Die Genauigkeit im Objektraum ist trotzdem ähnlich, da der mangelnde Kontrast durch die bessere Geometrie kompensiert wird.

Diese Zielmarken existieren in verschiedenen Größen (15, 20 und 30 mm Durchmesser) und werden entweder auf einen magnetischen Fuß montiert, um sie möglichst einfach am Objekt befestigen zu können, oder sie können direkt in Passbohrungen gesteckt werden.

Durch die verwendeten 30-mm-Targets wird die geometrische Stabilität des Bündelblocks verstärkt und die Zwänge in Bezug auf die Konfiguration werden verringert. Dies erhöht die



Flexibilität und verringert den Zeitaufwand, da weniger Zielmarken bzw. Aufnahmen erforderlich sind.

Ein weiteres Ergebnis der Simulation ist auch, dass für die Messung keine Standardzielmarken verwendet werden können. Um bei einer geplanten Aufnahmeentfernung von 6-10 m noch eine Punktgröße von minimal 9 Pixel zu erhalten, wurde ein Zielmarkendurchmesser von 40 mm gewählt. 250 dieser Zielmarken wurden daraufhin nach Spezifikationen des CERN produziert. Eine weitere Besonderheit ist, dass für die verwendeten codierten Zielmarken der Code vom eigentlichen Messpunkt getrennt wurde. Dies ermöglicht, die Passbohrungen direkt mit codierten Zielmarken auszustatten und so eine spätere Nummerierung zu vermeiden. Die Codes wurden dazu auf magnetische Folien aufgeklebt und können problemlos am Objekt befestigt werden. Die Größe der Codes ist  $14 \times 14 \text{ cm}^2$ . Die für die Messung benutzten Targets sind in Abb. 3 dargestellt.

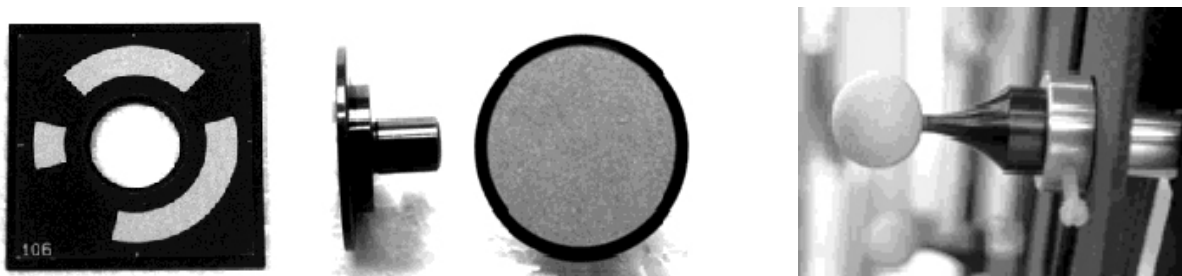


Abb. 3: Verschiedene Zielmarken

### 3.3 Die verwendeten Maßstabsinformationen und Kontrollstrecken

Zur Kontrolle der photogrammetrischen Messung und zur Maßstabsübertragung werden ca. 1,5 m lange Kohlefaservermaßstäbe benutzt. Diese Maßstäbe sind am CERN durch eine Koordinatenmessmaschine kalibriert worden. Die Länge solcher Kohlefaservermaßstäbe ist aus praktischen Gründen auf 1,5 – 2 m limitiert. Für ein Objekt mit 15 m Durchmesser ist die Extrapolation kritisch zu betrachten.

Um diesem Mangel entgegenzutreten, werden zusätzliche Streckenmessungen durchgeführt. Hierbei erwies sich die Messbandmessung nach einem Vergleich mit einem genauen Tachymeter als geeigneteres Werkzeug (FUCHS, 1999). Die Messbandmessungen werden mit einem speziellen, am CERN entwickelten Werkzeug, dem „Distochaine“ (siehe Abb. 4), durchgeführt. Die Messungen können dadurch mit einer konstanten Zugspannung von 4 kg ausgeführt werden. Dieses Werkzeug und Messband wurden als Einheit mit einem Laserinterferometer kalibriert. Die Genauigkeit für die korrigierten Strecken im Bereich bis 15 m kann auf



Abb. 4: Distochaine

0,2 - 0,3 mm geschätzt werden, was für dieses Objekt die Genauigkeitsanforderungen durchaus erfüllt. Durch die Passbohrungen war eine einfache Verknüpfung mit den photogrammetrischen Messungen möglich.

### 3.4 Ergebnisse der Simulation

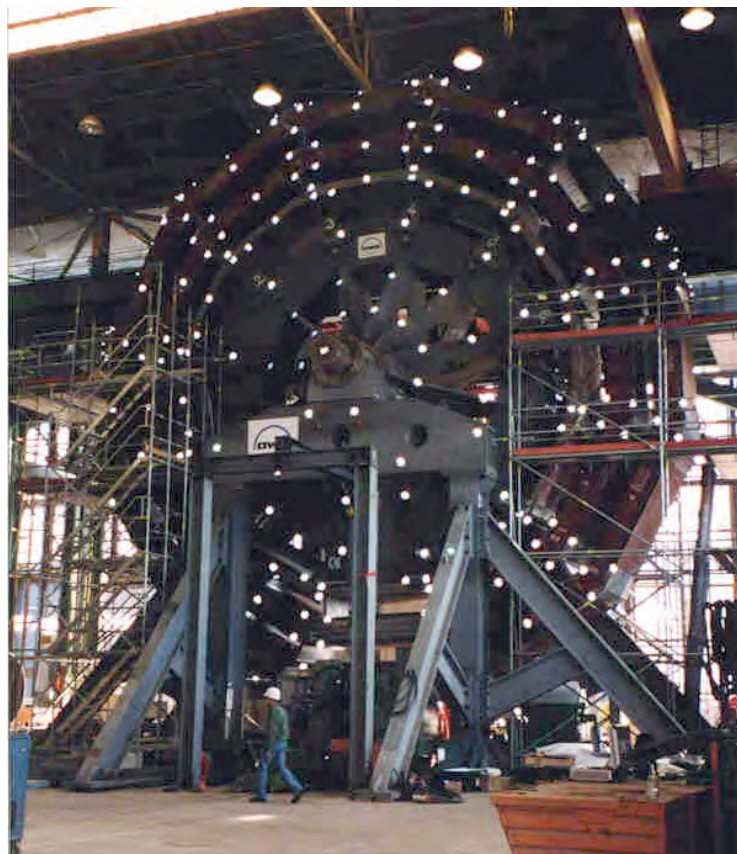
Das Instrumentarium wurde aufgrund der Ergebnisse der Simulation verändert bzw. ergänzt. Dies betrifft sowohl die Zielmarken als auch die Maßstabsinformation und die Kontrollstrecken. Durch die Simulation ergab sich eine durchschnittliche Punktgenauigkeit für die Objektpunkte von 0,7 mm. Dieser Wert wurde aus den Differenzen für die Kontrollstrecken berechnet und nicht aus der Ausgleichung übernommen. Er erscheint realistischer, da er die äußere Genauigkeit wiedergibt.

Ein entscheidender Punkt der allerdings nicht in der Simulation getestet wurde, sind die Verdeckungen, die durch die Montagegerüste verursacht werden und eine robuste, automatische Fehlersuche erfordern.

## 4. Vermessung der Barrels als Qualitätskontrolle

Die Barrels sind die größten Einzelteile des CMS-Detektors und sind inzwischen sowohl in den Produktionsstätten als auch am CERN vermessen worden. In Tab. 1 sind einige Daten, die repräsentativ für das Objekt sind, zusammengefasst.

Bildanzahl	~250
Datenvolumen	1,5 GB
Punktanzahl	700
Codierte Punkte	500
Beobachtungen	~25.000
Unbekannte	> 3500
Sigma <sub>0</sub>	0,9 µm
Maßstäbe	20
Messbandstrecken	14
Objektiv	20 mm
Zeitaufwand für die Streckenmessungen	4 Std. 3 Pers.
Zielmarken anbringen	8 Std. 3 Pers.
Aufnahmezeit	8 Std. 3 Pers.
Zeit für die Berechnung	15 Std. 1 Pers.



Tab. 1: Eckdaten des Projektes

Abb. 5: Barrel mit Zielmarken in der Produktionsstätte

In der Firma stand eine Hebebühne zur Verfügung die Aufnahmen bis zu einer Höhe von 20 m zuließ und so eine günstige Aufnahmeconfiguration ermöglichte. Trotz der Hebebühne

waren die Arbeiten wie Messbandmessungen, Anbringen der Zielmarken und die Aufnahmen sehr zeitaufwendig und erforderten drei Personen. Die Zeiten sind in Tab. 1 dargestellt. Für die Messbandmessungen wurden 6 Temperatursensoren installiert, um die Temperaturdifferenzen innerhalb der Montagehalle für die Messbandkorrekturen zu berücksichtigen.

Der hohe Zeitaufwand für die Berechnung läßt sich im Wesentlichen durch das große Datenvolumen erklären. Ein weiterer Faktor ist die aufwendige, schwierige Fehlersuche aufgrund der Verdeckungen durch das Montagegerüst und der Ständer. Dies hat zur Folge, dass bis zu 15% der Beobachtungen als Ausreißer betrachtet werden im Gegensatz zu ~6% bei den Simulationen. Als letzter Punkt ist noch die halb-automatische Arbeit zu erwähnen, die im Bereich der Ständer erforderlich war, d.h. die Orientierungen konnten in diesem Bereich nicht mit den detektierten, codierten Targets berechnet werden und zusätzliche Bildpunkte mußten halb-automatisch gemessen werden. Häufig war von der Verdeckung nur der Code betroffen, der zentrale Messpunkt hingegen konnte einwandfrei gemessen werden. Die Genauigkeit für die 3D-Objektkoordinaten wurde aus den Differenzen an den Kontrollstrecken errechnet und nicht aus der photogrammetrischen Ausgleichung übernommen, da die Schätzung aufgrund systematischer Fehler zu optimistisch ausfällt. Die durchschnittliche erzielte Genauigkeit für die Objekt-Koordinaten liegt bei 0,5 mm in den Bereichen ohne Verdeckungen und bei 0,9 mm in den Bereichen mit Verdeckungen, was die Schätzwerte aus den Simulationen bestätigt und den Anforderungen entspricht (GOUDARD, HUMBERTCLAUDE & NUMMIARO, 1999).

## 5. Zusammenfassung und Ausblick

Im Laufe der letzten fünf Jahre hat sich die digitale Photogrammetrie als leistungsfähiges Instrument für die Bewältigung der verschiedenen Vermessungsaufgaben am CERN erwiesen. Insbesondere die kurzen Unterbrechungszeiten des Montageprozesses haben sich als enormer Vorteil herausgestellt. Messung und Berechnung in angemessener Zeit sind aber nur durch Algorithmen zur vollautomatischen Messung von codierten und nicht-codierten Punkten in Verbindung mit einer robusten Fehlersuche möglich gewesen.

Bei den anstehenden Arbeiten in den Kavernen werden die räumlichen und zeitgleichen Zwänge noch strikter sein und die Qualität der Aufnahmekonfigurationen wird infolge dessen abnehmen. Durch den Einsatz einer Kodak® DCS660 und deren Vorteile wie sofortige Kontrolle des Bildmaterials, Wechselakkus und eine bessere Kamerastabilität dürfte aber auch diese Aufgabe erfüllt werden können. Als Alternative kann auch eine Kameramodellierung verwendet werden, die die Instabilität der DCS460 berücksichtigt.

## 6. Literaturverzeichnis

- FUCHS, J-F., 1999: Mesure des objets industriels de grande dimensions par la photogrammétrie numérique. Performances et analyse du système caméra DCS460 – logiciel Rollei CDW, Ecole Supérieure des Arts et Industries de Strasbourg, France
- GOUDARD, R., HUMBERTCLAUDE, C., LASSEUR, C., MERGELKUHLE, D., 2000: Digital Photogrammetry Applied to Large Physics Detectors, CMSC Conference, Dearborn, USA
- GOUDARD, R., HUMBERTCLAUDE, C., NUMMIARO, K., 1999: Results of 3D photogrammetry on the barrel CMS yoke, Proceedings of the Sixth International Workshop on Accelerator Alignment, Grenoble, France

# Operationalisierung von Fernerkundungsdaten für die Umweltverwaltung im Land Sachsen-Anhalt anhand ausgewählter Beispiele aus der Bergbaufolgelandschaft

THOMAS IHL<sup>1</sup> & CORNELIA GLÄßER<sup>2</sup>

*Zusammenfassung: Die Fernerkundung ist eine moderne, innovative Wissenschaftsdisziplin. Allerdings klafft zwischen Forschung und Anwendung eine große Lücke. Viele Methoden der Fernerkundung können von Fachbehörden nicht angewandt werden, weil einerseits keine entsprechend vorverarbeitete Bildprodukte verfügbar sind und weil andererseits keine ausreichende Erfahrung im Umgang mit Satellitenbildern besteht. Damit Fachbehörden nicht nur bereits von Experten ausgewertete und analysierte Fernerkundungsdaten, sondern auch Primärdaten auswerten können, wurde in Sachsen-Anhalt das Projekt OFULSA initiiert. Es handelt sich dabei um ein sehr anwendungsorientiertes Projekt, das weitgehend standardisierbare Verfahren für Rahmenaufgaben innerhalb der Umweltverwaltung entwickeln soll.*

## 1 Stand der Wissenschaft

In den letzten Jahren findet in der Bearbeitung von Fernerkundungsdaten ein grundlegender Umbruch statt. Früher fanden Auswerteprozesse allein auf Basis von spektralen Eigenschaften der einzelnen Bildelemente statt. Diese Verfahren sind inzwischen durch die Software sehr ausgereift. Die Grenzen sind dort erreicht, wo die Interpretation von Landbedeckung und Landnutzung zu unterschiedlichen Objekten führt („landcover contra landuse“). Deshalb werden seit einigen Jahren neben Texturparametern (einfache Texturfilterung, Mustererkennung, Co-Occurrenz- Matizzen etc.) auch nichtspektrale Zusatzinformationen (ATKIS, Biotoptypen etc.) in die Bildanalyse miteinbezogen. Damit werden Methoden aus dem Bereich der Geoinformation in den Auswerteprozess von Fernerkundungsdaten integriert. Die ursprünglichen Disziplinen von Fernerkundung und GIS wachsen zusammen.

Ein weiterer Prozess verschiebt zurzeit den Schwerpunkt von pixelbasierten Klassifikationsalgorithmen zu segmentbasierten Zugehörigkeitsfunktionen (BLASCHKE, 2000). Bildsegmentierung und Fuzzy-Logic sind bereits seit einigen Jahren Gegenstand der Forschung, doch erst mit der Einführung von eCognition ist der Umbruch zugunsten der objektorientierten Bildanalyse ausgefallen. Benachbarte Bildelemente können trotz größerer Varianz zu ein und demselben Objekt gehören, als weiter entfernte Pixel (BAATZ, 2000).

Beide Entwicklungen, also Zusammenführung von GIS und Fernerkundung als auch die objektorientierte Bildanalyse sollten in der allgemeinen praktischen Anwendung zu einem stärkeren Einsatz von Fernerkundungsdaten führen. Leider sieht dies in der Praxis vieler Behörden anders aus. Nur wenige Fachbehörden verfügen über entsprechende Software und Know-how. Häufig beschränkt sich der Einsatz von Fernerkundungsmethoden auf analoge Luftbildauswertung. Um Fachbehörden den routinemäßigen Einsatz von Fernerkundungsdaten zu ermöglichen, finanzieren das Land Sachsen-Anhalt und das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. das Verbundprojekt „Operationalisierung von Fernerkundungsdaten für die Umweltverwaltung im Land Sachsen-Anhalt“ (OFULSA).

---

<sup>1</sup> Dipl.-Geogr. Thomas Ihl, Institut für Geographie, Arbeitsgruppe Kartographie und Geofernerkundung, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Domstr. 5, 06108 Halle (Saale), Tel: 0345-5526031; e-mail: ihl@geographie.uni-halle.de

<sup>2</sup> Prof. Dr. Cornelia Gläßer, Institut für Geographie, Arbeitsgruppe Kartographie und Geofernerkundung, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Domstr. 5, 06108 Halle (Saale), Tel: 0345-5526020; e-mail: glaesser@geographie.uni-halle.de

## 2 Was will OFULSA?

Für die neuen Bundesländer wurde 1992/93 eine flächendeckende CIR-Befliegung durchgeführt. In Sachsen-Anhalt entstand auf Basis dieser CIR-Luftbilder eine landesweite, digitale Biotoptypen-/Nutzungstypenkartierung (BTNT), im Erfassungsmaßstab 1 : 10.000 (LANDESAMT FÜR UMWELTSCHUTZ, 1992). Sie findet innerhalb des Naturschutzes und seiner Fachbehörden inzwischen weitreichende Verwendung. Bei der BTNT handelt es sich jedoch um aufbereitete, ausgewertete Informationen und nicht um Originaldaten. Die Erhebung solcher Daten ist kosten- und zeitintensiv und an einen fixen Zeitpunkt gekoppelt. Sie sind deshalb weder raum- noch zeitkontinuierlich anzubieten. Die Aufnahmeintervalle betragen zehn Jahre und mehr. Gleiches gilt für CORINE. Hier beträgt der Erfassungsmaßstab allerdings 1 : 100.000 (EUROPEAN COMMUNITIES-COMMISSION, 1992).

Um Primärdaten, wie Satellitenbilddaten, in den Fachbehörden direkt nutzen zu können, sind derzeit noch aufwendige Vorverarbeitungs- und Auswerteverfahren nötig. Dabei ist klar, dass Satellitenbilddaten in Abhängigkeit ihrer geometrischen Auflösung nur bedingt mit Informationsextrahierung aus Luftbildern verglichen werden können. Im Zuge des allgemeinen Kostendrucks und der Sparmaßnahmen der öffentlichen Haushalte werden jedoch neue, kostengünstige Monitoringverfahren notwendig.

Bisher lag die Interpretation von Satellitenbilddaten fast vollständig in den Händen von wenigen Fernerkundungsexperten. Ziel des Projektes ist letztendlich die Entwicklung eines einfachen Instrumentes, das dem Anwender die Möglichkeit eröffnet, Fragestellungen aufgrund von aktuellen Fernerkundungsdaten weitestgehend selbständig zu lösen. Der gesamte Arbeitsprozess soll durch Methoden und Verfahren beschrieben werden. Diese Standardisierung ermöglicht nun die Übertragung von Teilarbeitsschritten auf den potentiellen Anwender in den Fachbehörden. Komplexere Arbeitsschritte werden weiter einem Experten vorbehalten bleiben, der als Dienstleister den Fachbehörden zur Seite gestellt wird. Diese Struktur ermöglicht nun auch den Aufbau eines modernen Server/Client-Systems (PROJEKTHANDBUCH OFULSA, 1999).

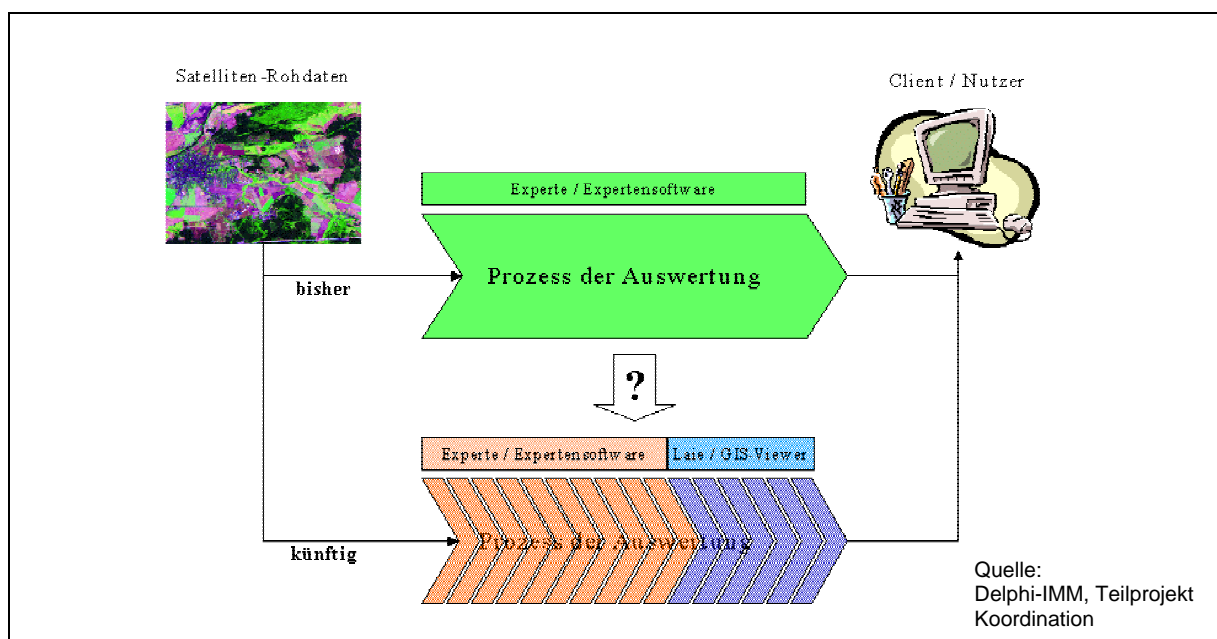


Abb. 1: Schema traditioneller und zukünftiger Auswertung von Fernerkundungsdaten

Um die gesamte inhaltliche Breite der zu erwartenden Fragestellungen abzudecken wurden Teilvorhaben gebildet. Das Verbundprojekt gliedert sich in die Teilprojekte Koordination, Auenlandschaft, Agrarlandschaft, Bergbaufolgelandschaft, Offenland, Wald und Forst sowie Softwareumsetzung (<http://www.delphi-imm.de/Magdeburg/ofulsa>).

### 3 Fragestellungen aus der Praxis der Bergbaubehörden

Sachsen-Anhalt ist ein vergleichsweise rohstoffreiches Bundesland. Die Gewinnung von Bodenschätzen beginnt bereits in prähistorischer Zeit (Kupfer, Salz). An Rohstoffen werden heute noch abgebaut: Kohlen, Salze sowie Steine & Erden (OELKE, 1997). Jeglicher Bergbau und ganz speziell der Braunkohlentagebau stellt einen intensiven anthropogenen Eingriff in den Landschaftshaushalt dar. Unter dem Aspekt der Überwachung, der Planung und der Langzeitveränderungen nimmt er im Rahmen der Raumplanung und der damit verbundenen Fachplanungen einen besonders hohen Stellenwert ein und das, obwohl der prozentuale Flächenanteil im Vergleich zur Gesamtfläche des Bundeslandes nur relativ gering ist.

Ein ganz besonderes Anliegen von OFULSA ist die Praxisnähe zu den potentiellen Nutzern in den Landesverwaltungen. Damit sollen die konkreten, spezifischen Aufgaben der unterschiedlichen Fachbehörden ermittelt sowie die spätere Akzeptanz gefördert werden. Dies gewährleistet den Einsatz der Konzepte und Hilfsmittel. Hierzu finden intensive Gespräche mit einzelnen Fachbehörden auf unterschiedlichen Ebenen statt. Ansprechpartner für das Teilprojekt Bergbau sind:

- Landesamt für Umweltschutz Sachsen-Anhalt
- Staatliche Ämter für Umweltschutz
- Bergamt Halle und Staßfurt
- Geologisches Landesamt Sachsen-Anhalt
- Regierungspräsidien Magdeburg, Halle und Dessau
- Untere Naturschutzbehörden

In diesen Gesprächen haben sich im Wesentlichen folgende Themenkomplexe für den Einsatz von Fernerkundungsmethoden herauskristallisiert:

- Veränderungsanzeige innerhalb der stillgelegten Braunkohletagebaue mit Berücksichtigung der unterschiedlichen Sukzessionsstadien
- Kontrolle der Flutung der Tagebaurestlöcher
- Simulation der zukünftigen Uferlinie
- Kontrolle der Genehmigungsfelder Steine & Erden

### 4 Lösungsmöglichkeiten mit Fernerkundungsmethoden

Die oben angeführten Nutzerwünsche sind sehr vielschichtig. Klassifikationen können nur einen Teil der Fragestellungen lösen; Mal stehen biotische, mal abiotische Faktoren im Vordergrund. Diese Vielfalt ist nur mit unterschiedlichen Datensätzen und Methoden zu beantworten. Für spezifische Aussagen sind unterschiedliche Herangehensweisen anzuwenden. Im Folgenden soll diese Vielfältigkeit an einigen Fallbeispielen aufgezeigt werden.

**Fallbeispiel 1: Simulation einer Uferlinie während und nach Abschluss der Flutung**

Infolge der energiepolitischen Veränderungen nach dem Ende der DDR wurden die meisten Braunkohlentagebaue in Mitteldeutschland aufgegeben und die Braunkohlenkombinate aufgelöst. Die eigens zu diesem Zweck gegründete Lausitzer und Mitteldeutsche Bergbau-Verwaltungsgesellschaft mbH (LMBV) wurde mit der Sicherung, Sanierung und Rekultivierung der offengelassenen Tagebaue beauftragt.

Die hohe Fördermenge von Rohbraunkohle führte in den aktiven Tagebauen zu einem enormen Massendefizit. Durch Verfüllung konnte dieses Massendefizit nicht mehr ausgeglichen werden. Eine Flutung der Tagebaurestlöcher war notwendig. In diesem Zusammenhang ist eine Kontrolle bzw. Modellierung der jeweils aktuellen Wasserflächen erforderlich.

Mit den verschiedenen Klassifikationsalgorithmen, besonders dem Minimum Distanz Klassifikator können die gewünschten Wasserflächen extrahiert werden. Schwieriger dagegen ist die Simulation zukünftiger Uferlinien. Hierzu wird ein digitales Höhenmodell aus Luftbildern abgeleitet. Die Höhenmodelle des Landesvermessungsamtes können nicht eingesetzt werden, da die Tagebaufläche als „no-data“ Bereiche nicht erfasst werden. Zudem wäre die geometrische Auflösung zu ungenau.

Das Fallbeispiel stammt aus dem Tagebaukomplex Goitsche. Die Goitsche befindet sich am unmittelbaren Stadtrand der Kreisstadt Bitterfeld. In diesem Tagebaukomplex wurde in der Zeit von 1908 bis 1991 498,7 Mio. t Kohle gefördert und dafür etwa 1,275 Mrd. m<sup>3</sup> Abraum bewegt (EIDNER, 1999). Vor einer Flutung sind durch geotechnische Maßnahmen die Böschungen zu stabilisieren und zu sanieren. Für die Böschungsneigung ist ein Verhältnis von 1:10 vorgeschrieben. Im zuletzt aktiven Bereich sind die Böschungssanierungen 1998 abgeschlossen worden. Das Höhenmodell wurde aus panchromatischen Luftbildern vom 12.01.1998 berechnet. Zur Erstellung des digitalen Höhenmodells ist eine entsprechende Software, wie zum Beispiel OrthoMax® oder OrthoEngine® notwendig. Die genaue Vorgehensweise kann bei KURZ (1999) nachgelesen werden.

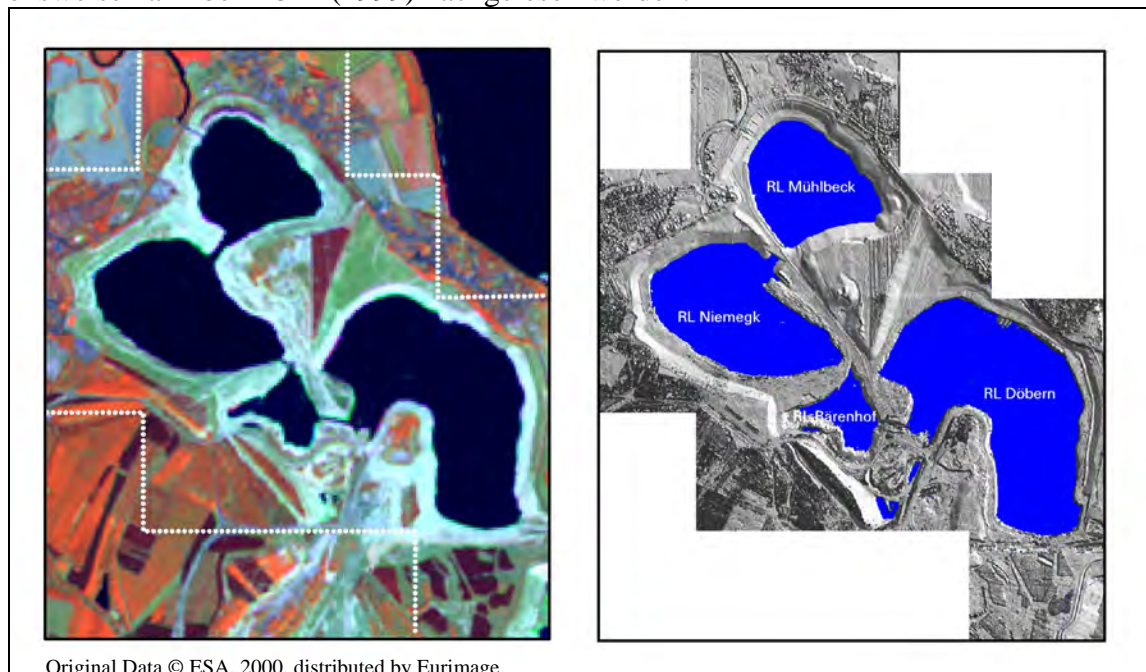


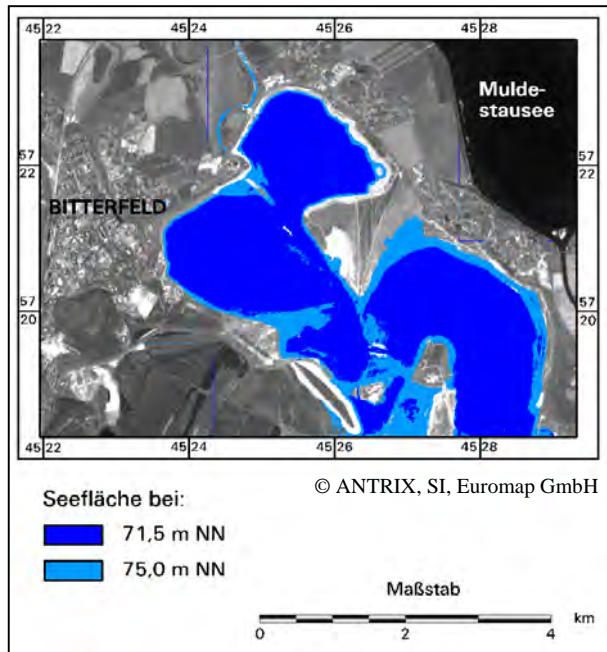
Abb. 2: Landsat-7-ETM vom 14.08.2000 (links) und simulierte Wasserflächen für eine Flutungshöhe von 63,75 m NN (rechts)

Mit dem digitalen Höhenmodell und den jeweiligen Einständen lassen sich zugehörige Wasserflächen berechnen. Zur Qualitätsprüfung des erstellten Höhenmodells dient ein Vergleich

zwischen Satellitenbild und simulierter Wasserfläche (Abb. 2). Mit Hilfe des Höhenmodells konnte die Wasserfläche sehr genau bestimmt werden. Sie stimmt nahezu mit der tatsächlichen Ausdehnung aus dem Satellitenbild überein. Im DHM fehlen noch die Verbindungskanäle. Außerdem bestehen am Nordostufer des Restloches Niemeck kleine Differenzen. In beiden Bereichen fanden nach der Befliegung noch geotechnische Veränderungen statt, die folglich mit dem Höhenmodell nicht erfasst werden können.

Geplant ist die Flutung des Tagebaues Goitsche bis zu einem Wasserspiegellendstand von voraussichtlich 75,0 m NN. Durch die Flutung steigt sukzessive auch der Grundwasserflurabstand. Die Berechnungen der LMBV gehen von einem durchschnittlichen Grundwasserflurabstand von  $\geq 2$  m aus. Wegen begründeter Einwände der Stadt Bitterfeld werden durch die LMBV weiterführende Planungen und Maßnahmen zur Regulierung der Grundwasserflurabstände durchgeführt (PLANFESTSTELLUNGSVERFAHREN FLUTUNG TAGEBAURESTLOCHKOMPLEX GOITSCH, 2000). Bis dahin besteht nur eine Betriebs-erlaubnis bis zu einer Wasserspiegelhöhe von 71,5 m NN. Die nachfolgende Abbildung zeigt die Simulation der Seeflächen für die beiden Wasserspiegelstände von 71,5 m NN und 75,0 m NN.

Abb.3: Simulierte Wasserflächen bei 71,5 m NN und 75 m NN



## Fallbeispiel 2: Visuelle Beobachtung von Vegetationsbeständen

Für die Sanierungstagebaue fehlen flächendeckende, räumlich exakte, thematische Informationen für die Bewertung und das Langzeitmonitoring. Die BTNT ist zwar landesweit erfasst worden, also auch für die Tagebaue, ist aber inzwischen fast zehn Jahre alt. In einem so hochdynamischen Raum, der durch Sanierungsmaßnahmen und spontane Sukzession einem fortlaufenden Wandel unterworfen ist, sind diese Daten bereits in vielen Bereichen überholt. Eine etwa gleichaltrige Biotopkartierung liegt bei der LMBV nur analog vor. Einzig für den Tagebau Golpa-Nord existiert eine aktuelle digitale Biotoptypenkartierung.

Andererseits konnte die sehr gute Eignung von Fernerkundungsdaten für die Bewertung und das Monitoring der Bergbauflächen durch verschiedene Arbeiten (BIRGER, 1998; SCHMIDT et al., 1998; GLÄBER et al., 1999) erfolgreich nachgewiesen werden.

Die einfachste Form der Auswertung von Satellitenbildern ist die visuelle Interpretation. Sie ist auch ohne größere technische Hilfsmittel von den Fachbehörden durchzuführen. Sie soll hier beispielhaft erläutert werden.

Das obige Bildbeispiel zeigt einen Sandtrockenrasen bei Petersroda (Landkreis Bitterfeld). Das Gebiet gehört zum Tagebau Holzweißig-West und wurde in der Zeit von 1960 bis 1980 ausgekohlt. Danach erfolgte bis einschließlich 1978 die Verkippung. Der artenreiche Sandtrockenrasen mit gegenwärtig sehr stabilen Sukzessionsstadien gehört zu den

30.04.1999	19.07.1999	13.09.1999
------------	------------	------------



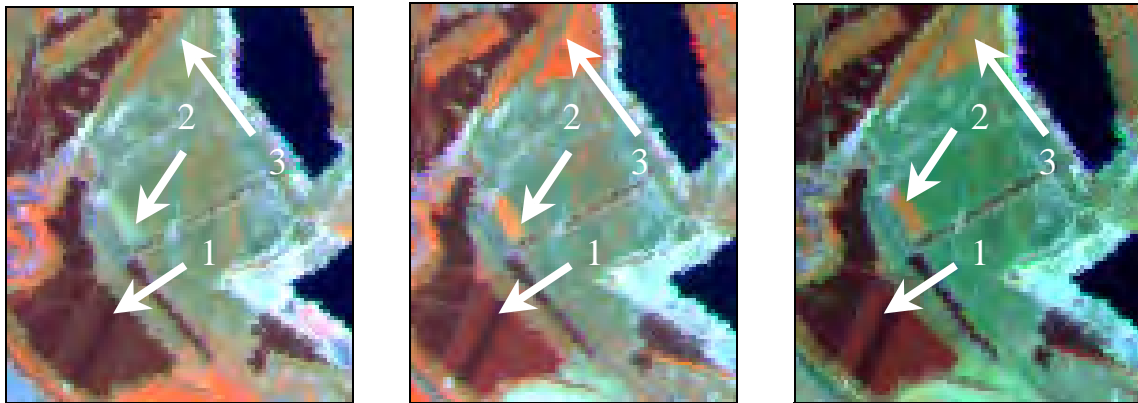


Abb. 4: Phänologischer Vergleich einer Fläche östlich von Petersroda bei Bitterfeld

naturschutzrelevanten Flächen in der Goitsche (SIELHENGST, 1999; BIRGER et al., 2000). Im phänologischen Vergleich fallen drei Gebiete auf. Es handelt sich zum einen um einen Kiefernforst (1) mit unterschiedlichen Arten: Schwarz- und Waldkiefer. Am 30.04.1999 hat der Maitrieb noch nicht eingesetzt. Bei der Waldkiefer sind die noch jungen Triebe im Juli und September deutlich erkennbar. Areal (2) ist eine relativ junge Roteichen-Anpflanzung. Im Unterholz kann durch die dichte Anpflanzung kein Unterwuchs aufkommen. Vor der Belaubung wird das Signal von dem sandig bis schwach lehmigen Bodensubstrat bestimmt. Deshalb unterscheidet es sich von dem umgebenden Magerrasen. Anders ist es bei Areal (3). Hier handelt es sich um lichten Birkenvorwald, der im Unterholz Silbergras-Arten aufweist. Vor der Belaubung am 30.04.1999 ist deshalb das Gebiet nicht von den Magerrasen zu unterscheiden.

### Fallbeispiel 3: Landnutzungsklassifizierung

Eines der wichtigsten Standardverfahren in der Fernerkundung ist die Landnutzungsklassifizierung. In der Vergangenheit wurden ausschließlich pixelbasierte Algorithmen angewandt. Diese Verfahren sind weit entwickelt. Pixelbasierte Verfahren sollen hier nicht weiter erläutert werden. Sie sind in der Literatur mit zahlreichen Veröffentlichungen nachzulesen (WEIERS, 1999 u.a.).

Seit Herbst 2000 steht mit eCognition® eine neue Software zu objektorientierter Klassifikation und Zugehörigkeitsfunktionen zur Verfügung. Als Fallbeispiel wurde hier eine Segmentierung mit anschließender Nearest Neighbor Klassifikation durchgeführt. Sie lässt sich im Gegensatz zur Fuzzy-Logic-Technik recht einfach auch von Nichtexperten erlernen und anwenden.

Als Testgebiet wurde der ehemalige Tagebau Goitsche bei Bitterfeld (vgl. Fallbeispiel 1) ausgewählt. Als Eingangsdatensätze dienten Landsat-7-ETM und der panchromatische Kanal von IRS-1C. Ein Resolution Merge stellte sich für die Segmentierung als nachteilig heraus und wurde nicht angewandt. Für die Segmentierung sind unterschiedliche Gewichtungen der Eingabedatensätze möglich. Im unteren Segmentierungslevel wurde eine starke Gewichtung auf den hochauflösenden panchromatischen Datensatz gelegt. Je höher das Segmentierungslevel desto wichtiger wird die spektrale Information der Landsat-7-ETM-Daten. eCognition ermöglicht bei der Segmentierung auch die Einbeziehung externer thematischer Datensätze. Dies ist ein ganz entscheidender Vorteil gegenüber bisherigen Verfahren. Schwierigkeiten bereitete allerdings die Landesgrenze, die den Tagebau Goitsche etwa in der Mitte schneidet.

Damit schieden alle thematischen Datensätze aus, die nicht über die Landesgrenze hinaus kartiert wurden. Als Segmentierungshilfe wurde schließlich eine landesunabhängige digitale Kartierung aus dem eigenem Hause verwandt. Diese Vektordaten wurden in ArcView® in ein „grid“-Format umgewandelt. Nur wenige Formate sind als thematischer Layer in eCognition® einlesbar. Nach diesem Segmentierungsschritt folgt die eigentliche Klassifikation mit Nearest Neighbor. Samples können durch anklicken eingelesen werden und in einem iterativen Prozess so lange verändert werden, bis ein hinreichend genaues Ergebnis vorliegt. Dieser Klassifikator ist sehr einfach zu handhaben und wird von *Definiens* auch als „click and classify“ bezeichnet.

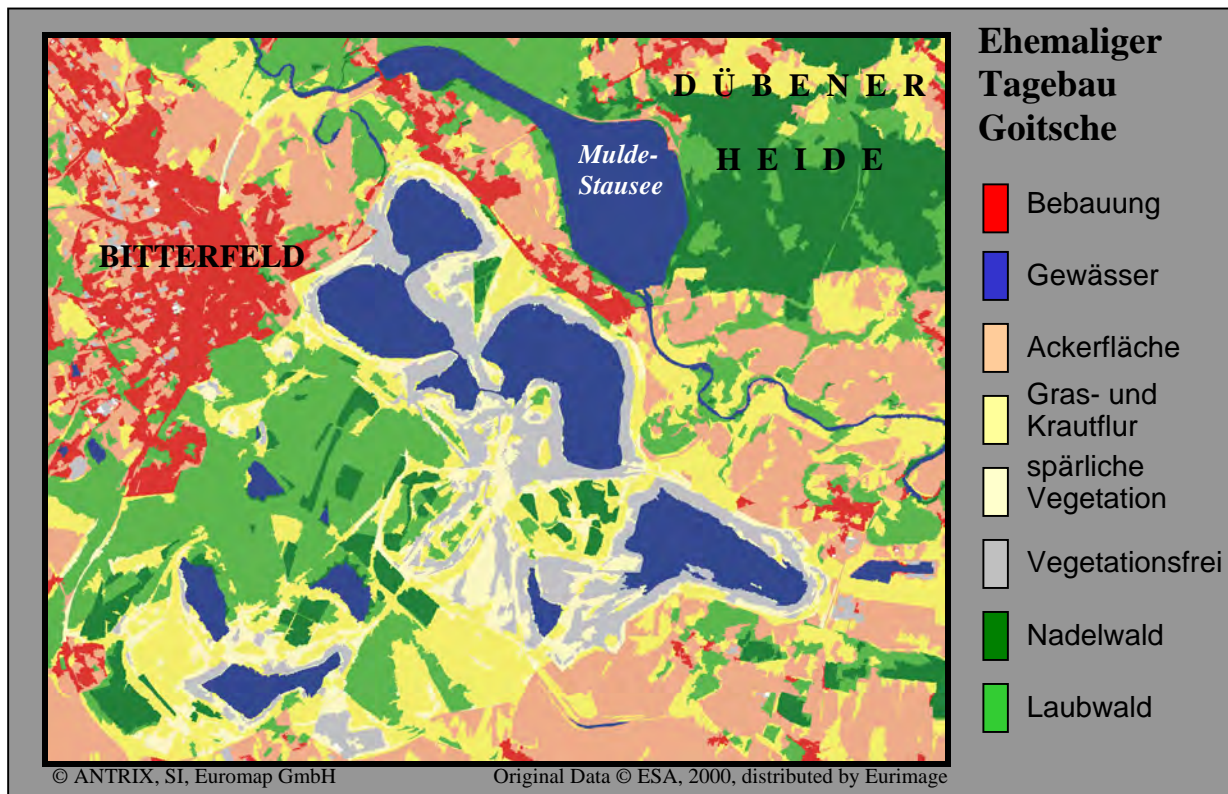


Abb. 5: Landnutzungsklassifikation der Goitsche mit Nearest Neighbor

#### Fallbeispiel 4: Kontrolle der Genehmigungsfelder Steine & Erden

In Sachsen-Anhalt ist das Geologische Landesamt für die Rohstoffsicherung zuständig. Für die Genehmigungsverfahren sind je nach abzubauenem Rohstoff sowie der beanspruchten Gesamtfläche entweder die Bergämter, die Regierungspräsidien oder die Landkreise zuständig (§3 BbergG; §1 UVP-V Bergbau; u.a.). Die Genehmigungsfelder werden durch Pflöcke abgesteckt und anhand von Luftbildern kontrolliert. Regelmäßige Kontrolle vor Ort findet jedoch aus Kapazitätsgründen selten statt. Im Folgenden sollen beispielhaft für zwei unterschiedliche Tagebaue Steine & Erden die Überwachung aufgezeigt werden.

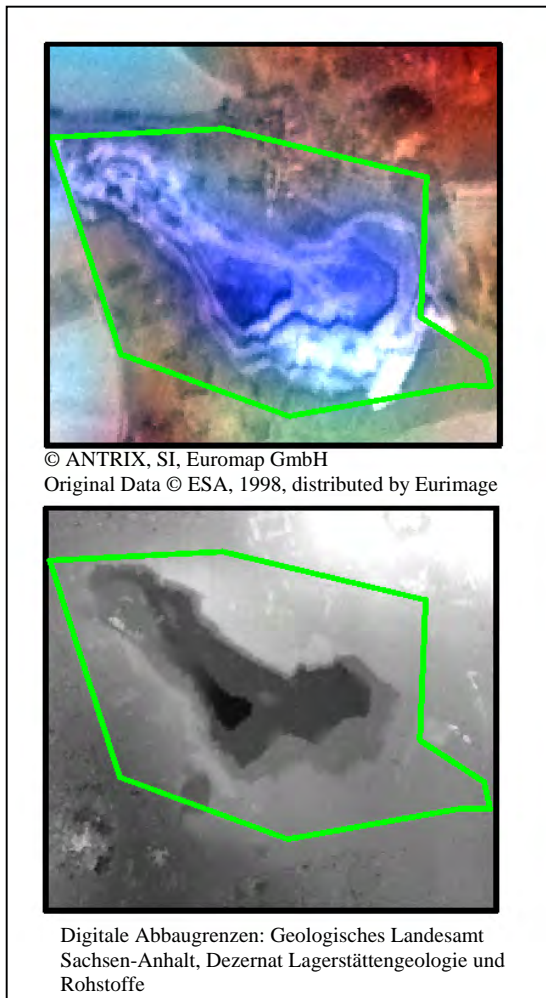


Abb. 5: Kontrolle der Genehmigungsfelder mit Satellitenbild und digitalem Höhenmodell

In einem Hartsteinbruch nahe Halle wird Oberer Hallescher Porphyry abgebaut. Für die visuelle Auswertung der IRS-1C-Datensätze wurden diese mit dem Local-Mean-Matching nach DE BÉTHUNE et al. (1998) fusioniert. Durch Variation der Filtermatrix können bei diesem Verfahren entweder die spektralen Eigenschaften des LISS-Datensatzes oder die geometrischen Eigenschaften des panchromatischen Datensatzes hervorgehoben werden. Für die beigefügte Abbildung sind die geometrischen Eigenschaften mit einer großen Filtermatrix betont. Die unterschiedlichen Abbausohlen sind deutlich erkennbar.

Dem eigentlichen Abbaufeld geht das Vorfeld voran. Hier wird die Grasnarbe und die obere Bodenschicht entfernt. Das reflektierte Signal wird vom anstehenden Gestein bzw. Substrat bestimmt und unterscheidet sich deutlich von seiner Umgebung mit Pflanzendecke.

Der Ausschnitt des Abbaues ist überlagert mit dem digitalen Genehmigungsfeld. Mit dieser einfachen Methode lassen sich sehr schnell Verdachtsflächen ermitteln. Eine solche Fläche befindet sich im östlichen Bereich des Abbaufeldes. Solche Verdachtsflächen sind im Gelände zu überprüfen und bei Verstößen gegebenenfalls entsprechende Maßnahmen einzuleiten.

Sehr hilfreich können allerdings auch hier Höhenmodelle sein. Unter Verwendung eines

digitalen Höhenmodells wird deutlich, dass sich bei obigem Beispiel alle Abbausohlen innerhalb des Genehmigungsfeldes befinden. Bei der ursprünglichen Verdachtsfläche handelt es sich um eine unbewachsene Halde auf unverritztem Gelände.

Das zweite Fallbeispiel zeigt einen Nasskiesabbau im Landkreis Wittenberg. Hier wurde das Schwellenwert-Verfahren bevorzugt, da es einfacher und schneller durchzuführen ist als eine überwachte Klassifikation. Der Interpretation liegen Landsat-7-ETM-Daten vom 13.09.1999 zugrunde. Im Bereich des nahen Infrarotes ist die Absorption von Wasserkörpern besonders hoch. Deshalb wird Kanal 4 (bei Landsat) als thematischer Datensatz im Viewer aufgerufen. Durch verändern der Farbattribute lässt sich nun interaktiv der Schwellenwert bestimmen. Die Grauwerte werden zu den gewünschten Klassen „Wasser“ und „Nichtwasser“ zusammengefasst. Gleichzeitig sollte das Ausgabeformat auf 1-bit geändert werden. Eine Vektorisierung, von den meisten Anwendern gewünscht, lässt sich erst bei Daten mit geometrischen Auflösungen von 5,8 m oder größer sinnvoll durchführen.

Der so generierte thematische Datensatz kann nun in einem Informationssystem mit den Genehmigungs- und Planungsdaten der Regierungspräsidien und der Landkreise eingebunden werden. Das Genehmigungsfeld I befindet sich seit 1994 in Abbau. Die Wasserfläche zum Zeitpunkt 13.09.1999 hat die geplante Ausdehnung nach Nutzungsende fast erreicht. Für Feld II (vgl. Abb. 6) liegt zwar eine Genehmigung vor, aber der Abbau beginnt erst im Jahre 2000. Folglich darf hier 1999 noch keine Abbautätigkeit zu verzeichnen sein.

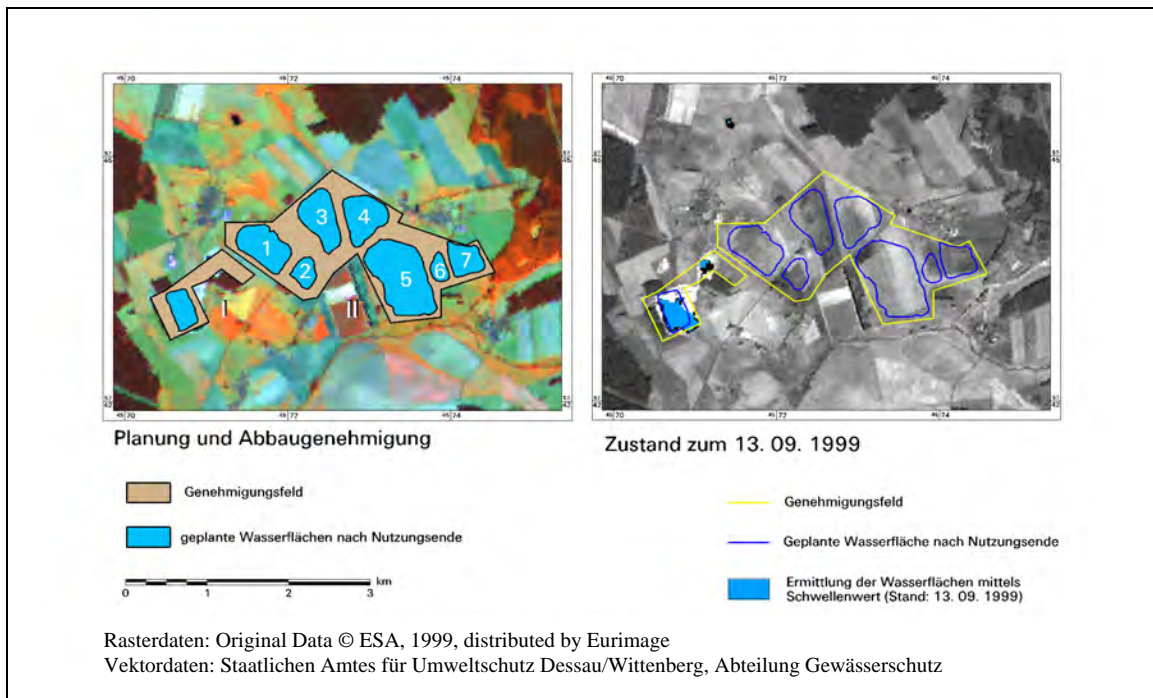


Abb. 6: Abbaugenehmigung und Planung im Vergleich mit dem Satellitenbild zum Aufnahmezeitpunkt 13.09.1999

## 5 Umsetzung in OFULSA

Zur Überführung der Lösungsansätze in das eingangs erwähnte Server-Client-System ist die Aufteilung der Auswerteprozesse in einzelne Arbeitsschritte notwendig. Sie dient letztendlich der eigentlichen Operationalisierung. Jeder Arbeitsschritt und jedes Produkt muss erfasst und katalogisiert werden. Dazu wurden Produkt-, Verfahrens-, Methoden-, Ergebniskataloge und eine Parameterliste eingerichtet. Sensor- und Providerinformation runden die Katalogstruktur ab. Der fernerkundungsunkundige Nutzer kann alle notwendigen Informationen aus diesen Katalogen beziehen. Sie liegen zurzeit als Access-Anwendung vor.

Im Sinne des Produktkataloges werden auf Bildprodukte standardisierte Verfahren angewandt. Dabei setzt sich jedes Verfahren aus einer Abfolge von Methoden zusammen. Methoden und Verfahren sind in den jeweiligen Katalogen beschrieben und genau dokumentiert. Damit nicht jede Variation in der Methode zu einer neuen führt, kann eine Methode mit unterschiedlichen Parametereinstellungen durchgeführt werden. Dadurch kann die Anzahl der Methoden reduziert werden. Jedem Verfahren ist jedoch immer eine ganz bestimmte Parametereinstellung eigen. Damit bleibt die Eineindeutigkeit der Verfahren und Produkte gewährleistet.

Im vorhergehenden Abschnitt konnte die Vielzahl der Fragestellungen und ihre heterogene Herangehensweise aufgezeigt werden. Durch das Baukastenprinzip lassen sich nun fast alle Fragestellungen genau definieren. Schwierigkeiten bereitet noch die Herangehensweise bei komplexen interaktiven Arbeitsabläufen. Hierzu müssen auch Schleifen möglich sein.

Als Beispiel für die Erstellung eines Produktes „Vektordatensatz mit Wasserflächen“ sei auf das stark vereinfachte Schema in Abb. 8 verwiesen.

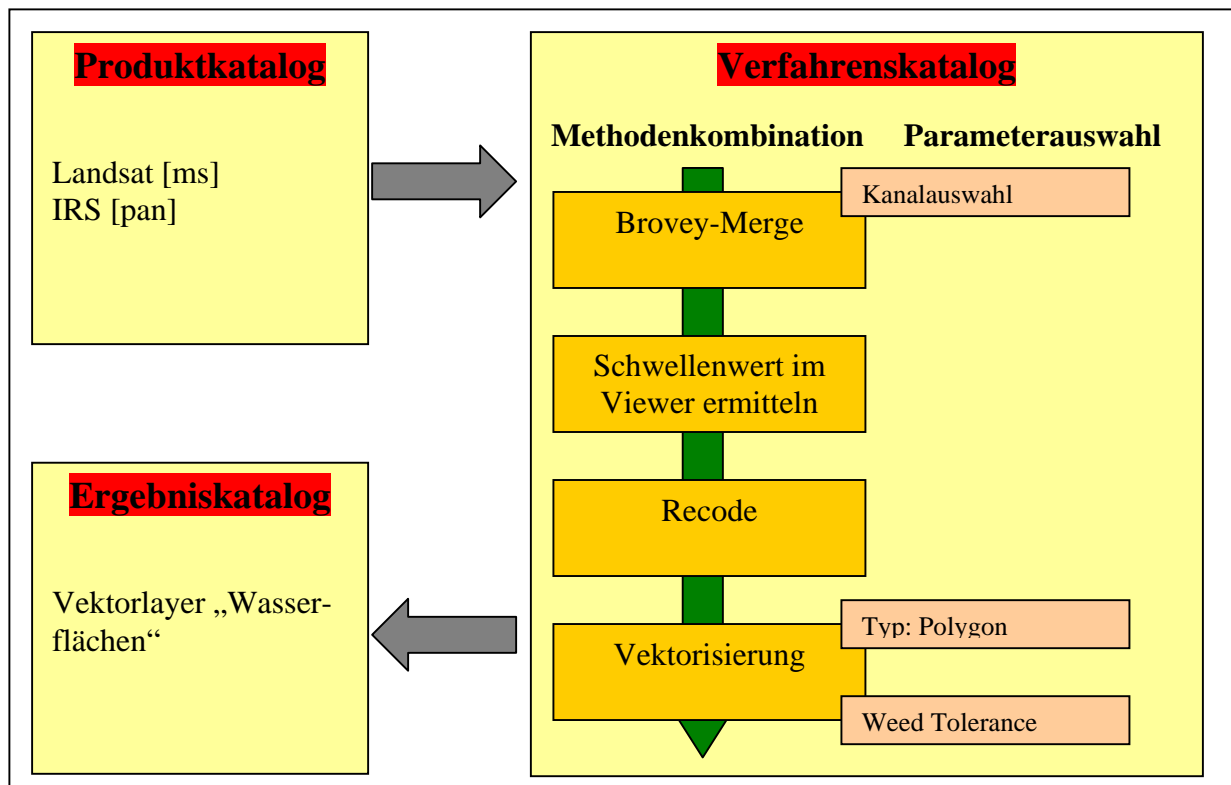


Abb. 7: Stark vereinfachtes Schema für eine konkrete Fragestellung in OFULSA

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Die angeführten Fallbeispiele zeigen deutlich die Vorzüge des Einsatzes von Satellitenbildern. Die Methoden sind einfach, aber effektiv. Dabei lassen sich alle Verfahrensabläufe durch Teilarbeitsschritte beschreiben. Dies dient letztendlich der Operationalisierung im Sinne des Produktkataloges. Die Überführung der Methoden in die einzelnen Kataloge ist zurzeit noch nicht abgeschlossen. Schwierigkeiten breiten besonders komplexe, interaktive Prozesse, wie sie in der Fernerkundung häufig sind.

Als Ziel von OFULSA sind Visualisierung, On-Screen-Digitizing, eine Arbeitsanleitung mit Methoden- und Verfahrensbeschreibungen und im günstigsten Falle ein eigenes GIS Modul angestrebt. Der allgemeine Kostendruck in den Staatshaushalten und das große Interesse seitens der Fachbehörden lässt auf einen späteren breitgefächerten Einsatz von OFULSA hoffen.

## 7 Literaturverzeichnis

- BAATZ, M., 2000: eCognition: Von der Fernerkundung zur Geoinformation. - ERDAS User Meeting, 13.-15.11.2000, Vorträge auf CD-Rom, Geosystems, Germering.
- BIRGER, J., 1998: Das Monitoring der Bergbaufolgelandschaften Mitteldeutschlands mit Hilfe von Fernerkundungsdaten. – In: FRUEHAUF, M. & U. HARDENBICKER (Hrsg.), 1998: Geowissenschaftliche Umweltforschung im mitteldeutschen Raum. – Beiträge der 3.

- Tagung zur Geographischen Umweltforschung in Mitteldeutschland 6.-7. November 1997, UZU-Schriftenreihe, N.F., 2, Halle (Saale), 77-85.
- BIRGER, J. & S. TISCHEW, 2000: Monitoring von naturschutzrelevanten Flächen in der Bergbaufolglandschaft Mitteldeutschlands mittels Fernerkundungsmethoden. - In: Schriftenreihe des BfN, Tagungsband zur Frühjahrssitzung des DGPF-Arbeitskreises „Interpretation von Fernerkundungsdaten“ zum Thema „Naturschutz und Fernerkundung“, 11.05.-12.05.2000 auf der Insel Vilm (in Druck).
- BLASCHKE, T., 2000: Objektextraktion und regelbasierte Klassifikation von Fernerkundungsdaten: Neue Möglichkeiten für GIS-Anwender und Planer. – 5. Symposium „Computergestützte Raumplanung“ CORP 2000, 153-162.
- DE BÉTHUNE, S., MULLER, F. & J.-P. DONNAY, 1998 : Fusion of Multispectral and Panchromatic Images by Local Mean and Variance Matching Filtering Techniques. – In: RAN-CHIN, T. & L.WALD (Ed.), Fusion of Earth Data, Sophia Antipolis, Nice, France, 20-30 January, 31-37.
- EIDNER, F., 1999: Die Goitzsche- Geschichte einer Landschaft. – Verwandlungen, Schriftenreihe der Expo 2000 Sachsen-Anhalt GmbH, 1999, Nr.1.
- EUROPEAN COMMUNITIES-COMMISSION, 1992: CORINE land cover project-Technical guide. - EUR 12585, Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg.
- GLÄBER, C., BIRGER, J. & B. HERRMANN, 1999: Integrated monitoring and management system of lignite opencast mines using multiple remote sensing data and GIS. – In: NIEUWENHUIS, G. et al (Ed.): Operational remote Sensing for sustainable development. Balkema, Rotterdam, 439-444
- KURZ, R., 1999: Ausgewählte Methoden der DHM-Generierung - vorgestellt für das Restloch Mühlbeck (Tagebau Goitsche). - Diplomarbeit an der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Institut für Geographie, Halle, unveröffentlicht.
- LANDESAMT FÜR UMWELTSCHUTZ SACHSEN-ANHALT, 1992: Katalog der Biotoptypen und Nutzungstypen für die CIR-luftbildgestützte Biotoptypen- und Nutzungstypenkartierung im Land Sachsen-Anhalt. - Berichte des Landesamt für Umweltschutz Sachsen-Anhalt, 1992 - Heft 4, Halle.
- OELKE, E. (Hrsg.), 1997: Sachsen-Anhalt. - Perthes Länderprofile: Geographische Strukturen, Entwicklungen, Probleme, Julius Perthes, Gotha.
- PLANFESTSTELLUNGSVERFAHREN FLUTUNG TAGEBAURESTLOCHKOMPLEX GOITSCHKE, 2000: Umweltverträglichkeitsstudie, Allgemein verständliche Zusammenfassung. - 54. Ausfertigung.
- PROJEKTHANDBUCH OFULSA, 1999: Operationalisierung von Fernerkundungsdaten für die Umweltverwaltung. - unveröffentlicht.
- SCHMIDT, H. & C. GLÄBER, 1998: Multitemporal analysis of satellite data and their use in the monitoring of the environmental impacts of open cast lignite mining areas in Eastern Germany. – International Journal of Remote Sensing, Vol. 19, No. 12, 2245-2260.
- SILHENGST, P., 1999: Naturschutzrelevante Flächen in der Goitsche. - Lausitzer und Mitteldeutsche Bergbau- Verwaltungsgesellschaft mbH, unveröffentlichtes Manuskript.
- WEIERS, S., 1999: Klassifikation oder Indikation: Fernerkundungsansätze zur Untersuchung von Biotopflächen. - In: MEHL, H & S. DECH (Hrsg.): Tagungsband: 16. Nutzerseminar des Deutschen Fernerkundungsdatenzentrums des DLR, Deutsches Fernerkundungsdatenzentrum, Oberpfaffenhofen, Mitteilung 1999-03, 85-95.

# Direkte Sensororientierung - Probleme und Lösungen

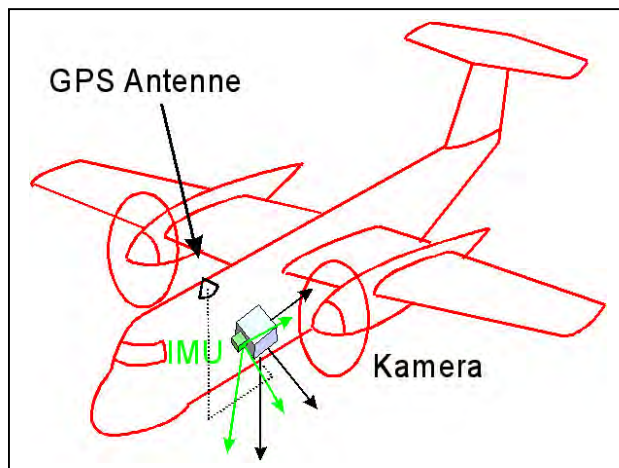
## Karsten Jacobsen<sup>1</sup> & Helge Wegmann<sup>2</sup>

*Abstract: Die Bestimmung der äußeren Orientierung durch die Kombination Inertialer Messeinheiten (IMU) mit relativer kinematischer GPS-Positionierung hat ein Genauigkeitsniveau für die photogrammetrische Objektpunktbestimmung im Dezimeterbereich erreicht. Um dieses Genauigkeitspotential voll nutzen zu können, müssen viele Einzelkomponenten berücksichtigt werden, die bislang meist nicht berücksichtigt wurden. Hierzu zählen die innere Orientierung, speziell die Kammerkonstante, die nicht einfach vom Kalibrierungsprotokoll übernommen werden kann, die Kartennetzabbildung und die Verebnung der Erdoberfläche. Glücklicherweise werden viele Einflussgrößen durch die Bestimmung des Misalignments zwischen der Kamera und der IMU kompensiert, Voraussetzung ist allerdings, dass die Bildflüge sowohl im Maßstabbereich als auch in der Lage mit dem Kalibrierungsgebiet zur Bestimmung des Misalignments übereinstimmen müssen. Ist dieses nicht der Fall, müssen alle Einzelkomponenten genau berücksichtigt werden. Die Systemkalibrierung und die damit erreichbare Genauigkeit wird mittels einiger Testdatensätze dargestellt.*

## 1. Einführung

Die direkte Sensororientierung durch Kombination relativer kinematischer GPS-Positionierung mit inertialen Messeinheiten (IMU) gewinnt zunehmend an Bedeutung. Flugzeug getragene Mehrfachzeilenscanner und Laserscanner sind auf die direkte Sensororientierung angewiesen, aber auch für die Orientierung normaler Luftbilder wird sie zunehmend eingesetzt. Im weiteren wird der Einsatz der IMU für die Orientierung von Luftbildern behandelt.

Von grundlegender Bedeutung ist die geometrische Beziehung zwischen der IMU und der Luftbildkamera. Die Translation stellt kein Problem dar, wohl aber die Winkelbeziehung (siehe Abb. 1). Wegen nicht auszuschließender zeitlicher Änderungen scheidet eine Laborkalibrierung



aus, es ist eine Testfeldkalibrierung unter dem Bildflug vergleichbaren Bedingungen mit nicht zu großem zeitlichen Abstand durchzuführen.

Abb. 1: Geometrische Beziehung Kamera, IMU und GPS-Antenne

Prinzipiell stellt die Auswertung photogrammetrischer Modelle, basierend auf direkter Sensororientierung, eine

Extrapolation dar. Damit können sich auch kleine Fehler, die bei der auf Passpunkten basierenden Modellauswertung durch die Elemente der äußeren Orientierung kompensiert werden können, negativ auswirken. Ein Beispiel hierfür stellt die Kammerkonstante dar, die bei herkömmlicher photogrammetrischer Auswertung mit der Flughöhe extrem korreliert ist und sich damit praktisch nicht als Fehlerquelle bemerkbar macht. Die Kammerkonstante wird normalerweise im Labor bestimmt und bis zur nächsten Überprüfung beibehalten obwohl sie sich unter den Flugbedingungen erheblich verändern kann (Meier 1978) – siehe Tabelle 1. Eine Änderung der Kammerkonstante von  $47\mu\text{m}$  im Falle einer Weitwinkelkamera bei 6000m Flughöhe entspricht einem Höhenfehler von 1,8m,  $110\mu\text{m}$  im Falle der Normalwinkelkamera

entsprechen einem Höhenfehler von 2,1m. Beides liegt über der normalen Höhenauswertegenauigkeit. Damit ergibt sich die Notwendigkeit, für die direkte Sensororientierung die aktuelle Kammerkonstante zu bestimmen oder sie auf andere Weise zu kompensieren.

Flughöhe	Druckkabine mit Abschlussglas		Optik in freier Atmosphäre, temperiert auf 7°C		Optik in freier Atmosphäre, Temperatur wie Außenluft	
	6 km	14 km	6 km	14 km	6 km	14 km
Weitwinkelkamera c=153mm	-20µm	-38µm	-36µm	-58µm	-47 µm	-80 µm
Normalwinkelkamera c=305mm	+12 µm	-17µm	-33µm	-28µm	-110 µm	-172 µm

Tabelle 1: Änderung der Kammerkonstante entsprechend der Bildflugbedingungen (Meier 1978)

Ähnlich verhält es sich mit der Lage des Hauptpunktes, auch sie ist bei normalen Bildflügen wegen hoher Korrelation zur äußeren Orientierung nicht bestimmbar, wirkt sich aber bei der direkten Sensororientierung aus. Liegen Beobachtungen der Projektionszentren vor, ist die innere Orientierung bestimmbar. Leider sind zumindest konstante Fehler der GPS-Beobachtungen nicht auszuschließen, sie müssen als Unbekannte eingeführt werden. Damit treten neue Korrelationen auf, die nur bei gemeinsamer Bestimmung in mindestens 2 deutlich verschiedenen Flughöhen eine Lösung ermöglichen.

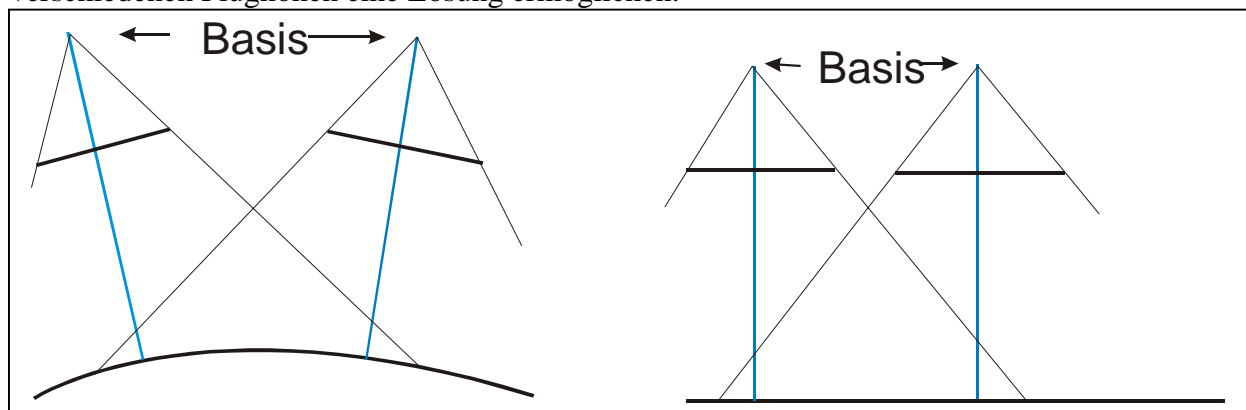


Abb. 2 Änderung des Basis-Höhen-Verhältnisses durch die Erdkrümmungskorrektur

$$\Delta b = \frac{h}{R} \cdot b \quad \Delta fe = \frac{h}{R} \cdot f$$

$\Delta b$  = Änderung der Basis durch Erdkrümmungskorrektur  
 $\Delta fe$  = Änderung der Kammerkonstante zur Kompensation des Einflusses der Erdkrümmungskorrektur  
 R = Erdradius    h = Flughöhe über Grund  
 b = Basis        f = Kammerkonstante

Formel 1: Kompensationsmöglichkeit des Einflusses der Erdkrümmungskorrektur auf das Basis-Höhen-Verhältnis durch Änderung der Kammerkonstante

Als weiteres Problem treten die traditionell vernachlässigten kleineren Fehler des mathematischen Modells auf. Die Verebnung der Erdoberfläche durch die Kartennetzabbildung wird meistens nur durch Einführung einer Erdkrümmungskorrektur berücksichtigt. Dabei wird

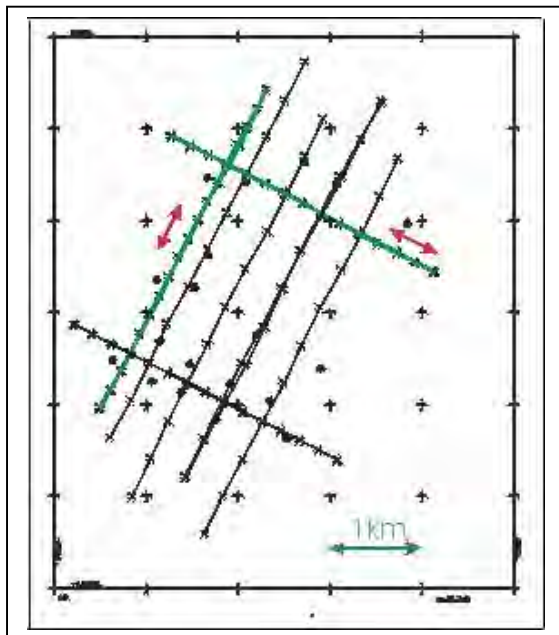


meistens der lokale Maßstab der Kartennetzabbildung vernachlässigt, der nach Einpassung auf die Passpunkte sich als Maßstabsfehler für die Höhe auswirkt. Bei herkömmlichen photogrammetrischen Auswertungen ist die Auswirkung vernachlässigbar, nicht jedoch bei der direkten Sensororientierung, bei der sich der Maßstabsfehler auf die ganze Flughöhe auswirkt. Des weiteren führt die Verebnung des Koordinatensystems zu einer Änderung des Höhen-Basis-Verhältnisses, was sich auch auf die Höhe auswirkt (Abbildung 2), jedoch durch eine Änderung der Kammerkonstante kompensiert werden kann (Formel 1).

Alle diese Punkte legen nahe, mit einem tatsächlich orthogonalen Koordinatensystem zu arbeiten. Das geozentrische Koordinatensystem ist unpraktisch da es zu einer Vermischung der Lage- und Höhenfehler führt, die normalerweise deutlich unterschiedlich sind, besser geeignet ist ein Tangentialsystem zum Rotationsellipsoid. Hier ergibt sich das praktische Problem, das die endgültige Auswertung meistens in einem GIS durchzuführen ist, das im Landeskoordinatensystem vorliegt und somit eine Transformation erfordert, die nicht durch alle Softwaresysteme durchgeführt werden kann. Aus diesem Grund wird im Weiteren untersucht ob unter Einbeziehung der Bestimmung der Lage der IMU zur Kamera (misalignment) doch im Landeskoordinatensystem gearbeitet werden kann.

## 2. Testblock

Die empirischen Untersuchungen wurden mittels der Daten des OEEPE-Tests "Integrierte Sensor Orientierung" durchgeführt (Heipke et al 2000). Das Testfeld in Frederikstad, Norwegen, wurde mit Registrierung durch das GPS/IMU-System POS/AV 510 von Applanix, Toronto, Kanada und in einem separaten Bildflug mit dem Aerocontrol II der IGI mbH, Deutschland, befliegen. Beide Datensätze, die ohne Bezug auf die Firmen mit Company 1 und Company 2 bezeichnet werden, bestehen aus Kalibrierungsflügen mit dem Bildmaßstab 1 : 5000 und 1 : 10 000 und einer Testblockbefliegung im Maßstab 1 : 5000. Die signalisierten Paß- und Vergleichspunkte wurden mit einer Genauigkeit von +/-1cm in allen Koordinatenkomponenten bestimmt, die Bildmessung erfolgte mittels eines Planicom P1.



Testblock Frederikstad  
mit Doppelpfeilen gekennzeichnete  
Flugstreifen Bildmaßstab 1 : 5000,  
andere Streifen 1 : 10 000

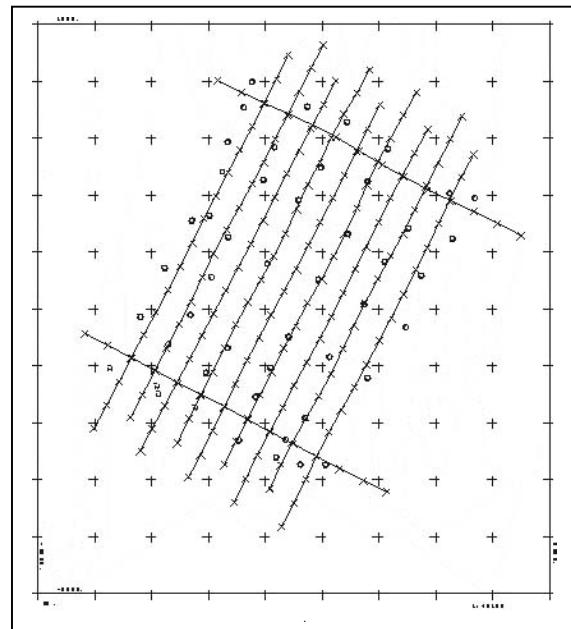


Abb. 3: Kalibrierungsflug Frederikstad,

Bildmaßstab 1 : 5 000

### 3. Relation Kamera – IMU

Die geometrische Relation zwischen der Kamera und der IMU, bestimmt durch 3 Translationen und 3 Rotationen, wurde zusammen mit der inneren Orientierung durch kontrollierte Bündelblockausgleichungen mit allen Bildern des Kalibrierungsflugs separat für Company 1 und Company 2 berechnet. Die Ausgleichung erfolgte in einem Tangential- und im UTM-Koordinatensystem. Im UTM-Koordinatensystem wurde mit und ohne Erdkrümmungs- und Refraktionskorrektur gerechnet. Der radialsymmetrische Einfluss der Erdkrümmungs- und Refraktionskorrektur kann durch Selbstkalibrierung mit zusätzlichen Parametern kompensiert werden, hierbei tritt allerdings eine Beeinflussung der Kammerkonstante ein, wenn wie üblich, die radialsymmetrische Komponente mit einem Nulldurchgang eingeführt wird – siehe Abb. 4.

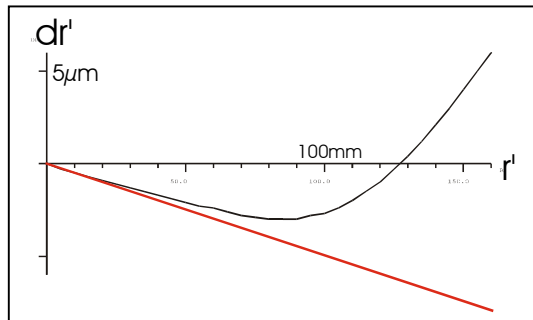


Abb. 4: radialsymmetrische Verzeichnung bestimmt durch Selbstkalibrierung, Company 2, Berechnung ohne Erdkrümmungskorrektur und dadurch hervorgerufene Änderung der Kammerkonstante – ausgedrückt durch Gerade

Für einen Radialabstand von 146mm und einen Bildmaßstab 1:5000 beträgt die Refraktionskorrektur  $-2\mu\text{m}$ , die Erdkrümmungskorrektur  $+7\mu\text{m}$  und damit der resultierende Effekt  $5\mu\text{m}$ . Für den Bildmaßstab 1 : 10 000 beläuft er sich auf  $11\mu\text{m}$ . Mit Vorkorrektur durch Erdkrümmungs- und Verzeichnungsverbesserung überschreitet die radialsymmetrische Verzeichnung im Falle von Company 2 nicht den Betrag von  $1\mu\text{m}$  – damit zeigt die Abbildung 4 praktisch nur den in diesem Fall fehlenden Einfluss der Vorkorrektur. Dadurch wurde die Kammerkonstante mit  $7\mu\text{m}$  beeinflusst (vertikaler Abstand zur geneigten Gerade in Abb. 4 bei  $r'=153\text{mm}$ ) entsprechend einem Höhenfehler im Bildmaßstab 1 : 5000 von 35mm.

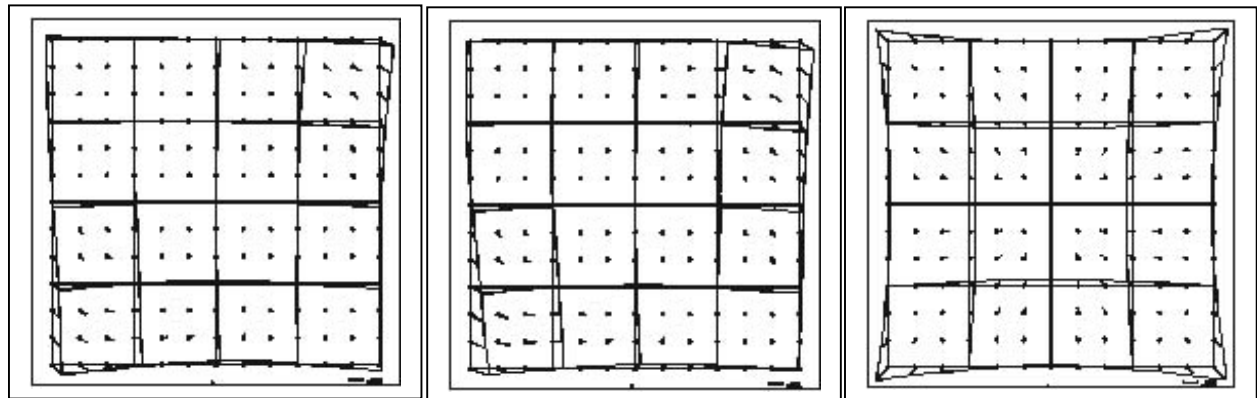
	Company 1	Company 2
	<b>mit Selbstkalibrierung</b>	
Tangentialkoordinatensystem	$-41\mu\text{m}$	$+13\mu\text{m}$
UTM ohne Erdkrümmungs- und Refraktionskorrektur	$+20\mu\text{m}$	$+49\mu\text{m}$
UTM mit Erdkrümmungs- und Refraktionskorrektur	$+5\mu\text{m}$	$+39\mu\text{m}$
	<b>ohne Selbstkalibrierung</b>	
Tangentialkoordinatensystem	$+4\mu\text{m}$	$+1\mu\text{m}$
UTM ohne Erdkrümmungs- und Refraktionskorrektur	$+18\mu\text{m}$	$+43\mu\text{m}$
UTM mit Erdkrümmungs- und Refraktionskorrektur	$+24\mu\text{m}$	$+50\mu\text{m}$

Tabelle 2: Korrektur der Kammerkonstante berechnet durch Bündelblockausgleichung

Die Tendenz der Änderung der Kammerkonstante ist für Company 1 und Company 2 ähnlich, wie auch zwischen den verschiedenen Arten der Referenzblockausgleichung. Die absoluten Werte unterscheiden sich jedoch, was durch nicht vermeidbare zufällige Fehler und tatsächliche physikalische Unterschiede gegenüber der Laborkalibrierung erklärbar ist.

Die Abweichung von den zuvor dargestellten theoretisch vereinfachten Abhängigkeiten kann durch den Einfluss der systematischen Bildfehler erklärt werden die sich auf die innere Orientierung auswirken. Besonders die radialsymmetrische Verzeichnung ist mit der Kammerkonstante korreliert. Prinzipiell ist keine vollständige Trennung aller Einflussgrößen möglich, weswegen grundsätzlich eine Systemkalibrierung erfolgt.

Die durch Blockausgleichung in den unterschiedlichen Koordinatensystemen ermittelten systematischen Bildfehler ähneln sich, wie am Beispiel der Company 2 in den Abbildungen 5 und 6 dargestellt. Der hauptsächliche Unterschied liegt, wie zu erwarten, in dem radialsymmetrischen Einfluss (siehe Abb. 7).



größter Vektor 25 $\mu$ m

21 $\mu$ m

7  $\mu$ m

**“systematische Bildfehler” Company 2**

Abb 5: Tangentialkoordinaten-System

Abb.6: UTM ohne Erdkrümmungskorrektur

Abb.7: Differenz Abb. 5 – Abb. 6

Die berechneten Unterschiede der Kammerkonstanten müssen in Verbindung mit den in den gleichen Ausgleichungen ermittelten Z-Komponenten des Misalignments gesehen werden – beide sind stark korreliert. Die Lage der Hauptpunkte ist dagegen von den Berechnungen in den verschiedenen Koordinatensystemen weitgehend unabhängig und variiert nur wenige Mikrometer.

Die mittels der Kalibrierungsflüge bestimmten Bildorientierungen, einschließlich der inneren Orientierungen, wurden als Referenz für die Bestimmung des Misalignments benutzt. Die Unterschiede der Achsenlagen müssen im inertialen System (rollen, nicken, gieren) mit gieren als Primärdrehung berechnet werden. Die Unterschiede zwischen den transformierten photogrammetrisch bestimmten Orientierungen und den IMU-Daten stellen das Misalignment dar. Die Streuung der Unterschiede zeigen die Genauigkeit des Misalignments an. Auch die durch Blockausgleichung mittels Paßpunkten bestimmten Bildorientierungen sind nicht fehlerfrei, besonders X0, Y0 und phi, omega bzw. die transformierten Winkel rollen und nicken sind miteinander hoch korreliert (Jacobsen 1999). Im Falle von Schmalwinkelkameras, wie der digitalen Kodak DCS460, ist es kaum möglich, die Winkel des Misalignments von den Translationen in X und Y zu trennen. Im Falle von Standard-Luftbildkamern ist eine Trennung der Komponenten möglich, die durch die Korrelation hervorgerufenen Abhängigkeiten sind jedoch für die heute erzielten Genauigkeiten nicht vernachlässigbar und wirken sich vor allem aus, wenn der Bildmaßstab der Bestimmung des Misalignments nicht mit dem des Produktionsblockes übereinstimmt.

	pitch	roll	yaw	X0	Y0	Z0
Company 1 UTM	0.0038°	0.0035°	0.0102°	6.7cm	8.1cm	7.6cm
Company 1 tangential	0.0029°	0.0039°	0.0106°	6.8cm	7.8cm	6.9cm
Company 2 UTM	0.0067°	0.0046°	0.0077°	15.4cm	15.5cm	5.6cm
Company 2 tangential	0.0055°	0.0059°	0.0078°	12.1cm	13.6cm	2.5cm

Tabelle 3: mittlere quadratische Abweichung der Bildorientierung bestimmt durch kontrollierte Blockausgleichung und den IMU-Werten nach Berücksichtigung des Misalignments

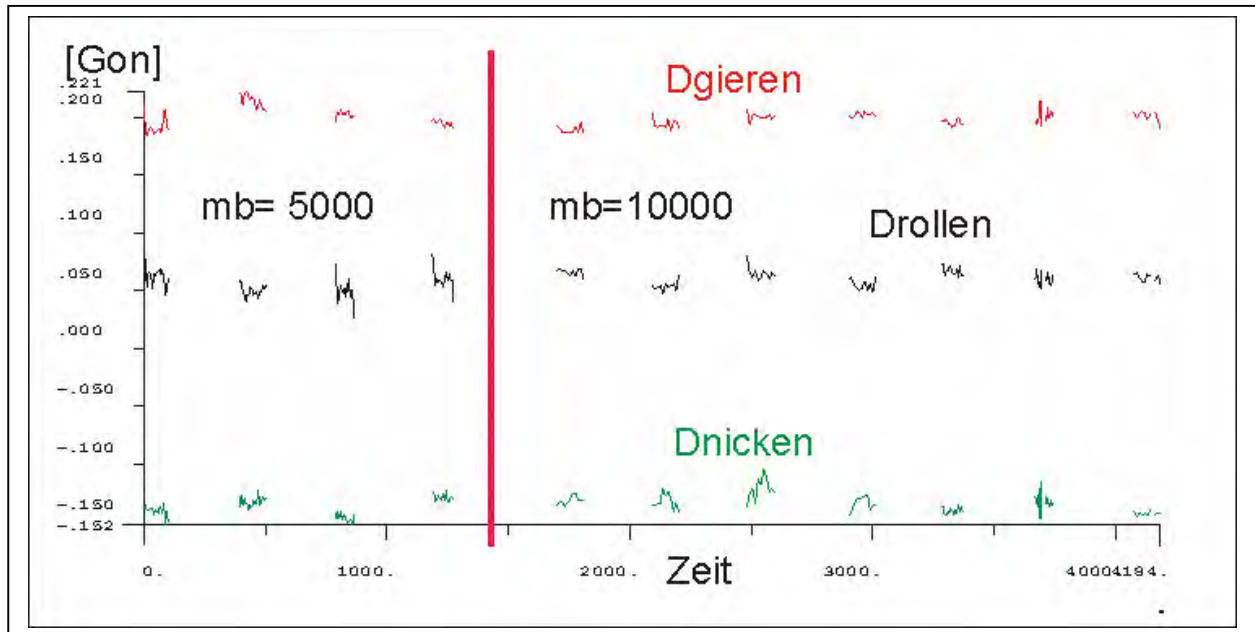


Abb. 8: Winkeldifferenzen kontrollierte Blockausgleichung – IMU (company 2, UTM)

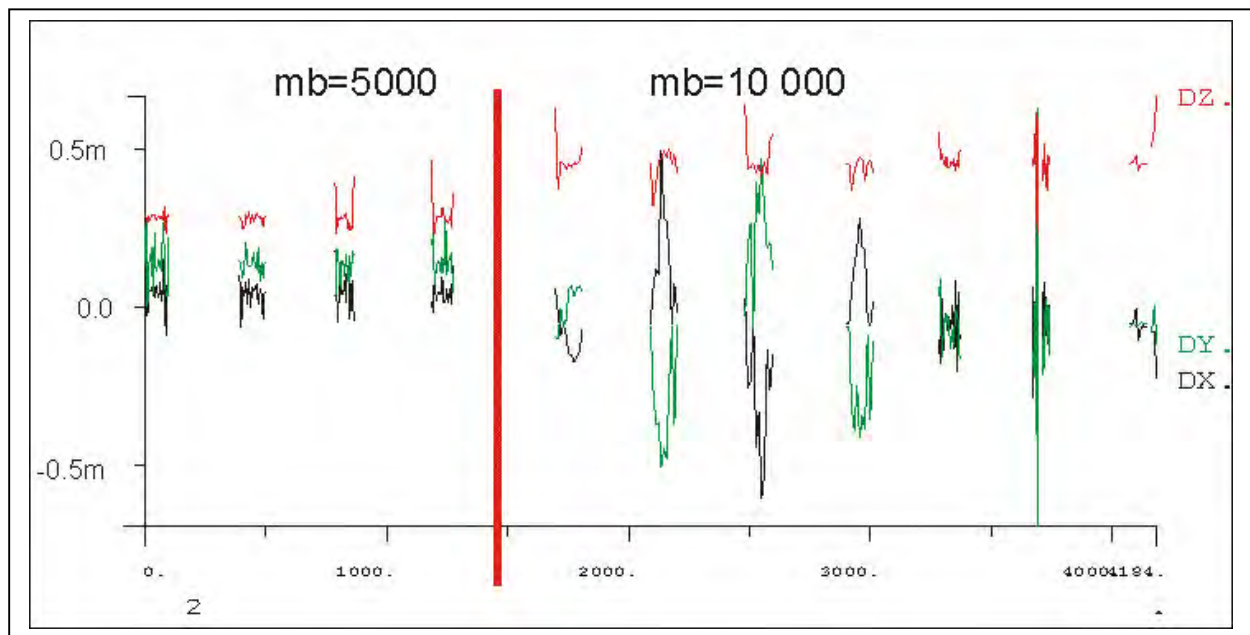


Abb 9: Differenzen der Projektionszentren (company 2, Tangentialsystem)

Die Abbildungen 8 und 9 stellen die Unterschiede zwischen den mittels kontrollierter Blockausgleichung bestimmten Bildorientierungen und den IMU-Werten dar. Die Differenzen unterscheiden sich von denen, bestimmt im UTM-Koordinatensystem, kaum, es treten hauptsächlich nur die durch die unterschiedliche Bearbeitung hervorgerufenen Verschiebungen auf. Dieses zeigt sich auch in Tabelle 3. Die Winkelunterschiede zeigen praktisch keine Abhängigkeit von den Flugstreifen und der Zeit. Die Translationen variieren dagegen geringfügig von Flugstreifen zu Flugstreifen, es wurden hier aber noch nicht die unterschiedlichen Hauptpunktlagen berücksichtigt, die eine flugrichtungsabhängige Verschiebung verursachen.

Die kleinen Unterschiede zwischen den Ergebnissen der beiden Firmen lassen sich durch Unterschiede der Hardwarekomponenten der IMU erklären. So wurde in einem Fall ein

klassisches rotierendes Kreiselssystem eingesetzt, was heute durch faseroptische Kreisel ersetzt werden würde.

## 4. Objektpunktbestimmung

Mittels der bestimmten Misalignment-Werte können die IMU-Werte verbessert und in die in der Photogrammetrie üblichen Winkel umgerechnet werden. Unter Verwendung der bestimmten Kammerkonstanten kann ein kombinierter Vorwärtsschnitt, basierend auf den Bildkoordinaten der Kalibrierungsblöcke erfolgen. Die so ermittelten Objektkoordinaten lassen sich mit den Paßpunktkoordinaten, aber auch den Objektkoordinaten der Referenzausgleichungen vergleichen.

	Paßpunkte			alle Objektpunkte			$\sigma$ Vorwärtsschnitt
	MXpp	MYpp	MZpp	MX	MY	MZ	
Company 1, UTM	8.2cm	6.9cm	9.8cm	16.6cm	12.8cm	22.3cm	22.0 $\mu$ m
Company 1, tangential	8.1cm	6.7cm	9.7cm	16.1cm	12.7cm	21.4cm	22.6 $\mu$ m
Company 2, UTM	8.7cm	5.8cm	12.4cm	11.4cm	9.2cm	14.5cm	23.3 $\mu$ m
Company 2, tangential	7.9cm	6.3cm	12.8cm	11.6cm	9.6cm	14.6cm	24.2 $\mu$ m

Table 4: Quadratmittel der Unterschiede der durch kombinierten Vorwärtsschnitt mit den IMU-Daten ermittelten und den Objektkoordinaten bestimmt durch Referenzblockausgleichung

Die Quadratmittel der Unterschiede der Objektkoordinaten, bestimmt durch kombinierten Vorwärtsschnitt mittels der IMU-Daten und die durch Paßpunkte gestützten Referenzblockausgleichungen, die eine innere Genauigkeit darstellen, zeigen praktisch keine Abhängigkeit von der Berechnung im Landes- oder im Tangentialkoordinatensystem. Die Abweichungen an den Passpunkten sind kleiner als die Objektpunktkoordinatendifferenzen, obwohl diese nicht voneinander unabhängig sind. Die Erklärung hierfür ist, dass die Objektpunkte im Durchschnitt in 6,8 Bildern, die Passpunkte dagegen in 13 Bildern gemessen wurden. Die Unterschiede zwischen company 1 und 2 sind darauf zurück zu führen, dass die Befliegung von company 1 durch aufkommende Bewölkung beeinträchtigt wurde.

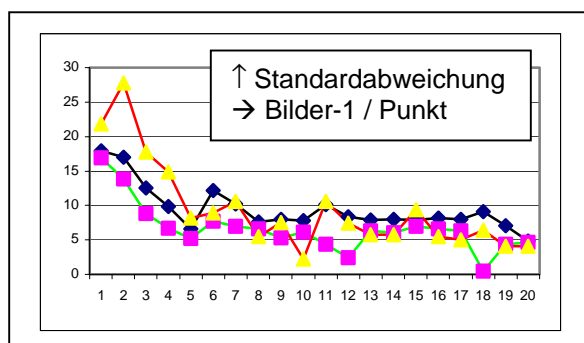


Abb. 10: Objektkoordinatengenauigkeit als Funktion der Anzahl der Bilder je Objektpunkt

Die Bestimmung des Misalignments konnte die Modellfehler (Erdrückungseinfluß und Koordinatensystem) vollständig kompensieren. Anders sieht es aus, wenn die Kalibrierung nur mit den Luftbildern im Maßstab 1 : 10 000 berechnet wird und das damit ermittelte Misalignment auf den Bildmaßstab 1 : 5000 übertragen wird. Werden nur Luftbilder eines Maßstabs benutzt, kann die innere Orientierung nicht verbessert und es muss die

Kammerkonstante des Kalibrierungszertifikats benutzt werden. Die Berechnung im UTM-Koordinatensystem führte zu erheblichen systematischen Fehlern des kombinierten Vorwärtsschnitts für company 1 im Maßstab 1 : 5000 von  $\text{systX}=8,7\text{cm}$ ,  $\text{systY}=6,6\text{cm}$  und  $\text{systZ}=20,4\text{cm}$ . Diese systematischen Fehler treten bei der Berechnung im Tangentialkoordinatensystem mit  $\text{systX}=3,7\text{cm}$ ,  $\text{systY}=4,5\text{cm}$  und  $\text{systZ}=0,8\text{cm}$  praktisch nicht auf.

## 5. Modellorientierung

Die Genauigkeit der durch gemeinsamen Vorwärtsschnitt ermittelten Punkte in dem Auswerteblock von etwa  $\text{SX}=13\text{cm}$ ,  $\text{SY}=12\text{cm}$  und  $\text{SZ}=12\text{cm}$  ist nur ein Aspekt der photogrammetrischen Auswertung. Für die Orthophotoerstellung ist die Genauigkeit der direkten Sensororientierung in der Regel ausreichend. Probleme können dagegen bei der Modellorientierung auftreten. Aus Abbildung 10 ergibt sich, dass Punkte, die nur in 2 Bildern bestimmt wurden schon eine deutlich geringere Genauigkeit aufweisen, als andere. Für company 2 ergaben sich für 178 Modelle die y-Parallaxen im Quadratmittel zu  $\pm 20\mu\text{m}$ , wobei 157 Modelle eine Standardabweichung der y-Parallaxe von  $\text{Spy} > 10\mu\text{m}$ , 50 Modelle  $> 20\mu\text{m}$ , 17 Modelle  $> 30\mu\text{m}$  und 4 Modelle  $> 50\mu\text{m}$  aufwiesen. Y-Parallaxen, die  $20\mu\text{m}$  überschreiten, führen zu einer Beeinträchtigung des Stereoeffektes, der bei  $\text{py} > 30\mu\text{m}$  meistens aufhört.

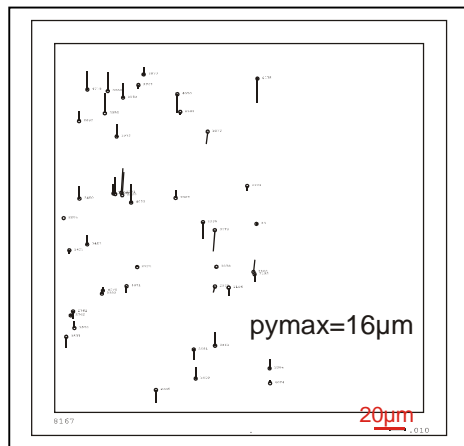


Abb. 11: y-Parallaxen der kombinierten Blockausgleichung ohne Passpunkte

In dem Modell 6167/6168 ergibt sich die y-Parallaxe durch direkte Sensororientierung zu  $\pm 42\mu\text{m}$ , damit ist das Modell stereoskopisch nicht auswertbar. Abhilfe schafft hier eine kombinierte Blockausgleichung ohne Passpunkte (Beobachtungen = Bildorientierung bestimmt durch direkte Sensororientierung + Bildkoordinaten), sie reduziert  $\text{spy}$  auf  $\pm 8\mu\text{m}$  (siehe Abb. 11), womit keine weiteren Probleme auftreten.

## 6. Zusammenfassung

Die Genauigkeit der direkten Sensororientierung hat sich auf ein Niveau verbessert, das die Anwendung für viele Bereiche ermöglicht. Die Auswertung wird normalerweise direkt im Landeskoordinatensystem durchgeführt obwohl dieses nicht dem mathematischen Modell entspricht. Wenn die Bestimmung des Misalignment unter gleichen Bedingungen wie der Bildflug erfolgt, d.h. mit einem ähnlichen Bildmaßstab, kompensiert das Misalignment die Fehler des mathematischen Modells. Erfolgt dagegen die Ermittlung des Misalignments mit einem deutlich anderen Bildmaßstab, führt dieses bei direkter Verwendung des Landeskoordinatensystems zu nicht vertretbaren systematischen Fehlern, was bei Bearbeitung im mathematisch strikten Tangentialkoordinatensystem nicht der Fall sein muss. Eine strikte Bestimmung des Misalignments für nicht nur einen Bildmaßstab erfordert eine Referenzbefliegung mit 2 deutlich unterschiedlichen Bildmaßstäben, die neben der Ermittlung konstanter Orientierungsfehler, auch eine Bestimmung der inneren Orientierung (Kammerkonstante und Bildhauptpunkt) ermöglicht.

Bei der Modellorientierung, basierend auf der direkten Sensororientierung, sind trotz des heute erreichten Genauigkeitsniveaus nicht-vertretbare y-Parallaxen unvermeidbar. Sie können durch

eine kombinierte Ausgleichung mit Bildkoordinaten, aber ohne Passpunkte, beseitigt werden. Die kombinierte Ausgleichung hat außerdem den großen Vorteil einer Verbesserung der Zuverlässigkeit, die bei der direkten Sensororientierung praktisch nicht vorhanden ist. Auf diese Weise können auch Bildstreifen einbezogen werden, bei denen die direkte Sensororientierung versagt hat.

## Literaturverzeichnis

- Heipke, C., Jacobsen, K., Wegmann, H., Andersen, Ø, Nilsen, B. (2000), Integrated Sensor Orientation – an OEEPE Test, IAPRS, Vol. XXXIII ISPRS Amsterdam
- Heipke, C., Jacobsen, K., Wegmann, H.: OEEPE Test on Integrated Sensor Orientation, ASPRS Annual Convention, St. Louis, 2001
- Jacobsen, K. (1999): Combined Bundle Block Adjustment with Attitude Data, ASPRS Annual Convention 1999, Portland
- Jacobsen, K. (2000): Potential and Limitation of Direct Sensor Orientation, IAPRS, Vol. XXXIII ISPRS Amsterdam
- Jacobsen, K. (2001): Aspects of Handling Image Orientation by Direct Sensor Orientation, ASPRS Annual Congress, St. Louis, 2001
- Meier, H.-K. (1978): Verzeichnung, Kammerkonstante und Fokussierung von Luftbildkamern unter dem Einfluss bildflugspezifischer Umweltbedingungen, BuL 1978, pp 193 - 198

# Unterstützung der Modellierung des Schneeschmelz- vorganges durch Fernerkundung

JOSEF JANSA<sup>1</sup>, MONIKA SCHÖNER<sup>2</sup>

*Zusammenfassung: Für die Wiener Wasserwerke wurde die Schneeschmelze modelliert. Satellitenbilder von SPOT und ERS kamen zum Einsatz, um die Schneedecke in regelmäßigen Abständen zu erfassen. Diese Ergebnisse werden benötigt, um das Schneeschmelzmodell zu eichen und weniger, um absolute Schneeparameter abzuleiten. Eine wichtige Aufgabe ist die Klassifizierung der Ausdehnung der Schneedecke. Mehrere Klassifizierungsverfahren wurden verwendet, von der klassischen überwachten multispektralen Klassifizierung, über eine unüberwachte mit an die Beleuchtungsgegebenheit adaptiertem Ablauf bis hin zu einer Schneeindexberechnung. Aus den SAR-Bildern wurde über Ratio-Bildung die Veränderung der Feuchte abgeleitet. Die Wahl der Methode richtet sich im wesentlichen nach dem Potential der vorhandenen Satellitendaten.*

## 1 Vorbemerkung

Im Kalkalpen-Bereich im Gebiet der Schneealpe ca. 100 km südlich von Wien, werden eine Reihe von Quellen durch die Wiener Wasserwerke für die Trinkwasserversorgung der Stadt betrieben. Ein beträchtlicher Teil der Wasserressourcen stammt von Schnee, der dort etwa zwischen Oktober und April fällt. Die Stadt Wien, konkret die Wasserwerke (kurz MA31), haben angeregt, daß das Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung (I.P.F.) in Zusammenarbeit mit dem Institut für Hydraulik, Gewässerkunde und Wasserwirtschaft (IHGW) (beide an der Technischen Universität Wien) eine Studie durchführe, die untersuchen solle, ob durch Modellierung der Schneeschmelze ein Überblick über die im Schnee gebundenen Wasserreserven erhalten werden könne, ohne daß umfangreiche Außendienstarbeiten durchgeführt werden müssen (JANSA ET AL., 2000). Dieses Projekt wurde auch vom österreichischen Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft und Kultur gefördert. Die ESA steuerte im Rahmen eines Announcement of Opportunity für eine Schmelzperiode ERS SAR Bilder kostenlos bei. Die MA31 erledigte die notwendigen Außendienste, sorgte für die entscheidenden meteorologischen Meßdaten und finanzierte zum Teil die Satellitendaten.

### 1.1 Grundgedanke

Das IHGW hatte in der Vergangenheit sich intensiv mit Schneeschmelzmodellierung befaßt (BLÖSCHL, KIRNBAUER, 1991). Das Modell, basierend auf dem Prinzip des Energiegleichgewichts und des gekoppelten Wärme-Masse-Flusses, hatte in den Tiroler Alpen sehr gute Ergebnisse gebracht. Theoretisch sind keinerlei Schneebeobachtungen notwendig, weder im Außendienst noch über Satellitenaufnahmen. Die entscheidenden Daten sind hydrometeorologische Messungen, die von über das Interessensgebiet verteilten Stationen automatisch aufgezeichnet werden. Zusätzlich benötigt man noch Daten, die über längere Zeit konstante Parameter der betroffenen Gegend beschreiben, das ist das digitale Geländemodell und die Bodenbedeckung.

---

<sup>1</sup> Prof. Josef Jansa, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, Technische Universität Wien, Gußhausstraße 27-29 / 122, A-1040 Wien, e-mail: [josef.jansa@tuwien.ac.at](mailto:josef.jansa@tuwien.ac.at)

<sup>2</sup> Dipl.-Ing. Monika Schöner, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, Technische Universität Wien, Gußhausstraße 27-29 / 122, A-1040 Wien, e-mail: [ms@ipf.tuwien.ac.at](mailto:ms@ipf.tuwien.ac.at)



## 1.2 Vorbereitende Arbeiten

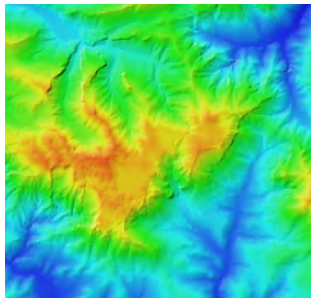


Abb.1: Das DGM

Zur Vorbereitung wurde das digitale Geländemodell im zentralen Bereich mit hoher Genauigkeit durch Rastermessung und Geländekantenmessung abgeleitet (Abb.1). Als Grundlage dafür dienen Farbinfrarot-Luftbilder im Maßstab 1:15000. Aus dem DGM wurden noch Hangneigungen, Hangexposition, Gelände­krümmung, lokaler Horizont u.ä. mit SCOP (I.P.F., 2001) gerechnet.

Die Feststellung der Bodenbedeckung erfolgte ebenfalls über die vorhin erwähnten Luftbilder durch visuelle Interpretation. Es wurden insgesamt 33 Klassen unterschieden. Vor allem wurde Wert auf eine gute Differenzierung des Waldbestandes gelegt. So gibt es insgesamt 27 Waldklassen, wo Laubwald, Mischwald und Nadelwald unterschieden werden. Innerhalb jeder Grundklasse erfolgte noch die Differenzierung nach 3 Bestandshöhen und 3 Bestandsdichten. Weitere Klassen sind Fels, Latschen, Wiese, usw.

## 2 Einbindung der Fernerkundung

Wie schon früher erwähnt, bedürfte es keiner Beobachtungen über Satellitenaufnahmen, um zum gewünschten Ergebnis zu gelangen. Tatsächlich aber enthält das Schneeschmelzmodell sehr viele Parameter, die aus der Beobachtung der hydrometeorologischen, topographischen und radiometrischen Parameter alleine nicht bestimmt werden können, auch wenn erstere mit stündlichem Intervall aufgezeichnet werden. Der Grund dafür liegt unter anderem in der stark limitierten Anzahl und relativ groben Verteilung der meteorologischen Meßstellen und in der nur unzureichend möglichen Modellierung der Wettereinflüsse, besonders der Windtrift. Das Schneeschmelzmodell muß daher kalibriert werden. Der Grundgedanke der Kalibrierung liegt im Vergleich der Schneebedeckungsmuster, die einerseits über die Simulation erhalten werden und andererseits durch Satellitenbeobachtung abgeleitet werden können.

### 2.1 Satellitenaufnahmen von SPOT

Bei der Planung des für drei Jahre gedachten Projektes wurde entschieden, pro Schmelzperiode vier Satellitenaufnahmen auszuwerten, die in möglichst regelmäßiger zeitlicher Verteilung zwischen Mitte Februar und Ende Mai liegen sollten. Aus vorbereitenden Untersuchungen von Aufnahmen meteorologischer Satelliten konnte man ersehen, daß das Interessensgebiet sehr häufig während der Frühjahrsperiode wolkenbedeckt ist und daher oft nur ein- bis zweimal pro Monat günstige Aufnahmebedingungen herrschten. Es wurde daher der Beschluß gefaßt, die Aufnahme durch die SPOT-Satelliten über eine Aufnahmeprogrammierung durchführen zu lassen. Aufgrund der bekannten spektralen Eigenschaften des Schnees weiß man, daß besonders ein Kanal im mittleren Infrarot bei 1700 nm vorteilhaft wäre und daß somit die Spektralbereiche des SPOT XS (derzeit durch die Satelliten SPOT1, SPOT2 und SPOT4 gegeben) keineswegs optimal für die Schneeklassifizierung sind. Der geeignete Sensor wäre in SPOT4 vorhanden (XI Modus). Dennoch wurde beschlossen SPOT XS Daten zu bestellen, da dadurch zeitlich wesentlich mehr Aufnahmemöglichkeiten zur Verfügung stehen, wobei SPOT XI Aufnahmen im Falle des Vorhandenseins zur Anwendung kommen sollen. Letztlich konnte für alle drei Jahre die gewünschte Anzahl von 12 Aufnahmen erreicht werden. Alle

bis auf eine einzige im März 2000 waren XS-Mode-Bilder. Eine nachträgliche Recherche in den Archiven hat gezeigt, daß mit Landsat TM im günstigsten Fall nur 2 Aufnahmen pro Jahr erhalten werden hätten können.

## 2.2 Satellitenaufnahmen von ERS SAR

Wegen der häufigen Wolkenbedeckung erschien die Verwendung von SAR-Satellitenbildern sinnvoll. SAR-Aufnahmen sind schon früher häufig erfolgreich für die Schneeklassifizierung eingesetzt worden (z.B. NAGLER, ROTT, 2000). Für das Jahr 1999 stellte die ESA Bilder kostenlos zur Verfügung. In der Gebirgslage der Schneealpe ist es erforderlich Bilder vom aufsteigenden Satellitenpfad mit jenen des absteigenden Satellitenpfades zu kombinieren. Fore-shortening und Layover treten hier so häufig auf, daß nur geringfügig mehr als 50% des Bildinhaltes davon nicht betroffen sind. Eine entsprechende Untersuchung im Interessensgebiet zeigt die Verhältnisse (Abb.2: hellgrau: von beiden Bildern brauchbar; dunkelgrau: von nur einem der Bilder brauchbar; schwarz: von keinem der Bilder brauchbar).

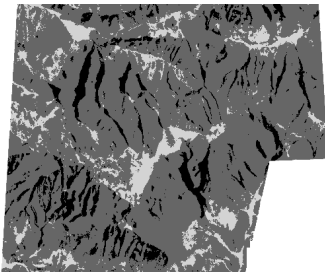


Abb.2: SAR-Deckung

Es hat sich gezeigt, daß es möglich war, innerhalb desselben Tages einen aufsteigenden (um ca. 9:00 vormittags) und einen absteigenden Überflug (um ca. 21:00) zu erhalten. Leider aber widerspricht die Aufnahmepolitik der ESA unseren Bedürfnissen. Da die beiden RADAR-Instrumente AMI SAR und Scatterometer einander konkurrieren, steht zu einem bestimmten Zeitpunkt nur eines der beiden zur Verfügung. Die ESA hatte beschlossen, den aufsteigenden Pfad standardmäßig dem Scatterometer, den absteigenden Pfad dem AMI SAR zu

widmen. Bildpaare waren schließlich von den insgesamt fünf Aufnahmetagen in nur drei Fällen verfügbar, dies aber auch nur wegen einer zufälligen ESA-internen Umplanung. Die SAR-Bilder wurden zur Bestimmung der Feuchteveränderung herangezogen.

## 3 Die Auswertung der SPOT Bilder

Die zentrale Aufgabe ist die möglichst genaue Feststellung der Schneebedeckung. Wesentlich sind nicht Flächenbilanzen, sondern Schneegrenzen. Mit den Hydrologen wurde daher vereinbart, folgende vier Klassen zu identifizieren: (1) kein Schnee erkennbar; (2) stark lückige Schneedecke erkennbar; (3) leicht lückige Schneedecke erkennbar; (4) volle Schneedecke erkennbar. Die Bezeichnung „erkennbar“ ist notwendig, da aus den Satellitendaten keine Aussage über die tatsächliche Schneelage getroffen werden kann. Schnee am Boden unter den Bäumen kann bei dichtem Bestand vom Satelliten aus überhaupt nicht gesehen werden und würde daher in die Klasse „kein Schnee erkennbar“ eingeordnet werden. Auch kann weder die Schneehöhe bestimmt werden, noch können andere Schnee-Eigenschaften, wie etwa Korngröße, mit den vorhandenen Daten sinnvoll ausgewertet werden.

### 3.1 Adaptierte multispektrale Schnee-Klassifizierung

Die Klassifizierung des Schnees erfolgte in den SPOT-Aufnahmen auf herkömmliche Weise mit multispektraler Klassifizierung, wobei die Vorgangsweise etwas adaptiert werden mußte. Das Hauptproblem lag in den relativ starken Schattenwirkungen in den Winterbildern, wo der Sonnenstand bei 30° über dem Horizont liegt. Eigen- und Schlagschatten wirken sich sehr störend aus. Die traditionelle Methode der überwachten Klassifizierung versagt oder wird zu aufwendig. Die Möglichkeit einer sogenannten topographischen Korrektur (z.B. JANSÄ,

1998) wurde versucht, führte aber zu keinem brauchbaren Ergebnis. Die Beleuchtungsverhältnisse sind zu komplex, da es in den Sonnenhängen teilweise zu Überstrahlung kommt, die Schattenhänge oft durch die reflektierte Strahlung des Gegenhanges aufgehellt werden und starke Schlagschatten erst aufwendig in das Modell eingerechnet werden müßten.

Um den Ablauf einigermaßen zeitlich in Griff zu bekommen, wurde eine unüberwachte Klassifizierung nach der ISODATA-Methode durchgeführt (DUDA ET AL, 2001). Würde man dieses Verfahren auf das gesamte Bild anwenden, entstünden eine Unmenge von Klassen und Subklassen, wodurch nicht nur die endgültige Zuordnung mühsam würde, sondern auch die Genauigkeit der Diskriminierung stark litte. Die angewandte Adaption der Vorgangsweise berücksichtigt die Beleuchtungsverhältnisse, wie sie theoretisch gegeben wären.

Über den bekannten Sonnenstand während der Aufnahme und über das gegebene Geländemodell wird ein Beleuchtungsbild errechnet, das für jeden Bildpunkt den  $\cos$  des Einstrahlwinkels  $i$  enthält. Das Bild wird dann in (im allgemeinen vier) Beleuchtungsklassen unterteilt, die bestimmten Wertebereichen des  $\cos i$  entsprechen. Bei den Winterbildern bewährt haben sich folgende vier Klassen von  $\cos i$ :  $< 0.1$ ,  $< 0.4$ ,  $< 0.7$ ,  $\leq 1.0$ . Jede Klasse bildet eine Maske, mit welcher ein Ausschnitt aus dem Original-SPOT-Bild erzeugt wird. Die einzelnen Ausschnitte werden unabhängig voneinander der oben beschriebenen, unüberwachten Klassifizierung unterworfen. Der Vorteil ist, daß deutlich weniger Klassen entstehen, die durch den Bearbeiter wesentlich einfacher und auch sicherer den Objektklassen zugeordnet werden können.

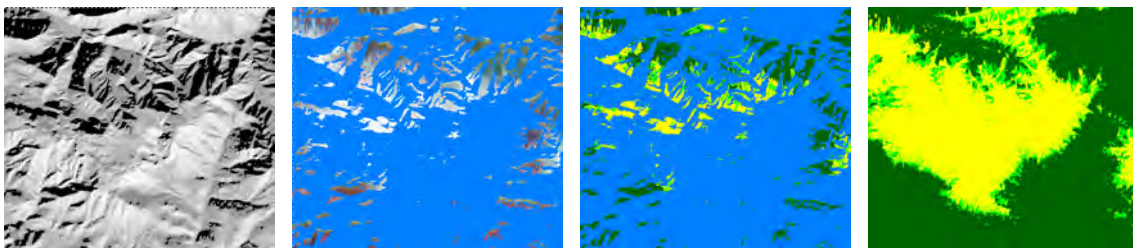


Abb.3: Einteilung in Beleuchtungsklassen und Kombination der Teilergebnisse

Abbildung 3 zeigt die vier Schritte anhand eines Beispiels. Links ist  $\cos i$  abgebildet, wobei in Schwarz die Bereiche der ersten Beleuchtungsklasse eingetragen sind (hier:  $-1.0 \leq \cos i < 0.1$ ), die als Ausschneide-Maske für die weitere Vorgangsweise dient. Das zweite Bild von links zeigt jene Teilbereiche des originalen SPOT-Bildes, die in die erste Beleuchtungsklasse fallen. Das zweite Bild von rechts zeigt das Klassifizierungsergebnis für die erste Beleuchtungsklasse (Dunkelgrün: keine Schneedecke; Hellgrün: stark lückig; Goldgelb: leicht lückig; Gelb: volle Schneedecke). Das rechte Bild schließlich zeigt das Endergebnis nach Zusammenführen aller Teilklassifizierungen. In diesem Beispiel handelt es sich um das Klassifizierungsergebnis für das SPOT-Bild vom 18.2.1998, welches in Abb. 4 links dargestellt ist.

### 3.2 Feststellung der Ausaperung

Im ersten Jahr des Projekts, 1998, kamen im Feber innerhalb von drei Tagen zwei Satellitenaufnahmen zustande, nämlich am 18.2. und am 20.2. (Siehe Abb. 4, links und rechts). Diese enge Folge ist üblicherweise nicht sehr nützlich für die Kalibrierung des Schneeschmelzmodelles. Da in dieser Zeit aber ein markanter Warmwettereinbruch stattfand und die Schneeschmelze sehr schnell einsetzte, war dieses Bildmaterial ebenfalls von Nutzen. Erstens konnte man schon anhand der Bilder genau sehen, wie die Schneegrenzen sich veränderten, was

auch in der Klassifizierung deutlich herauskam, und zweitens ergab sich die Möglichkeit ein Ratio-Bild der Veränderung zu rechnen. Etwaige Änderungen im Reflexionsgrad waren innerhalb dieser beiden Tage so gut wie nur der veränderten Schneelage zuzuschreiben, da die Vegetation sich in diesem Zeitraum nicht verändert. Der schneefreie Bereich im Tal wurde daher herangezogen, um das Ratio-Bild zu „kalibrieren“.

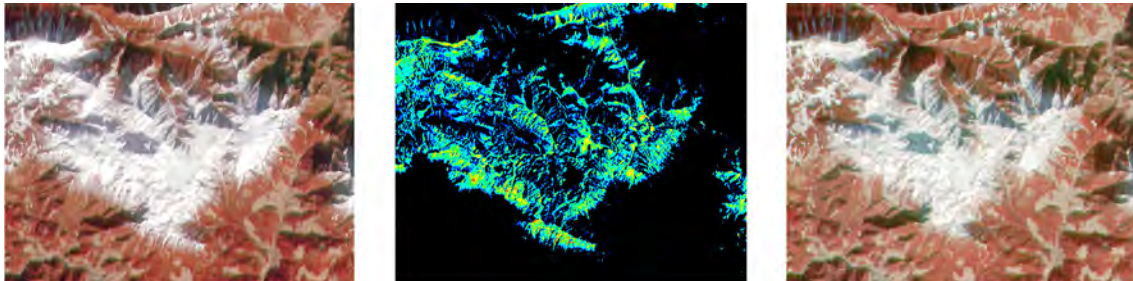


Abb.4: SPOT-Bilder von 2 Tagen (li, re) und Ratio-Bild der Veränderungen (Mitte)

Die Abbildung 4 zeigt links das Bild vom 18. Feber 1998, rechts jenes vom 20. Feber 1998 und in der Mitte das farbkodierte Ratio-Bild. Die Farbkodierung beginnt mit blau (sehr wenig Veränderung) und geht über cyan, grün, gelb bis rot (sehr starke Veränderung). Der schwarze Hintergrund bezeichnet Bereiche ohne Veränderung. Solche unveränderte Bereiche sind die generell schneefreien Tallagen, aber auch Teile der Hochfläche, die nach wie vor volle Deckung zeigen. Deutlich zu erkennen sind die gelben und roten Bereiche großer Veränderung, die an den der Sonne zugewandten Hängen auftreten (Sonnenazimut war hier 140°). Ein derartiges Ratio-Bild gibt eine detailliertere Auskunft über die Veränderungen der Schneelage, als dies der Vergleich der Klassifizierungen vermöchte, wenn auch nach wie vor keine Aussage über die tatsächliche Abnahme der Schneehöhe im dicht beschneiten Gebiet getroffen werden kann.

### 3.3 Klassifizierung mittels NDSI und NDVI

In der Literatur bekannt ist die Verwendung des Normalised Difference Snow Index (NDSI) eventuell gemeinsam mit dem Normalised Difference Vegetation Index (NDVI) (z.B. HALL, ET AL., 1998). So wie der NDVI die spektralen Eigenheit des Chlorophylls ausnützt, geschieht dies in ähnlicher Weise mit den spektralen Eigenschaften des Schnees, dessen Reflexionsgrad im mittleren Infrarot deutlich niedriger ist als im sichtbaren Bereich und sich damit auch von anderen natürlichen Objekten, vor allem von Wolken, unterscheidet. Der NDSI ist, wenn man die SPOT-XI-Kanäle (X1:Grün, X2:Rot, X3:nahes Infrarot, X4:mittleres Infrarot) zugrunde legt, folgendermaßen definiert:

$$NDSI = \frac{X1 - X4}{X1 + X4} \quad (1)$$

Der NDSI nimmt Werte zwischen [-1,+1] an. Allerdings ist zu bedenken, daß die Genauigkeit des NDSI von der Größe der Werte X1 und X4 abhängt. Durch Anwendung des Fehlerfortpflanzungsgesetzes und unter der Annahme, daß das Rauschen  $\sigma_X$  für alle Kanäle etwa gleich ist, erhält man die Genauigkeit des NDSI  $\sigma_{NDSI}$  aus:

$$\sigma_{NDSI} = 2 \cdot \frac{\sqrt{X1^2 + X4^2}}{(X1 + X4)^2} \cdot \sigma_X = K(X1, X4) \cdot \sigma_X \quad (2)$$

Die Größe  $K(X1, X4)$  kann für jedes Bildelement berechnet werden, womit man ein Genauigkeitsbild des NDSI erhält (Abb. 5, rechts). (In gleicher Weise kann man dies für jeden beliebigen Normalised Difference Index ableiten).

Für den Aufnahmezeitpunkt 22. März 2000 stand eine SPOT-XI Szene zur Verfügung. Diese Szene wurde verwendet, um die Klassifizierung über den NDSI zu testen. Gleichzeitig wurde zum Vergleich eine überwachte Maximum Likelihood Klassifizierung (KRAUS, 1990) durchgeführt. Abb. 5 zeigt links die Kanalkombination (4-3-2) des originalen SPOT-Bildes. In der Mitte ist eine Kombination des NDSI mit dem NDVI zu sehen. Der Interpretationsschlüssel zeigt wie die Farben zu verstehen sind. Je mehr Magenta, desto eher wird Schnee wahrscheinlicher, je mehr Grün, desto eher wird Vegetation wahrscheinlicher.

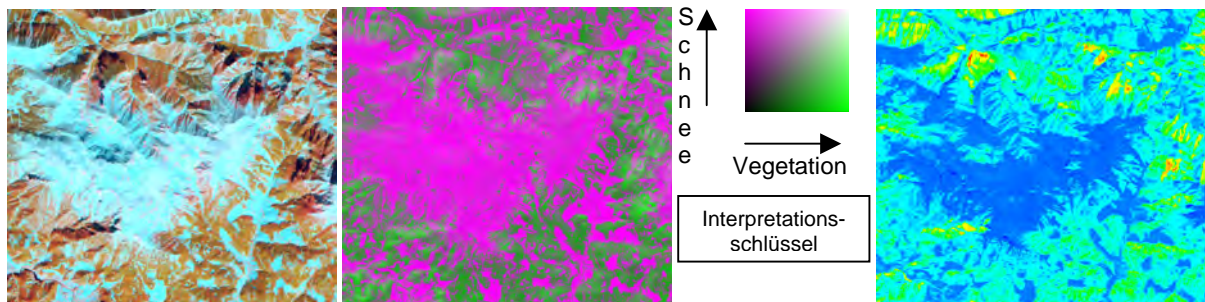


Abb.5: SPOT-XI-Bild (li), NDSI-NDVI-Kombination (Mitte) und Genauigkeit des NDSI (re)

Das rechte Bild in Abb. 5 informiert über die Genauigkeit des NDSI für dieses spezielle Bild. Die Farbkodierung geht von dunkelblauen Tönen (sehr hohe Genauigkeit = kleines  $\sigma_{\text{NDSI}}$ ) über Cyan, Grün, Gelb bis Rot (schlechte Genauigkeit). Wie zu erwarten sind die hellen Bildteile (mit hohen Grauwerten) die genauesten Bereiche, während die dunklen Teile, also jene im Schatten mit kleinen Grauwerten, die schlechteste Genauigkeit aufweisen. Generell kann man sagen, daß Schnee wegen seiner hohen Reflexion im allgemeinen recht gut bestimmbar ist, was die Genauigkeiten im NDSI betrifft, selbst wenn er im Schatten liegt. Das Genauigkeitsbild des NDVI ist hier nicht abgebildet, hat aber ein sehr ähnliches Aussehen.

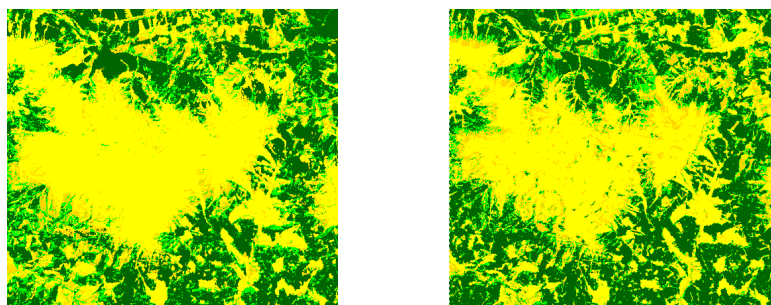


Abb.6: Klassifizierungsergebnis mit Max.Likelihood (li) und NDSI (re)

Was die überwachte Klassifizierung betrifft, so wurde erwartet, daß zum Zeitpunkt Ende März bereits bessere Beleuchtungsbedingungen herrschten. Da durch den zusätzlichen Kanal insgesamt 4 Kanäle zur Verfügung standen, könnte diese traditionelle Vorgangsweise ebenfalls gute Ergebnisse liefern, ohne daß allzu großer Aufwand notwendig sein sollte. Abbildung 6 zeigt einen Vergleich der Ergebnisse. Im linken Bild sieht man das Ergebnis der Maximum Likelihood Klassifizierung, im rechten Bild das Ergebnis aufgrund des NDSI. Hier wurde Schrankenbildung ausschließlich im NDSI verwendet, da der NDVI durchwegs sehr kleine Werte hatte und daher auch das Schrankensetzen im NDVI sehr empfindlich ist. Generell kann man erkennen (bei visuellem Vergleich mit dem Original in Abb. 5 links), daß der

NDSI-Ansatz bei recht geringem Arbeitsaufwand sehr detaillierte Ergebnisse zu liefert, während die konventionelle Klassifizierung deutlich weniger fein und manchmal sogar falsch ist (z.B. Fläche in der rechten oberen Ecke), wenn nicht großer Aufwand getrieben wird. Sollte also von den Daten her gesehen, die Möglichkeit der Berechnung eines NDSI gegeben sein, so ist eine Klassifizierung mit seiner Hilfe auf jeden Fall in Erwägung zu ziehen.

## 4 Die Auswertung der ERS Bilder

SAR Bilder sind radiometrisch nur sehr schwer zu interpretieren, da es viele Faktoren gibt, die das Rückstreuverhalten beeinflussen. Neben den eigentlichen Materialeigenschaften ist dies in sehr entscheidendem Maße die Geländeneigung. Für eine qualitativ hochwertige Interpretation müßte das DGM sehr genau bekannt sein, was kaum jemals im Gebirge der Fall sein wird. Es hat sich daher in der Praxis eine relative Interpretation durchgesetzt. Aufnahmen aus zwei Terminen werden miteinander durch Ratio-Bildung verglichen. Im Falle von Schnee-Klassifizierung gibt es umfangreiche Untersuchungen (SHI ET AL., 1994, KOSKINEN ET AL., 1997, STROZZI, MÄTZLER 1998). Die prinzipielle Vorgangsweise läuft so ab, daß Bilder einer Zeitfolge mit einem Referenzbild verglichen werden. Das Ergebnis sind Rückstreuveränderungsbilder. Da Mikrowellen auf Feuchtigkeit sehr empfindlich reagieren, kann man diese Vorgangsweise im Falle der Schneebeobachtung verwenden, um den Schmelzvorgang zu überwachen. Voraussetzung ist allerdings, daß ein Bild zur Verfügung steht, von dem man annehmen kann, daß die Objektfeuchtigkeit sehr gering war.

Im Falle des Schneeanpen-Projektes war geplant, dafür ein schneefreies Sommerbild (1. Juli 1999) zu verwenden. Aus zwei Gründen wurde dies verworfen: erstens konnte von diesem Zeitpunkt kein Aufnahmepaar geliefert werden und zweitens stellte sich heraus, daß es die Tage vor der Aufnahme geregnet hatte. Das Bild wäre daher kein geeignetes Referenzbild gewesen. Als Ausweg wurde das Bild vom 11. Feber 1999 gewählt, da zu diesem Zeitpunkt mit größter Wahrscheinlichkeit trockener Schnee gelegen ist.

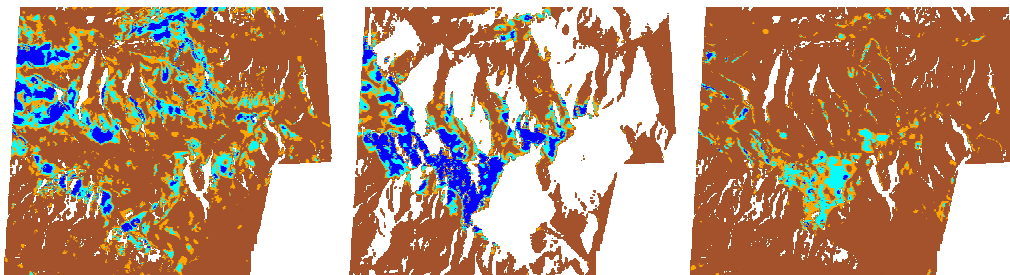


Abb.7: Feuchtezunahme von Feber zu März (li), zu April (Mitte) und zu Mai (re)

Abbildung 7 zeigt die Auswertung der Schneefeuchte-Zunahme in farbkodierter Form (blau: signifikante Feuchtezunahme, Ratio > 4dB; cyan: starke Feuchtezunahme, Ratio > 3dB; hellbraun: wenig signifikante Feuchtezunahme, Ratio > 1 dB; dunkelbraun: keine signifikante Feuchtezunahme; Ratio < 1 dB). In Weiß dargestellt sind jene Bereiche, die nicht ausgewertet wurden, da sie im Layover-Bereich oder im extremen Foreshortening-Bereich gelegen waren (vergleiche auch Abb. 2). Da es im April nur das Bild vom absteigenden Pfad gab, konnten große Teile nicht ausgewertet werden. Dennoch sieht man deutlich, wie im März (18.3.) die südblickenden Hänge zu schmelzen beginnen, während auf dem Hochplateau keine Veränderung zu bemerken ist. Im April (22.4.) hat der Schmelzprozeß auf dem Plateau voll eingesetzt und Ende Mai (27.5.) ist die Schneeschmelze schon nahezu abgeschlossen. Die Feuchte nimmt wieder ab.

## 5 Abschließende Bemerkungen

Mit diesen Arbeiten wurden die Grundlagen für die Kalibrierung eines auf physikalischen Grundlagen basierenden Schneeschmelzmodells geschaffen. Die Ausdehnung der Schneedecke ist eine der Größen, die mit verschiedenen Methoden aus Bildern optischer Sensoren zu erhalten ist. Das Vorhandensein eines Spektralbereichs im mittleren Infrarot um 1.7  $\mu\text{m}$  ist extrem hilfreich und kann den Arbeitsaufwand merklich senken, während die Genauigkeit sogar erhöht werden kann. SPOT-XI-Aufnahmen sind also sehr gut geeignet. Die Feuchteveränderung, die über SAR-Aufnahmen erhalten werden kann, ist ebenfalls ein gutes Maß für die Kalibrierung. Leider geht der große Vorteil der Wolkendurchdringung der Mikrowellen im Falle von ERS durch die ESA-eigene Aufnahme-strategie zum großen Teil verloren, da Bildpaare selten aufgenommen werden. Das Projekt hat bis jetzt zufriedenstellende Ergebnisse geliefert, sodaß sich die Wiener Wasserwerke entschlossen haben, in naher Zukunft einen Praxis-Pilotversuch zu starten.

## 6 Literaturverzeichnis

- BLÖSCHL, G., KIRNBAUER R., 1991: Point snowmelt models with different degrees of complexity – internal processes. *Journal of Hydrology*, 129, pp.127-147.
- DUDA, R.O., HART, P.E., STORK D.G., 2001: *Pattern Classification*. Wiley, New York.
- HALL, D.K., FOSTER, J.L., VERBYLA, D.L., KLEIN, A.G., BENSON, C.S., 1998: Assessment of Snow-Cover Mapping Accuracy in a Variety of Vegetation-Cover Densities in Central Alaska. *Remote Sensing of Environment*, 66, pp. 129-137.
- I.P.F., 2001: Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung der TU Wien, Produktinformation SCOP über die Adresse (Stand Juni 2001):  
[http://www.ipf.tuwien.ac.at/produktinfo/scop/englisch/scop\\_e.html](http://www.ipf.tuwien.ac.at/produktinfo/scop/englisch/scop_e.html)
- JANSA, J., 1998: A Global Topographic Normalisation Algorithm for Satellite Images. *Internat. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol.32/7, pp.8-15.
- JANSA, J., KRAUS K., BLÖSCHL G., KIRNBAUER R., KUSCHNIG G., 2000: Modelling Snow Melt Processes in Alpine Areas. *Internat. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol.33, Supplement B7 auf CD-ROM, pp.69-74.
- KOSKINEN J.T., PULLIAINEN J.T., HALLIKAINEN H.T., 1997: The Use of ERS-1 SAR Data in Snow Melt Monitoring. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol.35/3, pp. 601-610.
- KRAUS, K. MIT BEITRÄGEN VON J. JANSA U. W. SCHNEIDER, 1990: *Fernerkundung - Auswertung photographischer und digitaler Bilder*, Dümmler Bonn.
- NAGLER, TH., ROTT H., 2000: Retrieval of Wet Snow by Means of Multitemporal SAR Data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol.38/2, pp.754-765.
- SHI, J., DOZIER J., ROTT H., 1994: Snow Mapping in Alpine Regions with Synthetic Aperture Radar. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, Vol.32/1, pp.152-158.
- STROZZI T., MÄTZLER CH., 1998: Backscattering Measurements of Alpine Snowcovers at 5.3 and 35 GHz. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol.36/3, pp.838-848.

# Die Bedeutung von Interoperabilität für Nutzer und Anbieter von Geodaten - Status und aktuelle Tendenzen bei ISO/TC 211 und OpenGIS Consortium

GERHARD JOOS<sup>1</sup>

*Abstract: Due to the demand of the GIS user community for access to different bases of up-to-date geodata the times of monolithic proprietary geographic information systems are over. Users want to integrate various geodata in order to visualize and to analyse them simultaneously. Since interoperability never happens by accident, this requires standards. This paper gives an overview of existing standardization organizations and their work. It is shown how ISO/TC 211 and the OpenGIS Consortium cooperate. The status of their work is given, and the topics of data encoding, data quality and raster data are discussed in detail. The advantages of open standards for interoperable GIS for the users can be summarized as*

- *fast and easy access to geodata*
- *change of the market towards compatible GIS components*
- *from data providing to service providing*
- *enabling location based mobile services*

## 1 Einleitung

Proprietäre GIS-Lösungen werden sich unter dem Druck der Anwender und dank der neuen Internet-Technologien am Markt nicht mehr behaupten können. Die Öffnung zu einheitlichen, offenen und einfachen Schnittstellen setzt eine Standardisierung voraus. Auf internationaler Ebene gibt es die beiden Gremien ISO/TC 211 und das OpenGIS Consortium, die sich mit Normung und Standardisierung für Geoinformation befassen. Deren Ziele, Methoden und aktuelle Ergebnisse werden im Hinblick auf den Nutzen für GIS-Anwender dargestellt.

Die Große Anfrage der CDU/CSU-Fraktion an die Bundesregierung zeigt die derzeitige Situation für Geodaten in Deutschland auf: „Gegenwärtig ist ein effizienter und ressourcenschonender Umgang mit Geoinformationen nicht gewährleistet. Ursache ist zum einen eine unübersehbare Vielfalt an Datenquellen: Geodaten werden durch mangelnde Koordination mehrfach erhoben; andererseits bleiben vorhandene Datenquellen vielfach ungenutzt. Die Kenntnis von Datennutzern über Umfang, Qualität, Aktualität und Verfügbarkeit vorhandener Geodaten ist unzureichend.“ (ZfV 3/2001, S. 156-169)

Die technischen Entwicklungen für Normen und Standards können zwar das angesprochene Defizit bei der Koordination nicht beheben, aber sie können einen wesentlichen Beitrag beim Zugang von Geodaten liefern. Dies erfolgt dadurch, dass Katalogdienste über einheitliche Schnittstellen die Verfügbarkeit von Geodaten aufzeigen. Wenn die Beschreibung der Geodaten einheitlich, also auf der Basis von genormten Metadaten erfolgt, kann die Suche nach vorhandenen Datenbeständen automatisiert werden. Weiterhin muss die Abgabe der Daten in einer Sprache erfolgen, die sowohl das Datenschema als auch die Inhalte strukturiert zu beschreiben vermag.

---

<sup>1</sup> Dr.-Ing. Gerhard Joos, Arbeitsgemeinschaft GIS, Universität der Bundeswehr München, D-85577 Neubiberg, [Gerhard.Joos@unibw-muenchen.de](mailto:Gerhard.Joos@unibw-muenchen.de)



Letztendlich sind alle Komponenten eines GIS von der Erfassung, Verwaltung, Analyse bis hin zur standardisierten Beschreibung der Präsentationsregeln von der einheitlichen Beschreibung betroffen.

## 2 Normungsgremien

Die auf nationaler Ebene für Normung zuständigen Institutionen sind in Deutschland das Deutsche Institut für Normung (DIN), in der Schweiz die Schweizerische Normen-Vereinigung (SNV) und in Österreich das Österreichische Normungsinstitut (ÖN). Wenn auf Europäischer oder Internationaler Ebene Normen entwickelt werden, so darf auf nationaler Ebene keine konkurrierende Normungsarbeit durchgeführt werden. Aus diesem Grund wurden auf nationaler Ebene Spiegelausschüsse gegründet, die übernationale Entwicklung von Normen begleiten und zuarbeiten. In Deutschland ist dies der Normungsausschuss Kartographie und Geoinformation (NABau 03.03). Ursprünglich spiegelte dieser Normungsausschuss die Arbeiten des für Geoinformation zuständigen Technischen Komitees des Comité Européen de Normalisation CEN/TC 287. Mit der Gründung des technischen Komitees für Geoinformation der International Standardization Organisation (ISO/TC 211) im Jahre 1994 wurden die bis dahin im CEN/TC 287 erarbeiteten Normen abgeschlossen und als Vornormen veröffentlicht, so dass die Ergebnisse in die Arbeit der internationalen Normung einfließen konnten. Der Fokus und die gesamte Energie der Normungsarbeit floss dann in die Arbeiten beim ISO/TC 211, welches mit einem sehr umfangreichen Arbeitsprogramm angetreten ist.

Zeitgleich mit dem ISO/TC 211 wurde das OpenGIS Consortium (OGC) gegründet. Es handelt sich um ein Firmenkonsortium mit dem Ziel Schnittstellenspezifikationen für interoperable Geoinformationssysteme zu entwickeln. Aufgrund der gleichen Zielsetzung und einer großen Überlappung der Arbeitspakete und nach anfänglicher Doppelarbeit wurde im Jahre 1998 ein Abkommen über eine enge Zusammenarbeit mit ISO/TC 211 verabschiedet. Darin sind die Zuständigkeiten und Abgrenzungen vereinbart. Das OpenGIS Consortium wird die ISO-Normen als abstrakte Spezifikationen übernehmen und daraus Implementierungsspezifikationen entwickeln. Die Implementierungsspezifikationen können nach diesem Abkommen bei ISO eingereicht und über einen Abstimmungsprozess aller beteiligten Länder zu einer internationalen Norm (IS) werden. Dadurch werden aus den Industrie- oder de facto Standards des OGC internationale de jure Standards, also Normen. Erfolgreich wurde dieses Vorgehen bisher mit den Implementierungsspezifikationen „*simple features access – SOL option*“ und „*OLE/COM option*“ durchgeführt, die zwischenzeitlich als ISO 19125 verabschiedet wurden.

Das OpenGIS Consortium erstellt seine Spezifikationen in einem zweistufigen Prozess. In der Stufe 1 wird eine abstrakte Spezifikation erstellt. Soweit diese bei ISO schon vorhanden ist, wird sie direkt übernommen. Für die 2. Stufe findet unter den OGC-Mitgliedern eine Ausschreibung statt, bei der entweder bestehende Spezifikationen von Firmen eingereicht werden können oder neue Spezifikationen von einzelnen oder zu Gruppen zusammengeschlossenen Mitgliedern erstellt werden. Diese Art der Ausschreibung wird nicht durchgeführt, wenn im Rahmen eines sogenannten Testbeds, also einem Prüfstand für die Spezifikationen unter Praxisbedingungen, interoperable Softwareprototypen erstellt werden. Aus den Erfahrungen des Testbeds werden dann die eingeführten Schnittstellen im Nachgang spezifiziert. So geschehen mit den *Web Map Server Interfaces* (WMS) und der *Geography Markup Language* (GML). Die Vorgehensweise des Datenaustausches bei OpenGIS und ISO/TC 211 werden in Abschnitt 3.2 genauer diskutiert.

Durch praktischen Einsatz der ISO-Normen in verschiedenen Ländern für nationale Projekte wie zum Beispiel in Deutschland ALKIS-ATKIS oder für das Australische Kataster und in den Skandinavischen Ländern konnte beim letzten Treffen des ISO/TC 211 im März 2001 in

Portugal über Erfahrungen bei der Umsetzung der ISO-Normen berichtet werden. Als kritischer Punkt wurde bei allen Untersuchungen die Verzögerung bei der Fertigstellung der Norm für den Datenaustausch ISO 19118 angesehen, insbesondere dadurch, dass auf Seiten des OGC schon eine verabschiedete und von vielen Herstellern umgesetzte Spezifikation für eine softwareunabhängige Beschreibung von Datenschema und Geodaten vorhanden ist. Eine Gegenüberstellung der Ansätze erfolgt im Abschnitt 3.2.

Bisher wurden von ISO/TC 211 zwei technische Berichte und sieben Normen als Draft International Standards verabschiedet. OGC hat zwischenzeitlich neun Implementierungsspezifikationen fertiggestellt und allen Interessenten über das Internet zugänglich gemacht.

Neben den genannten Gremien gibt es noch Interessenverbände, die für ihren Anwendungsbereich Standards entwickelt haben. International operierende Gremien sind das International Hydrographic Organization mit dem Standard für digitale hydrographische Geodaten S57, die Digital Geographic Information Working Group (DGIWG) – ein Zusammenschluss von Militärgeographischen Institutionen – die den Standard DIGEST entwickelt haben und weitere nationale Organisationen, wie die AdV in Deutschland mit der EDDBS oder die Behörden für Straßen und Verkehrswesen in Deutschland mit OKSTRA. All diese Gremien sind dabei ihre bestehenden Standards auf Basis der neuen Normen zu überarbeiten. Dies verringert die Kosten zur Erstellung und Wartung von eigenen Schnittstellen erheblich. Und ein Austausch und Verständnis von Daten über den Anwendungsbereich hinaus wird möglich.

### 3 Normungsrelevante Themen

Das ursprüngliche Arbeitsprogramm des ISO/TC 211 war ausschließlich orientiert an der Normung aller im Zusammenhang mit Vektordaten stehenden Aspekte. Erst zu einem späteren Zeitpunkt auf Initiative des OGC und insbesondere auch der ISPRS wurden Arbeitspakete für Rasterdaten aufgenommen. Jedes Arbeitspaket mündet in einer eigenen Norm oder in einem technischen Bericht. Die Normen werden mit ISO 19100 + X bezeichnet, wobei X die laufende Nummer des Arbeitspaketes angibt.

Die Normen können gegliedert werden in die Kategorien

- Übersicht
- Technische Normen zur Festlegung von Begriffen, Strukturen und Inhalten
- Technische Normen zur Festlegung von Regeln und
- Normen für organisatorische Aspekte (Konformitätserklärung, Profile oder Registraturen)

Zu den inhaltlichen, technischen Festlegungen können zum Beispiel Metadaten und damit eng verbunden Prinzipien für Datenqualität gezählt werden. Zu den Normen für Regeln kann man konzeptionelle Schemasprache, Anwendungsschema Verfahren der Qualitätsermittlung und auch Datenaustausch rechnen. Die gesamte Normenfamilie ist nicht dazu angelegt, Details festzuschreiben, sondern auf einer abstrakten Ebene Prinzipien zu beschreiben. Für die formale Beschreibung der Zusammenhänge wurde die *Unified Modelling Language* (UML) der Object Management Group (OMG) gewählt. Ein Anwender, der das konzeptionelle Schema für seine Anwendung nach den Regeln von ISO/TC 211 (ISO 19109 *rules for application schema*) beschreiben möchte, muss dies in UML formulieren und dabei die bestehenden Klassendefinitionen der ISO-Normen verwenden, die in verschiedenen *Packages* verteilt sind. Zur Modellierung mit UML existieren am Markt Softwarewerkzeuge, die den Anwender dabei unterstützen. Diese Werkzeuge haben den Vorteil, dass aus der formalen (graphischen) Beschreibung mittels UML maschinenlesbarer Code erzeugt werden kann. Nach diesem Prinzip funktioniert auch der Datenaustausch, wie er in ISO 19118 vorgesehen ist.

### 3.1 Datenqualität

Vor dem Einsatz von Geodaten für eine Anwendung und bevor aus den Informationen Entscheidungen abgeleitet werden, muss geprüft werden, ob diese Daten für diese Anwendung geeignet sind. Die Eignung eines Produktes oder Dienstleistung für einen bestimmten Zweck bezeichnet man nach ISO 9000 als Qualität. Die Qualität von Geodaten wird in den Normen ISO 19113 und ISO 19114 behandelt. In der ISO Norm 19113 werden die Prinzipien für die Beschreibung der Qualität von Geodaten erläutert. Dabei wird Qualität als Übereinstimmung der Daten zu einer hypothetischen Welt, die durch eine Produktspezifikation beschrieben wird, definiert. Zur Beschreibung der Qualität werden Elemente und Unterelemente angegeben. Die Elemente sind

- Vollständigkeit
- Logische Konsistenz
- Lagegenauigkeit
- Zeitliche Genauigkeit
- Thematische Genauigkeit (Richtigkeit der Klassifikation, Richtigkeit der nicht quantitativen Attributwerte, Genauigkeit von quantitativen Attributen)

Bis zur Festlegung von Qualitätsmaßen (wie zum Beispiel Konfidenzbereiche oder Fehlerraten für das Element Vollständigkeit) geht diese Norm nicht, da diese Qualitätsmaße zu sehr von Anwendungen und Datentypen abhängen und damit die Allgemeingültigkeit der Norm verloren ginge. In einem informativen Anhang werden Beispiele zur Einführung solcher Qualitätsmaße gegeben.

In der ISO 19114 werden die Methoden zur Ermittlung der Qualität von Geodaten aufgezeigt. Dabei wird zwischen direkter und indirekter Kontrolle einerseits und zwischen einer vollständigen und Stichprobenkontrolle andererseits unterschieden. Die Norm gibt an, welche Schritte eine datenerfassende Organisation von der Wahl der Qualitätsmaße, über deren Ermittlung bis zur Ausgabe als Metadaten zu durchlaufen hat, und wie ein potentieller Anwender mit diesen Angaben umzugehen hat.

### 3.2 Datenaustausch

Bei der Kodierung von Daten setzen beide Gremien auf die eXtensible Markup Language XML. Während ISO/TC 211 den modellgetriebenen Ansatz verfolgt, bei dem das XML Schema aus einem UML-Diagramm nach bestimmten Regeln abgeleitet wird, modelliert OGC die standardisierten Datentypen für Geobjekte direkt als XML Schema. Aus diesem Grund gibt es Diskrepanzen zwischen den jeweiligen Datenformaten. Beide Gremien sind allerdings bemüht hier zu einer Konvergenz der Formate zu kommen. In einem ersten Schritt wurde das ISO-Regelwerk zum Datenaustausch um Konstrukte von XML erweitert, die GML in der Schema-Festlegung verwendet.

Da der ISO-Ansatz allgemein formuliert ist, kann es zu Variationen bei der Kodierung kommen, die es einer Leseschicht erschweren, alle Dialekte zu interpretieren. Aus diesem Grund wäre es entgegen der ursprünglichen Philosophie von ISO/TC 211 nach Auffassung des Autors doch sinnvoll, standardisierte XML Schemata zur Verfügung zu stellen. Und dazu liegt folgerichtig nahe, die XML Schemata des OpenGIS Consortium zu verwenden. Ob dabei eine Angleichung der korrespondierenden UML-Diagramme erforderlich würde, müssten weitere Untersuchungen zeigen.

### 3.3 Rasterdaten

Das OpenGIS Consortium unterscheidet zwischen einem Geobjekt (*feature*) und einer Funktion, die jedem Ort des Raumes einen oder mehrere Attributwerte zuordnet (*coverage*). Eine *coverage* kann dabei in verschiedenen Formen repräsentiert werden. Typisches Beispiel

für eine *coverage* sind die Geländehöhen, bei denen jedem 2D-Punkt der Höhenwert als Attribut zugewiesen wird. Die Repräsentation kann dann entweder über unregelmäßig verteilte Einzelpunkthöhen, über Höhenschichtlinien oder über ein gleichmäßiges Gitter erfolgen. Rasterdaten stellen damit eine Spezialform von *coverage* dar.

Die ersten Arbeiten beim ISO/TC 211 zur Verarbeitung von Rasterdaten wurden in dem technischen Report ISO/TR 19121:2000 *Imagery and gridded data* veröffentlicht. Dabei handelt es sich um eine Bestandsaufnahme bestehender Formate, Typen und Schnittstellen mit Rasterdaten. Für die Normung wurden die folgenden Arbeitspakete eingerichtet:

- ISO 19123 *Schema for coverage geometry and functions*,
- ISO 19124 *Imagery and gridded data components*,
- ISO 19129 *Imagery, gridded and coverage data framework* und
- ISO 19130 *Sensor and data models for imagery and gridded data*.

Durch diese Arbeitspakete werden das Zusammenspiel von Photogrammetrie und Fernerkundung mit Geoinformation gefördert.

## 4 Nutzen der Normung

Der Zugriff auf verschiedenartige Geodaten aus unterschiedlichen Organisationen oder von unterschiedlichen Geoinformationssystemen ist nach wie vor nicht selbstverständlich. Doch gerade in der Zusammenführung von Informationen verschiedener Themen und Fachdisziplinen liegt in der Wertschöpfungskette ein Mehrwert, wie er in der Geschichte der Geowissenschaften und deren Anwendung für Umwelt, Sicherheit und Wirtschaft noch nie vorhanden war. Gerade die Möglichkeiten des Internet und seine Erweiterung auf mobile Anwender sind da erst in den Anfängen. Die Datenintegration erfordert eine technische und semantische Interoperabilität der Daten. Dazu werden allerdings Standards benötigt, denn Interoperabilität entsteht nicht durch Zufall. Ein Anwender sollte erwarten können, dass eine technische Interoperabilität für ihn völlig transparent funktioniert und für die Semantik benötigt er die relevanten Metainformationen, um über die Relevanz und Güte der abgeleiteten Informationen entscheiden zu können.

Durch neue Entwicklungen im Bereich der Informationstechnologie wird sich auch der Markt für Softwareprodukte ändern. Getrieben durch ein objektorientiertes Design werden einzelne Funktionalitäten in Komponenten zerlegt werden, die über Schnittstellen miteinander kommunizieren. Das OpenGIS Consortium ist angetreten, für diese Schnittstellen Industriestandards zu entwickeln. Damit ist ein Anwender in die Lage versetzt je nach Anforderung nur die Komponenten zu erwerben (oder zu pachten, wie neueste Lizenzierungskonzepte vorsehen), die für die Anwendung benötigt werden und diese (theoretisch) auch von verschiedenen Herstellern zusammenzustellen. Bei der Datenverwaltungskomponente ist es heute schon üblich ein Datenbankmanagementsystem mit raumbezogenen Erweiterungen als Fremdsystem einzusetzen. Die Kommunikation zwischen diesen Systemen erfolgt über standardisierte Schnittstellen.

Eine breite Anwendungsgruppe, die mit vorkonfektionierten Informationsabfragen, die auch beliebig komplex sein können, auskommt, findet sich im Internet oder Intranet. Auch hier sollte es für den Anwender möglich sein, verteilte Datenquellen anzupapfen und gemeinsam auszuwerten. Zum Beispiel könnte ein Landwirt den Flächennutzungsplan mit aktueller Wetterdaten überlagern wollen. Dies geht aber nur, wenn entsprechende Karten- und Datendienste auf die gleiche Anfrage reagieren und georeferenziert Informationen als Bild oder als Vektordaten in einem Grafikformat oder als Geobjekte zurück gibt, die der Browser interpretieren kann. Die Möglichkeiten, das Internet auch zur Datenerfassung einzusetzen, sind bisher nur sehr rudimentär realisiert. Die Technik lässt dies allerdings zu und zukünftige Spezifikationen werden die erforderlichen Transaktionsmechanismen bereit stellen.

Geradezu als Abfallprodukt der Internetanwendungen kann der XML-basierte Datenaustausch wie z.B. über GML betrachtet werden. Für hohe Ansprüche der Anwender müssen die gesamten Daten in einer selbstbeschreibenden Form abgegeben werden. Damit leistet GML sogar noch mehr als herkömmliche Austauschformate wie die Einheitliche Datenbankschnittstelle (EDBS), weil sowohl das Anwendungsschema als auch die Daten in einer standardisierten Form abgegeben werden. Das Anwendungsschema ist sogar zur Interpretation der Daten erforderlich. Einen ähnlichen Weg des Datenaustausches wurde in der Schweiz schon mit INTERLIS realisiert.

Die so mit XML beschriebenen Datenschemata und Daten sind durch Ihre Unabhängigkeit von Software auch zum Archivieren von Geodaten geeignet. Proprietäre Formate werden nach einigen Versionswechseln der Software nicht mehr gelesen werden können. Da sich XML selbst beschreibt, wird es möglich sein, die Inhalte auch noch nach langer Zeit zu interpretieren.

Durch die Standardisierungen wird in Zukunft weniger Energie in die Verfügbarmachung von Daten fließen, dadurch ergibt sich eine wirtschaftlichere Nutzung von GIS und es kann auch im deutschsprachigen Raum zu einem prosperierenden Markt von Geodaten kommen. Für die breite Anwenderschaft werden ortsbezogene Dienste für den stationären oder mobilen Nutzer entstehen, die aufgrund der Interoperabilität völlig neue Anwendungsgebiete erschließen.

## 5 Zusammenfassung

Standardisierung in den beiden Gremien ISO/TC 211 und OpenGIS Consortium ist zur Zeit das Thema, das die Entwicklung von Geoinformationssystemen mit großen Schritten voran bringt. Der Motor für die Normungsaktivitäten sind zum einen der Markt und zum anderen neue Informationstechnologien. Beide sind geprägt durch das Internet. Aus diesem Grund setzen die neuen Standards auf aktuellen Methoden der Informationstechnologie auf. Die abstrakte Modellierung wird mit Hilfe der *Unified Modelling Language* UML beschrieben und die Abgabe der Datenschemata und der Daten erfolgt in der *eXtensible Markup Language* XML. Das Zusammenspiel der Entwicklungen aus diesen Gremien und deren Auswirkungen auf den Anwender wurden aufgezeigt.

## Referenzen

<a href="http://www.snv.ch">http://www.snv.ch</a>	Schweizerische Normen-Vereinigung
<a href="http://www.din.de">http://www.din.de</a>	Deutsches Institut für Normung
<a href="http://www.on-norm.at">http://www.on-norm.at</a>	Österreichisches Normungsinstitut
<a href="http://www.statkart.no/isotc211">http://www.statkart.no/isotc211</a>	ISO/TC 211 Geographic information/Geomatics
<a href="http://www.opengis.org">http://www.opengis.org</a>	OpenGIS Consortium
<a href="http://www.w3c.org">http://www.w3c.org</a>	World Wide Web Consortium
<a href="http://www.omg.org">http://www.omg.org</a>	Object Management Group
<a href="http://www.iho.shom.fr">http://www.iho.shom.fr</a>	International Hydrographic Organization
<a href="http://www.digest.org">http://www.digest.org</a>	Digital Geographic Information Working Group (DGIWG)

# Digitale Photogrammetrie zur Beobachtung alpiner Massenbewegungen

ANDREAS KÄÄB \*

*Zusammenfassung: Digitale Standardphotogrammetrie erlaubt es, grossflächige DTM mit hoher Punktdichte automatisch zu erfassen. Liegen Befliegungen mehrerer Epochen vor, können mittels multitemporaler DTM Massenverluste bzw. Massengewinne erkannt werden. Sind neben den vertikalen Veränderungen auch die korrespondierenden horizontalen Geländeverschiebungen bekannt, dann liegen dreidimensionale Deformationen einer Geländeoberfläche vor. Zur Messung solcher horizontalen Verschiebungen wurde ein digitales Verfahren entwickelt, das durch den Vergleich multitemporaler Bilder Verschiebungsvektoren mit ähnlicher Dichte und Genauigkeit wie DTM-Basispunkte automatisch bestimmt. Diese vollständig digitale Bildverarbeitungskette zur Bestimmung der dreidimensionalen Oberflächendeformation wird hier an Hand dreier Typen von alpinen Massenbewegungen evaluiert: Gletscherfliessen, Permafrostkriechen und Rutschungen. Die vorgestellten Verfahren ermöglichen die wirksame Beobachtung von mit alpinen Massenbewegungen verbundenen Naturgefahren und erlaubt signifikante Verbesserungen im Verständnis der involvierten Bewegungsdynamik.*

## 1 Einführung

Massenverschiebungen sind ein typisches Resultat der hohen Reliefenergie von Hochgebirgen. Sie können sich in kontinuierlichen Systemen (z.B. Gletscher) äussern, aber auch in kurzzeitigen, katastrophalen Ereignissen ablaufen (z.B. Felsstürze). Gerade in stark besiedelten Gebirgen wie den europäischen Alpen sind mit diesen natürlichen Massenverlagerungen oft auch massive Gefahren für Mensch und Infrastruktur verbunden (HAEBERLI ET AL., 1997; HAEBERLI ET AL., 1999). Zum Beispiel:

- Gletscher können Seen aufstauen oder zurücklassen, deren Ausbrüche regelmässig zu schweren Hochwassern und Murgängen führen.
- In jüngeren Untersuchungen erscheint ein Zusammenhang zwischen kriechendem Dauerfrostboden (Permafrost) und erhöhter Murgangaktivität als signifikant.
- Entlastung und Freilegung der Talflanken durch Gletscherschwund kann zu Hangdestabilisierung und damit zu Rutschungen oder Sackungen führen.

Eine Vielzahl von morphologischen Indikatoren weist auf die involvierten Massenbewegungen hin, eine zuverlässige Beurteilung und Beobachtung sowie ein vertieftes physikalisches Verständnis erlaubt aber besonders die Kenntnis der Kinematik des jeweiligen Phänomens: Vertikale Veränderungen, also Geometrieänderungen eines Objektes, geben bereits wichtige Hinweise auf Massenverlagerungen im Untergrund. Horizontale bzw. 3-dimensionale Verschiebungen schliesslich zeigen direkt die Massenbewegungen auf.

Wegen ihrer Flächenhaftigkeit und ihrer Berührungslosigkeit gehören photogrammetrische Techniken sicherlich zu den geeignetsten Methoden zur Beobachtung alpiner Massenbewegungen (KÄÄB, 1996; KÄÄB, 2000; KÄÄB ET AL. 2000). Gerade auch die digitale Photogrammetrie hat in diesem Zusammenhang wichtige neue Möglichkeiten eröffnet. Der Bildmessung ist jedoch jeweils nur die Geländeoberfläche zugänglich. Aussagen über Tiefenpro-

---

\* Dr. Andreas Kääb, Universität Zürich, Geographisches Institut, Winterthurer Straße 190, CH-8057 Zürich, internet: kaeab@geo.unizh.ch, <http://www.geo.unizh.ch/~kaeab>

zesse müssen über geophysikalische Untersuchungen und/oder numerische Modelle gewonnen werden. In diesem Beitrag werden zwei digitale photogrammetrische Verfahren kurz erläutert und dann an Hand einiger Fallbeispiele aus den Bereichen Gletscherflüssen, Permafrostkriechen und Hangrutschungen evaluiert.

## 2 Methoden

Alle in den folgenden Kapiteln präsentierten Beispiele beruhen auf digitalisierten, tiefgeflogenen S/W-Luftbildern in Bildmassstäben von ca. 1:6000 bis 1:10'000. Durchgeführt wurden diese Befliegungen jeweils vom Flugdienst der Eidgenössischen Vermessungsdirektion, zumeist im Rahmen der Gefahrenüberwachung (Hanginstabilitäten, Gletscherseen etc.) oder Klimabeobachtung (Gletscher, Permafrost) (KÄÄB, 1996). Zur Bestimmung der Geländegeometrie und ihrer temporalen Veränderungen wurden Standardverfahren der digitalen Photogrammetrie angewendet (vgl. z.B. BALTSAVIAS ET AL., 1996; FAVEY ET AL., 2000). DTM und Orthophotos wurden jeweils mit der Software SOCET SET der Firma LH-Systems erstellt. Trotz des untersuchten hochalpinen Geländes mit steilen Hängen, scharfen Kanten, teilweise mangelndem optischen Kontrast u.ä. genügen die Ergebnisse mit einigen wenigen manuellen Editierungen den Genauigkeitsanforderungen (KÄÄB & VOLLMER, 2000). Höhenänderungen des Geländes werden als Differenzen zwischen multitemporalen DTM bestimmt. Hierzu eignen sich besonders rasterförmige DTM, stellen sie doch eine zufällige Stichprobe der Geländegeometrie dar. Bewährt hat sich ferner eine Tiefpass-Filterung der erhaltenen vertikalen Bewegungen. So können die globalen Geometrieviationen besser aus dem Messrauschen und/oder kleinräumigen Geländeänderungen extrahiert werden. Im Zusammenhang mit alpinen Massenbewegungen interessieren zumeist eher jene grossräumigen Veränderungen. (KÄÄB, 1996).

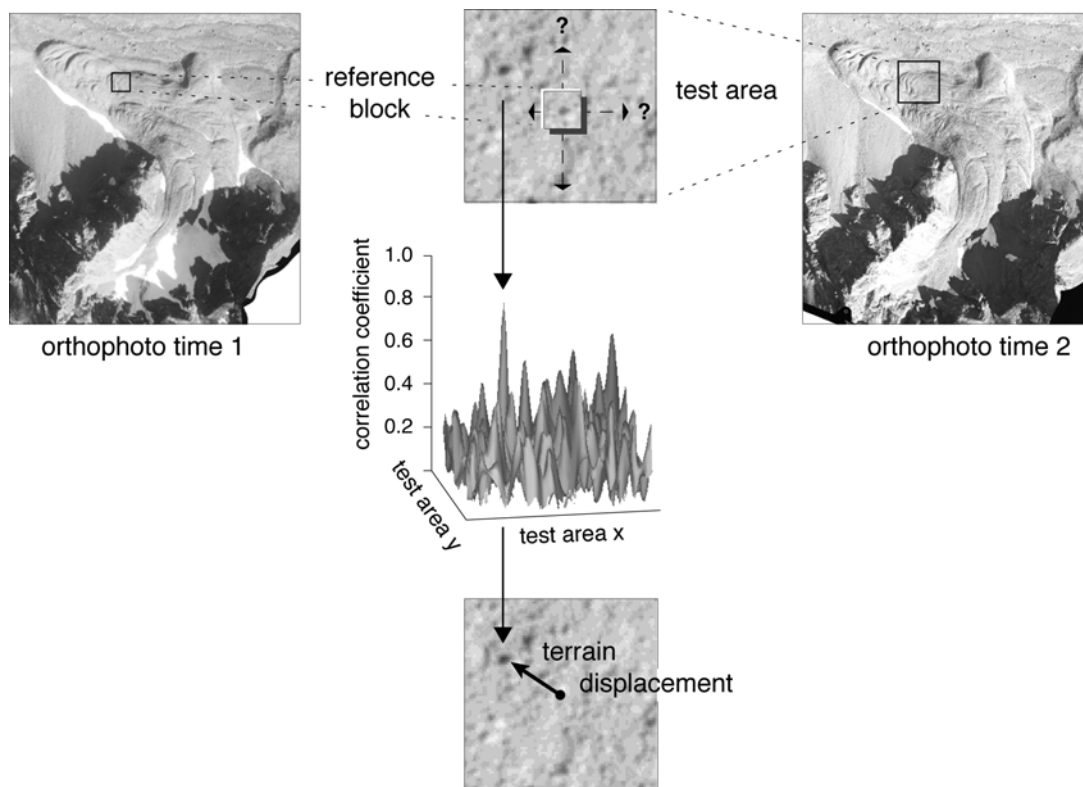


Abb. 1: Flächenhafte Bestimmung der horizontalen Geländedeformation durch Block-matching zwischen Orthophotos zweier verschiedener Epochen.

Zur Messung von horizontalen Bewegungen kommt eine Spezialsoftware zum Einsatz (CIAS: Correlation Image Analysis System; VOLLMER, 1999; KÄÄB & VOLLMER, 2000). Eingangsdaten sind digitale Orthophotos zweier verschiedener Zeitpunkte, wie sie mit digitaler photogrammetrischer Standardsoftware erstellt werden können (BALTSAVIAS, 1996). Zwischen diesen zwei georeferenzierten Orthophotos werden nun über Blockmatching beliebig viele identische Punkte bestimmt (Abb. 1). Die Koordinatenunterschiede zwischen den korrespondierenden Punkten zweier Epochen stellen bereits die gesuchten ebenen Verschiebungen dar. Die Suche identischer Punkte findet in wählbaren Stufen einer Bildpyramide mit Hilfe zweidimensionaler Kreuzkorrelation statt. Die Grössen der zur Suche verwendeten Bildblöcke werden der jeweiligen Geländecharakteristik und den zu erwartenden Verschiebungsbeträgen angepasst. Auf der untersten Stufe kann über Bildinterpolation Subpixelgenauigkeit erreicht werden. Hier soll aber darauf hingewiesen werden, dass die Definitionunschärfen der Natur und kleinräumigste Geländedeformationen diese Genauigkeit oft übersteigen, also unnötig machen. Im schuttbedeckten Gelände mit sich ähnelnden Blöcken und Strukturen können durchaus Verwechslungen (mismatches) auftreten. Innerhalb CIAS werden diese überwiegend durch Schwellwerte des Korrelationskoeffizienten, automatische Analyse des Bewegungsfeldes und Tiefpassfilterung ausgeschaltet. (Für ähnliche Verfahren vgl. LADSTÄDTER, 1999; KAUFMANN & LADSTÄDTER, 2000).

### 3 Gletscherfliessen

Gletschereis deformiert sich unter dem Einfluss der Schwerkraft. So kommt ein dynamisches System zustande, bei dem sich im Gleichgewichtszustand der Massennachschub (in erster Linie Schneefall) und der Massenverlust (Eisschmelze) die Waage halten. Verschiebt sich aus klimatischen Gründen dieses Gleichgewicht, ändern sich Kinematik und Geometrie eines Gletschers. Diese Veränderungen sind einerseits ein weltweit anerkannter und beachteter Klimaindikator, und stehen andererseits hinter vielen hochalpinen Naturgefahren.

Die Bestimmung von Geometrieänderungen von Gletschern mit Hilfe digitaler Photogrammetrie ist ein bekanntes Standardverfahren, für das zahlreiche Beispiele existieren (BALTSAVIAS ET AL, 1996; FAVEY ET AL., 2000). Hier sollen daher keine weiteren angefügt werden. Vielmehr zeigt Abb. 2 das Bewegungsfeld einer überwiegend schuttbedeckten Gletscherzunge in den Schweizer Alpen. Die beobachteten Fliessgeschwindigkeiten reichen von 2.5 Metern pro Jahr (m/a) bis zu wenigen cm/a. Diese ungewöhnlich geringen Beträge deuten auf einen weitgehend inaktiven Gletscherteil hin. Um die kleinen Deformationsbeträge signifikant bestimmen zu können, wurden Luftbilder mit einer Zeitbasis von 5 Jahren gewählt. Im nicht mehr abgebildeten oberen Teil der Gletscherzunge mit deutlich grösseren Bewegungen dagegen kann mit jährlichen Bildern gearbeitet werden. Das Beispiel Abb. 2 zeigt deutlich den Nachteil der Zeitbasis von 5 Jahren: durch Eisschmelze wird die Oberfläche zum Teil so stark gestört bzw. zerstört, dass der digitale Bildvergleich keine korrespondierenden Punkte finden kann, bzw. die schlechten Korrelationskoeffizienten zur Entfernung der Messungen Anlass gaben. Markant schwieriger schliesslich werden die Messungen auf schuttfreiem Eis. Hier führt die stärkere Eisschmelze auch innerhalb eines Jahres zu grossen Oberflächenveränderungen und die ohnehin geringere Zahl optisch markanter Strukturen wird deutlich reduziert. (KÄÄB, 1996)



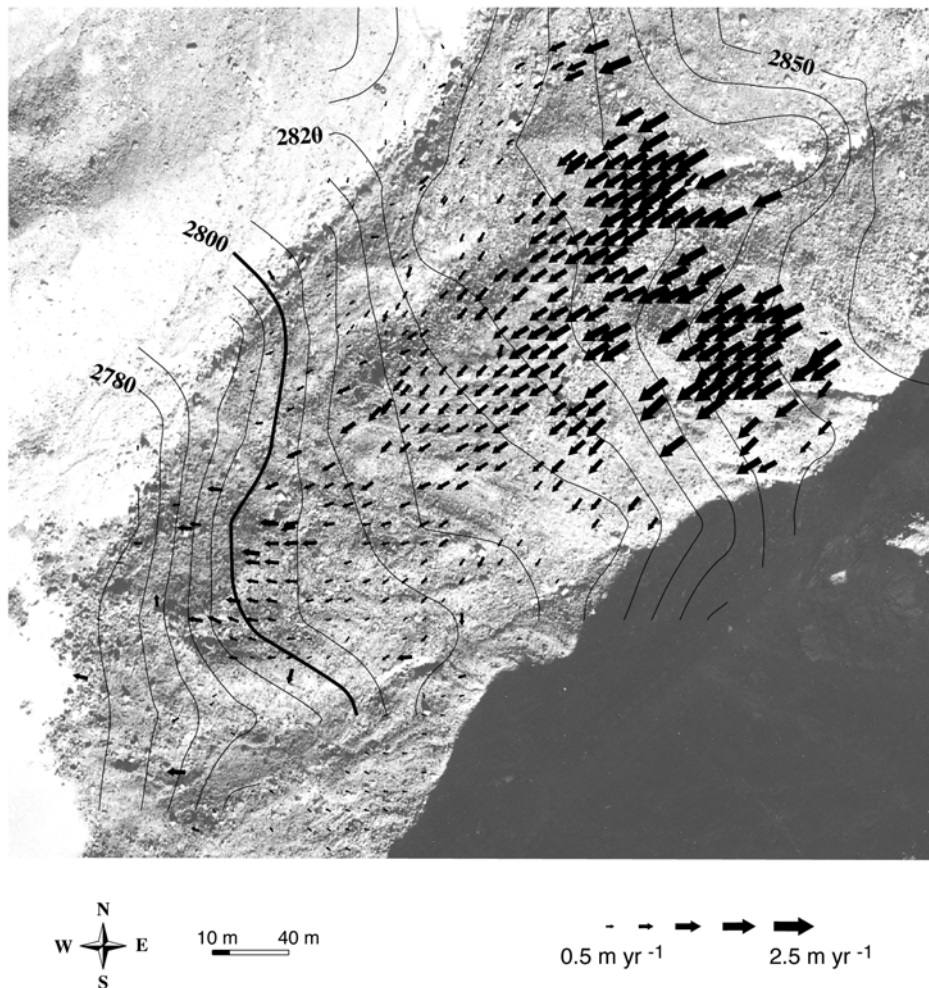


Abb. 2: Bewegungsfeld 1970–1975 auf der Zunge des Grubengletschers, Wallis, Schweizer Alpen, bestimmt durch digitalen Orthophotovergleich. Bewegungen in m pro Jahr.

## 4 Permafrostkriechen

Permafrost (Lithosphärenmaterial, das ganzjährig Temperaturen unter  $0^{\circ}\text{C}$  aufweist) kann einen erheblichen Eisanteil aufweisen. In Hochgebirgen kann solcherart gefrorener Schutt unter dem Einfluss der Schwerkraft zu kriechen beginnen und langsam deformierende Zungen bilden, die Lawaströmen ähneln. Solche sogenannten Blockgletscher sind ein deutlich sichtbares Element alpiner Massenaustauschprozesse in trocken-kalten Gebirgen. Daneben können sie auch auf verschiedene Art und Weise an der Murgangbildung beteiligt sein (KÄÄB, 2000). Über die physikalischen Prozesse des Permafrostkriechens ist deutlich weniger bekannt als über das Gletscherfliessen. Eine wichtige Rolle spielt bei der derzeitigen Forschung die Kinematik der Blockgletscher. Da diese Körper wegen der thermischen Stabilisierung durch den Permafrost auch über viele Jahre hinweg kohärent sich deformieren, weist die Oberfläche in multitemporalen Luftbildern jeweils grosse Ähnlichkeit auf. Weiter bieten die Blöcke auf der Oberfläche ausreichend Kontrast und Strukturen für digitale Bildvergleiche sowohl bei der automatischen Generierung von DTM als auch zur Bewegungsmessung (KÄÄB & VOLLMER, 2000). Das Beispiel Abb. 3 – 5 zeigt jeweils den Blockgletscher im Val Muragl, Oberengadin, Schweiz. In Abb. 3 ist das aus Luftbildern von 1981 und 1994 gemessene Bewegungsfeld dargestellt. Die Oberflächengeschwindigkeiten weisen Beträge von bis zu  $50\text{ cm pro Jahr}$  auf. Deutlich ist sichtbar, dass dieser Blockgletscher aus mehreren Kriechströmen besteht.

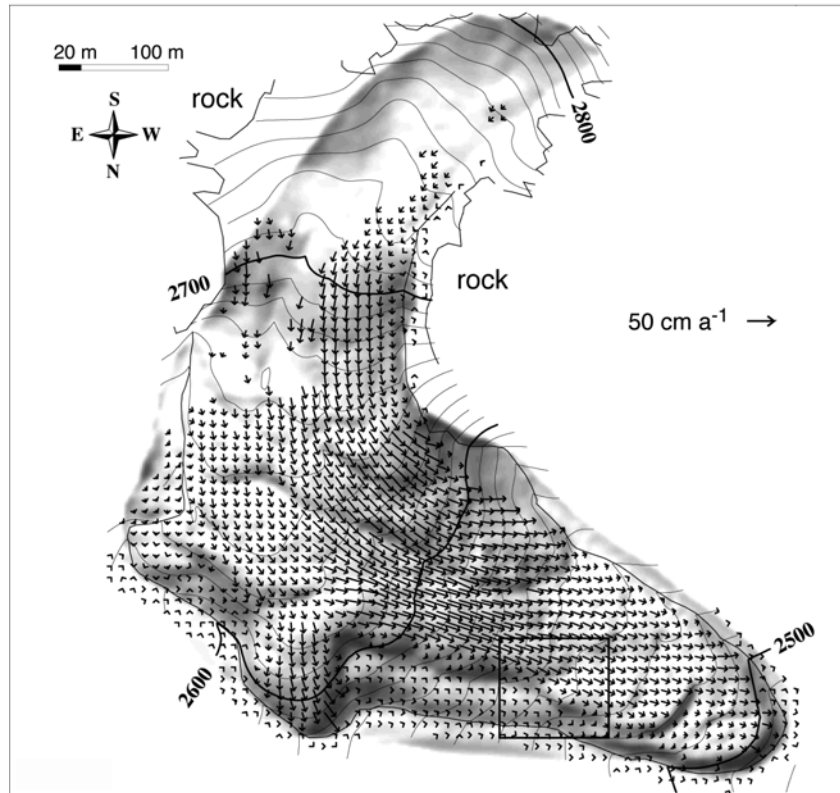


Abb. 3: Bewegungsfeld des Blockgletschers im Val Muragl, Engadin, Schweiz, aus Luftbildern von 1981 und 1994. Bewegungen in cm pro Jahr.

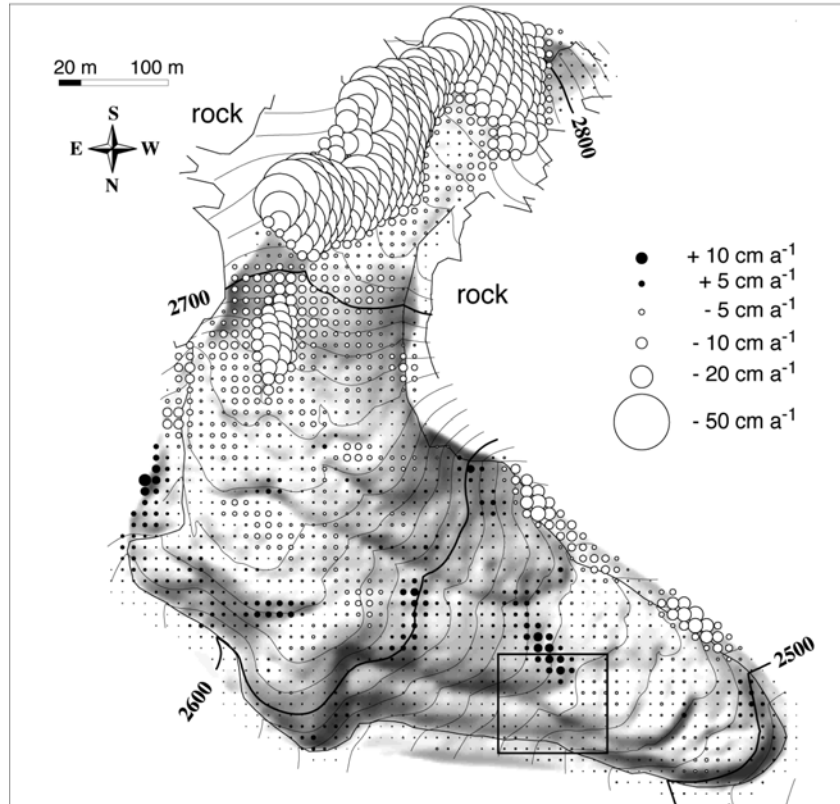


Abb. 4: Höhenunterschiede zwischen zwei DTMs des Blockgletschers im Val Muragl, Engadin, Schweiz, aus Luftbildern von 1981 und 1994. Höhenunterschiede in cm pro Jahr.

Die vertikalen Änderungen der Permafrostmächtigkeit (Abb. 4) zeigen ein ausgeglichenes Bild mit sowohl Senkungen als auch Hebungen im Bereich von  $\pm 10$  cm/a. Diese Geometrieänderungen sind ein Resultat von thermischen (Eisschmelze, Frosthebung) und dynamischen Einflüssen (Stauchung durch kompressives Kriechen, Ausdünnung durch Extension). Im obersten Teil des Blockgletschers sind massive Senkungen festzustellen, die auf die Schmelze von Eisfeldern zurückzuführen ist. Die Schmelze solcher Eisflecken ist in vielen Bereichen der Alpen festzustellen (vgl. „Ötzi“), steht aber nicht im direkten Zusammenhang mit dem Verhalten von Blockgletschern.

Abbildung 5 schliesslich zeigt in einem Ausschnitt des Blockgletschers eine hochauflösende Bewegungsmessung mit einer Rasterweite von 3 m. Auffallend an dieser Messung ist die äusserst scharfe laterale Scherzone zwischen dem kriechenden und einem weitgehend inaktiven Teil des Blockgletschers. Ferner ist die Kompression des Kriechstromes von über 35 cm/a auf unter 20 cm/a innerhalb kurzer Distanz zu bemerken. Die für Blockgletscher typischen Querwülste dürften mit solchen Stauchungen zusammenhängen. Die in Abb. 5 gezeigten Vektoren stellen die ungefilterten Originalmessungen dar. Das gleichmässige Bewegungsfeld verdeutlicht die gute Konservierung der Oberfläche trotz 13 Jahren Deformation. (KÄÄB & VOLLMER, 2000).

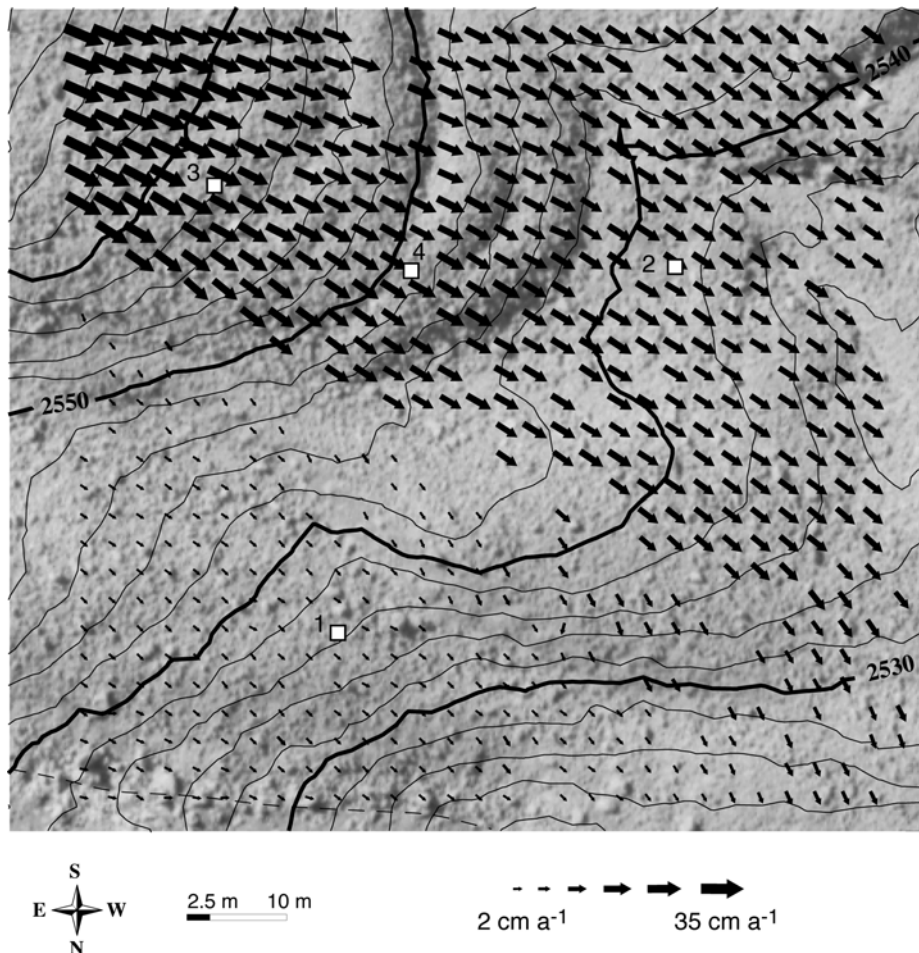


Abb. 5: Hochaufgelöstes Bewegungsfeld des in Abb. 3 markierten Ausschnittes, ebenfalls 1981-1994. An den kleinen Quadraten 1-4 wurden geophysikalische Bohrungen durchgeführt.

## 5 Hangrutschungen

Obwohl andere Prozesse hinter hochalpinen Hangrutschungen stehen als hinter der Deformation eisreichen Permafrostes, ist deren digitale photogrammetrische Beobachtung doch in vielen Belangen vergleichbar. Da in Hangrutschungen kein spannungsübertragendes Medium wie Eis für kohärente Deformation sorgt, kommt es aber eher zu Zerstörung der Oberfläche und daraus resultierenden Problemen bei digitalen Bildvergleichen. Abb. 6 zeigt einen Ausschnitt einer automatischen photogrammetrischen Bewegungsmessung auf einer grossen Rutschung an der Zunge des Aletschgletschers, Wallis, Schweiz (rohe Messungen). Zwischen 1976 und 1995 traten dabei Verschiebungen von insgesamt bis zu 2 m auf. Aus Messungen mit höherer zeitlicher Auflösung ist bekannt, dass diese Beträge vor allem aus dem zweiten Teil der Beobachtungsperiode stammen. Auslöser der Rutschung ist der Rückzug des Aletschgletschers (Abb. 6, rechte untere Ecke), der einen Höhenverlust von 200-300 m im Bereich der Rutschung mit sich brachte und somit die betroffene Hangpartie massiv entlastete und destabilisierte (HAEBERLI ET AL., 1997). Im oberen Bereich der Rutschung wurden Senkungen, im unteren Bereich Hebungen festgestellt, beide in ähnlicher Grössenordnung wie die horizontalen Verschiebungen. (KÄÄB, 2000; KÄÄB ET AL., 2000).

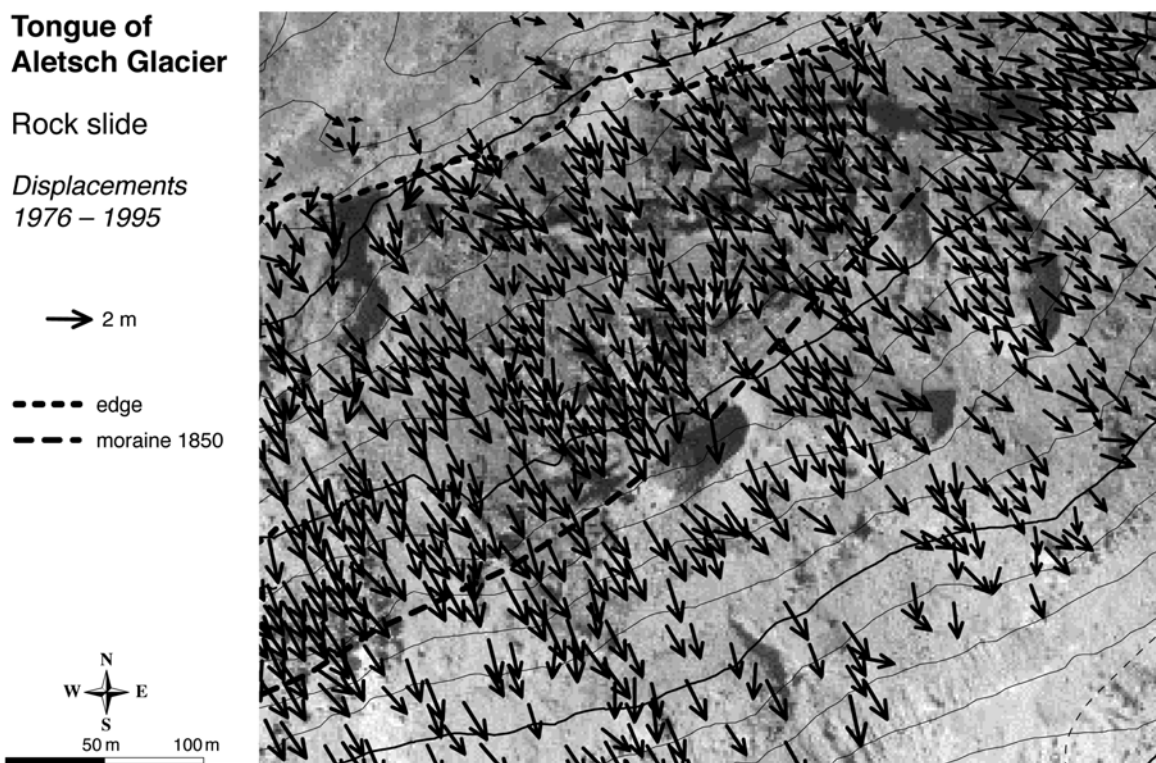


Abb. 6: Ausschnitt des Verschiebungsfeldes auf einer Rutschung an der Zunge des Aletschgletschers, Schweiz.

## 6 Schlussfolgerungen

Die vorgestellten Studien belegen, dass multitemporale Verfahren der digitalen Photogrammetrie operationell und zuverlässig zur Beobachtung von kontinuierlichen Massenbewegungen eingesetzt werden können. In der Praxis dürften sich die vorgestellten Verfahren flächenhafter Analyse vor allem zur Ergänzung und Extrapolation von punktuellen, z.B. präzisen

geodätischen Deformationsmessungen, sowie zur grossräumigen Gefahrenabschätzung eignen.

## 7 Dank

Die vorgestellten Luftbildanalysen wären nicht möglich gewesen ohne das hervorragende Luftbildmaterial des Flugdienstes der Eidgenössischen Vermessungsdirektion / Bundesamt für Landestopographie (Rolf Hübscher, Hans-Peter Gautschi and Daniel Lüscher). Wilfried Haerberli sei für die kontinuierliche Unterstützung der Arbeiten herzlich gedankt.

## 8 Literaturverzeichnis

- BALTSAVIAS, E.P., LI, H., STEFANIDIS, A. AND SINNING, M., 1996: Automatic DSMs by digital photogrammetry. - *Surveying World*, **4**(2): 18-21.
- BALTSAVIAS, E. P., 1996: Digital ortho-images - a powerful tool for the extraction of spatial- and geo-information. - *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, **51**(2): 63-77.
- FAVEY, E., PATERAKI, M., BALTSAVIAS, E.P., BAUDER, A. AND BÖSCH, H., 2000: Surface modelling for alpine glacier monitoring by airborne laser scanning and digital photogrammetry. - *Int'l Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, XIXth ISPRS Congress, Amsterdam, vol. XXXIII (B4): 269-277.
- HAEBERLI, W., WEGMANN, M. AND VONDER MÜHLL, D., 1997: Slope stability problems related to glacier shrinkage and permafrost degradation in the Alps. - *Eclogae Geologicae Helvetica*, **90**: 407-414.
- HAEBERLI, W., KÄÄB, A., HOELZLE, M., BÖSCH, H., FUNK, M., VONDER MÜHLL, D. UND KELLER, F., 1999: Eisschwund und Naturkatastrophen im Hochgebirge. Schlussbericht NFP31. - 190 S. vdf Hochschulverlag an der ETH Zürich.
- KÄÄB, A., 1996: Photogrammetrische Analyse zur Früherkennung gletscher- und permafrostbedingter Naturgefahren im Hochgebirge. - 182 S. Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich, **145**.
- KÄÄB, A., 2000: Photogrammetry for early recognition of high mountain hazards: new techniques and applications. - *Physics and Chemistry of the Earth*, **25**(9): 765-770.
- KÄÄB, A. AND VOLLMER, M., 2000: Surface geometry, thickness changes and flow fields on creeping mountain permafrost: automatic extraction by digital image analysis. - *Permafrost and Periglacial Processes*, **11**: 315-326.
- KÄÄB, A., HUGGEL, C. UND PAUL, F., 2000: Früherkennung hochalpiner Naturgefahren mittels Fernerkundung. - *Interpraevent 2000*, **1**: 49-60.
- KAUFMANN, V. AND LADSTÄDTER, R., 2000: Spatio-temporal analysis of the dynamic behaviour of the Hochebenkar rock glaciers (Oetztal Alps, Austria) by means of digital photogrammetric methods. - 6th International Symposium on High Mountain Remote Sensing Cartography 2000, Ethiopia, Kenya, Tanzania, 3-18 September 2000.
- LADSTÄDTER, R., 1999: Automatisierte Messung von Geländemodellen und Fließvektoren aus digitalen, multitemporalen Orthophotos – ein neuer Ansatz für das Blockgletscher-Monitoring. - 66 S. Diplomarbeit. Abteilung für Photogrammetrie und Fernerkundung. Technische Universität Graz.
- VOLLMER, M., 1999: Kriechender alpiner Permafrost: Digitale photogrammetrische Bewegungsmessung. - 45 S. Diplomarbeit. Geographisches Institut. Universität Zürich.

# Einsatz der Fernerkundung zur Nahraumanalyse im Schulunterricht

## DETLEF KINDERMANN<sup>1</sup>

*Abstract: Unser Vorhaben besteht darin, den Erdkundeunterricht projektorientiert zu nutzen, um Anwendungsbereiche des Einsatzes von Fernerkundungsdaten zu verdeutlichen. Es gilt, die Schülerinnen und Schüler einmal an die Möglichkeiten der Fernerkundung heranzuführen, sie aber gleichzeitig für umweltbezogene Fragestellungen des Nahraumes zu sensibilisieren, die sich aus dem Datenmaterial des Umweltamtes der Stadt Gütersloh und den eigenen Erkundungen ableiten lassen. Auf dieser Grundlage soll ein Beitrag für das Umweltinformationssystem der Stadt Gütersloh geleistet werden.*

## 1 Vorbemerkungen

Vor dem Hintergrund fachspezifischer und der fachübergreifender Aktivitäten spielt am Ev. Stiftischen Gymnasium Gütersloh der Bereich der satellitengestützten Fernerkundung eine wichtige Rolle. Ein solches Projektvorhaben muss sich mit seiner spezifischen Schwerpunktsetzung im Gesamtkontext der Schule wiederfinden. Hierzu gehört die Integration in ein medienerzieherisches und mediendidaktisches Konzept, das computergestütztes Lernen und den verantwortungsbewussten Umgang mit dem Internet umfasst. Die Mitarbeit im Rahmen des Landsat-7 – Scientific Data Pool folgt der Teilnahme an dem inzwischen beendeten TEMPUS-Projekt SITE (Science, Information Technology and Environmental Education), das von deutscher Seite von dem IPN [Institut für Pädagogik der Naturwissenschaften] der Universität Kiel betreut wurde und an dem verschiedene europäische Länder beteiligt waren. Hinzu kommt die Zusammenarbeit mit der EURISY [<http://www.eurisy.asso.fr>], die europaweit schulische Aktivitäten zur Erdbeobachtung fördert.

Im Rahmen unseres nahraumorientierten Projektvorhabens kommen als Datenquellen rasterbasierte Fernerkundungsdaten der Aufnahmesysteme Landsat-TM [25.5.1989; 26.6.1995], IRS-1C [28.10.1998] sowie Landsat-7 [20.10.1999] zum Einsatz. Die Satellitendaten lagen uns in noch nicht geokodierter Form vor. Um eine Verschneidung der Daten verschiedener Zeitpunkte und Sensoren untereinander sowie mit weiteren Datenebenen (z.B. topographische Karte, Biotopkartierung) zu gewährleisten, war eine möglichst präzise Geokodierung notwendig. Um die geometrischen Verzerrungen zu korrigieren, haben wir in den Bildern Paßpunkte bestimmt, deren korrekte geometrische Lage uns bekannt ist. Anhand dieser Referenzpunkte konnten wir mit der Software IDRISI die Daten des jeweiligen Satellitenbildes durch mathematische Transformationen geokodieren. Unser Ziel ist, ein GIS [Geoinformationssystem], also eine Art Datenbank, in der unsere raumbezogenen Daten, die verschiedenen Ursprungs sind, mit der Software WinCAT über die Ortskoordinate miteinander zu verknüpfen. Die Zusatzdaten [Vektor- und Rasterdaten] sind uns vom Landesvermessungsamt und vom Umweltamt der Stadt Gütersloh zur Verfügung gestellt worden.

---

<sup>1</sup> Detlef Kindermann, Evangelisch Stiftisches Gymnasium, Feldstr. 13, 33330 Gütersloh

Unsere Ergebnisse sind somit im Wesentlichen visuell ermittelte Informationsebenen, die nun vorgestellten Beispiele repräsentieren im Grunde einzelne „Lupenfunktionen“.

Für unser nahraumbezogenes Projekt ergab sich der folgende zeitliche Ablauf:

- Vortrag von einem Mitarbeiter des Fachbereichs Umweltschutz der Stadt Gütersloh im Rahmen des Kursunterrichts über seinen Arbeitsbereich und seinen Arbeitsmethoden
- Benennung des Projektthemas im Rahmen des Kursunterrichtes [12.2]
- Bildung einer Arbeitsgruppe aus interessierten Schülern
- Bearbeitung und Auswertung des Datenmaterials durch die Arbeitsgruppe; Betreuung durch den Kurslehrer
- Vorstellung erster Projektergebnisse bei den Gütersloher Netztagen GeoNet
- Erstellung einer Internetpräsentation
- Einbringen der Ergebnisse in den Kursunterricht [13.2]

**Satellitendaten:** - Landsat-TM [25.5.1989] - erhalten im Rahmen eines Schulprojektes der DARA; Landsat-TM [26.6.1995] - erworben aus Mitteln der Bertelsmann-Stiftung (Kooperation mit dem Ev. Stiftischen Gymnasium Gütersloh); IRS-1C [28.10.1998] - erhalten mit Unterstützung der DLR in Neustrelitz (Herr Ohle); Landsat-7 [20.10.1999] - erworben im Rahmen des Landsat-7-Scientific Data Pool

#### **Software:**

- Idrisi for Windows 2.0 [Bildverarbeitungssoftware zur Auswertung von Fernerkundungsdaten - Clark University/ Worcester, MA USA]
- WinCAT 2.3 [Bildverarbeitungssoftware zur Auswertung von GIS- Daten und zum Verschneiden von Informationsebenen]

**Topographische Karten** (digital) durch das Landesvermessungsamt NRW

## **2 Anwendungsbereiche der Fernerkundung**

### **2.1 Einkanalige Untersuchungen**

Es bietet sich an, Überlegungen zur spezifischen Aussagekraft einzelner Kanäle an den Beginn unterrichtlichen Arbeitens zu stellen. Durch interaktive Grauwertbestimmungen lassen sich interessante Vergleiche der Satellitendaten mit anderem Kartenmaterial erstellen. Bei Landsat für einen besonders von der visuellen Aufbereitung getragenen Ansatz der vierte Kanal des nahen Infrarots geeignet. Siedlungsgebiete lassen sich deutlich durch ihre niedrigen Reflexionswerte von der Umgebung abgrenzen. Auch lineare Strukturen lassen sich gut ausmachen. Eine erste grobe Unterscheidung zwischen Wald- und Nichtwaldgebieten ist im

Übrigen mit Hilfe des zweiten Kanals möglich. Die aussagekräftigsten einkanaligen Untersuchungen stellen die Thermalkartierungen dar, die besonders bei Landsat-7 wegen der verbesserten räumlichen Auflösung didaktischen Wert haben und auch für Umweltinformationssysteme einen wichtigen Beitrag leisten. Hier zeichnet sich ein besonderes Interesse der Umweltämter ab, so dass Schüler mit ihren Ergebnissen auch in der praktischen Arbeit ernst genommen werden.

Eine Übersichtskarte „Thermalkartierung vom 20.10.1999“ stellt die über eine Landsat-7-Aufnahme erfasste Verteilung der Oberflächentemperatur von Gütersloh und Umgebung dar. Vor dem Hintergrund der vorliegenden Tagesaufnahme zeigen sich in den Siedlungs- und Industriegebieten im Bereich Gütersloh deutlich erhöhte Oberflächentemperaturen. Auf der anderen Seite zeigt sich großräumig die besondere Bedeutung des Stadtparks als innerstädtischer Grünzug. Der Grund für die inselartig auftretenden hohen Oberflächentemperaturen im Stadtgebiet ist bei den Materialeigenschaften der Oberflächen zu suchen, die sich von denen im ländlichen Bereich grundlegend unterscheiden. Es ist im allgemeinen aber voreilig, aus den hohen Oberflächentemperaturen urbaner Oberflächen auf hohe Lufttemperaturen zu schließen [siehe auch Parlow, Eberhard (1998)]. Häufig ist es so, dass trotz der hohen Oberflächentemperaturen über den bebauten Flächen für die turbulenten Austauschprozesse nur ein vergleichsweise geringes Energieangebot zur Verfügung steht. Die wärmsten Flächen, für Gütersloh in der Regel Industrie- und Gewerbegebiete, zeigen minimalste Werte der Strahlungsbilanz. Dem fühlbaren Wärmestrom in den Innenstädten steht weniger Energie als über ländlich geprägten Gebieten zur Verfügung. Auf Grund der Satellitendaten sind wir also nicht in der Lage, die Ausbildung einer städtischen Wärmeinsel nachzuweisen. Nachzuweisen ist diese nur bei zeitlich gemittelten Analysen oder bei nächtlichen Klimamessfahrten. Dennoch kann man aus den hohen Oberflächentemperaturen auf bioklimatische Ungunsträume schließen, die aus dem Siedlungskörper resultieren. Ausgleichende Wirkungen durch Grünzüge und Kaltluftabfluss sind im Auge zu behalten. Die gezielte Förderung des Aufbaus von Grünstrukturen (z.B. Dach- und Fassadenbegrünungen) eine thermische Entlastung bringen.

Wir haben in einem weiteren Schritt die digitalen, von uns georeferenzierten, thermischen Informationen von Landsat mit topographischen Informationen am Bildschirm kombiniert. Dabei sind von uns einige Teilräume untersucht worden, deren thermische Bedingungen die Gesamtanalyse bestätigen, die aber auch zeigen, dass selbst kleinste Siedlungskörper erhöhte Oberflächentemperaturen aufweisen. Auch offene Ackerfluren zeigen erhöhte Temperaturen. Auffällig sind – ersichtlich aus den Junidaten [Landsat-TM] - die abgekühlten Wasserflächen der Baggerseen; die Untersuchung Ende Oktober 1999 [Landsat-7] weisen auf die gegenläufige Tendenz, insofern als die Wasserflächen die Wärme besser als das räumliche Umfeld zu speichern vermögen.

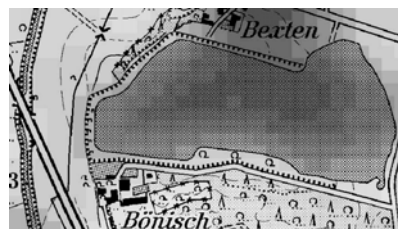


Abb. 1: Thermalkartierung im Bereich des Bönisch-Sees - Oktober 1999 [Landsat-7]



## 2.2 Untersuchungen zum Feuchtigkeitsindex

Im Sinne einer Kartenalgebra sind arithmetische Grundoperationen durchführbar. Dabei helfen für schulische Anwendungen überschaubare Algorithmen wie der Normierte Differenzindex NDI, der Feuchtigkeitsgehalt und Anzeichen von Wasserstress anzeigt.

$$\text{NDI} = \frac{\text{NIR} - \text{MIR}}{\text{NIR} + \text{MIR}} \quad (1)$$

### 2.2.1 Die Grundwasserströmungsverhältnisse im Bereich von Baggerseen

Das Stadtgebiet Gütersloh, besonders aber das nahe Umland, ist von einer Reihe recht großflächiger Sandabgrabungen gekennzeichnet. Unsere Problemstellung war, inwieweit sich ein auf diese Weise neu entstandener Baggersee auf die Wasserbilanz des Abgrabungsgebietes auswirken kann. Kann also die Freilegung von Grundwasser Folgen etwa für den Grundwasserstand haben?

Wir haben auf der Basis unsere Landsat-TM- Daten aus dem Jahr 1995 am Beispiel vom Bönisch-See die NDI- Verhältnisse im engeren räumlichen Umfeld berechnet und folgende Karte erstellt:

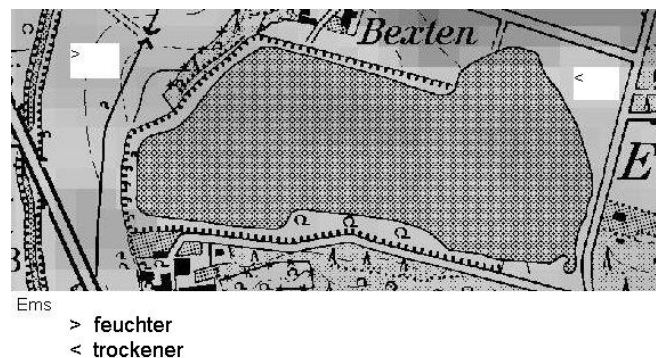


Abb. 2: Der Feuchtigkeitsindex NDI im Bereich des Bönisch-Sees 1995

Ein Vergleich der NDI- Werte zwischen der der Ems abgewandten und der der Ems zugewandten Seite des Sees lässt eine Hypothese zu, die allerdings durch hydrologische Untersuchungen noch zu betätigen ist.

#### Hypothese:

Gegenüber dem Grundwasserstand, der sich ursprünglich, also vor dem Baggersee, in diesem Gebiet ergeben hat, zeigen sich nunmehr eine relative Absenkung des Grundwassers am oberstromigen Ufer und eine relative Aufhöhung am unterstromigen Ufer. Der Grundwasserströmungsverhältnisse sind dabei auf die Ems ausgerichtet.

Die folgende Skizze soll unsere Hypothese verdeutlichen:

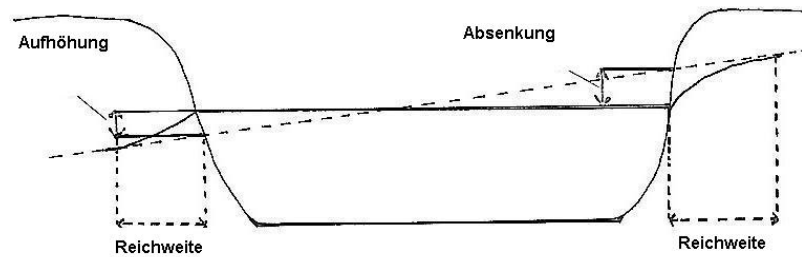


Abb. 3: Grundwasserströmungsverhältnisse im Bereich von Baggerseen

## 2.2.2 Untersuchung zum Zustand einzelner Waldgebiete im Bereich Gütersloh

Der NDI- Index korreliert stark mit dem Zustand von Vegetation. Dies liegt daran, dass nicht nur die spektralen Signaturen eingehen, die den Grad der Begrünung und damit die Ausbildung der Baumkronen kennzeichnen [Kanal 4], sondern auch die spektralen Signaturen berücksichtigt werden, die die Wasserversorgung der Bestände [Kanal 5] zum Ausdruck bringen.

Für das Stadtgebiet Gütersloh haben wir nun den Zustand einzelner Waldbestände ermittelt. Dazu haben wir die von uns errechnete NDI- Karte mit Vektordateien verschiedener Baumarten aus der Biotopkartierung verschnitten. Wir haben besonders die Bestände der den Raum prägenden Kiefer auf Problembereiche hin untersucht und dabei einige Kiefernwälder extrahiert. Es lassen sich Teilbestände festmachen, die vom Zustand her weniger gut sein dürften. Es handelt sich hier um die gelblich bis rötlich erscheinenden Teilflächen der Baumbestände.

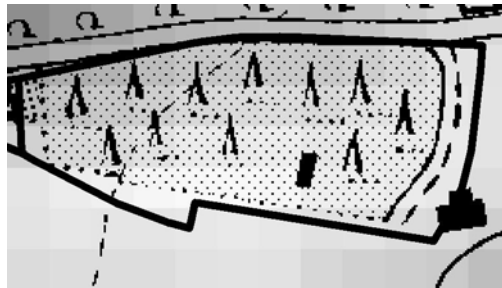


Abb. 4: Der Feuchtigkeitsindex NDI - Kieferbestand [Oktober1999 - Landsat -7]

Für das unmittelbare Umland liegen keine Vektordateien einer Biotopkartierung vor. Um auch hier Angaben zum Zustand etwa von Kiefernbeständen zu machen, haben wir zunächst die Kiefernbestände des Stadtgebietes „geeicht“, also als Trainingsgebiete definiert. So ist es dann möglich, auch das Umland nach ähnlichen Reflexionsmustern absuchen zu lassen. Wir nutzen mittels statistischer Verfahren, über die unser Bildverarbeitungsprogramm IDRISI verfügt, die Signaturanalyse für die Baumart Kiefer. Diese basiert auf den Reflexionswerten

der Landsat-Kanäle 1, 2, 3, 4, 5, 7 und stellt sich signifikant unterschiedlich zu anderen Objektklassen und auch Baumarten dar. Die hochgerechneten Kiefernbestände im Umland von Gütersloh haben wir gleichfalls mit der Informationsebene des NDI-Index verschnitten.

## 2.3 Untersuchungen zum Vegetationsindex

Aus der Karte zum Vegetationsindex NDVI lassen sich eindeutig unterschiedliche Bebauungsdichten vom Innenstadtbereich zu den Außenzonen ausmachen. Deutlich werden auch die einzelnen Vororte, die als Gebiete mit deutlich geringerem NDVI auffallen. Auch lineare Strukturen wie Straßen, Landebahn des Flughafens sind zu erkennen. Die Vielzahl der Gebiete mit nur geringem Vegetationsindex in der Außenzone weisen auf die im Oktober zahlreichen abgeernteten Felder hin.

$$\text{NDVI} = \frac{\text{NIR} - \text{ROT}}{\text{NIR} + \text{ROT}} \quad (2)$$

Detailuntersuchungen führen zu einer Reihe von Einzelerkenntnissen. Beschränkt man dabei die Auswertung des Vegetationsindex auf Siedlungsflächen, so erhält man einen Überblick über den mittleren Vegetationsanteil und damit auch über das Maß der Versiegelung der verschiedenen städtischen Teilbereiche.

- Die Bebauung im Ortsteil Blankenhagen zeigt auf Grund der Grünflächen zwischen den Hochhäusern einen erstaunlich hohen Vegetationsanteil.
- Weite Teilbereiche der Eisenbahntrasse erweisen sich als vegetationsdynamisch.
- Die besondere Bedeutung des „grünen Herzens“ Stadtpark zeichnet sich deutlich ab.

Die Heranziehung von Satellitendaten ermöglicht eine flächenhafte Auswertung versiegelter Flächen. Ziel ist es, eine operationelle Methode zur Verfügung zu haben, Flächenversiegelung aus digitalem Datenmaterial abzuleiten und damit einen Beitrag für ein Stadtinformationssystem zu leisten. Für die Ermittlung versiegelter Gebiete gehen wir davon aus, dass sich der Versiegelungsgrad für städtische Gebiete als im wesentlichen umgekehrt proportional zum NDVI (Vegetationsindex) erweist. Besonders für die Außengebiete muss noch eine Abgleichung mit der Realnutzung erfolgen, da zu vermeiden ist, dass z.B. abgeerntete Felder als offener Boden wegen niedriger NDVI- Werte als versiegelte Fläche eingestuft werden. Wir werten deshalb die Satellitendaten unterschiedlicher Zeitpunkte aus, um gerade diese Fehlerquelle auszuschließen. Wir bilden dazu aus den Vegetationsindizes vom Juni 1995 und Oktober 1998 ein Rot-Grün- Farbkomposit.

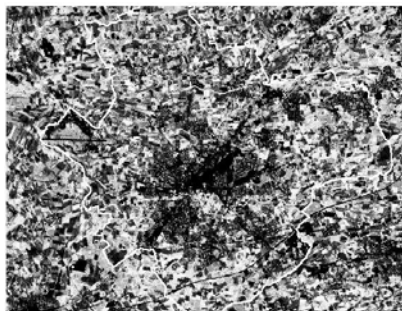


Abb. 5: Multitemporaler Vegetationsindex - Juni 1995/ Oktober 1998

Aus einem solchen multitemporalen Vegetationsindex lassen sich die vegetationslosen Gebiete (schwarz) durch Reklassifizierung des Bildes extrahieren:

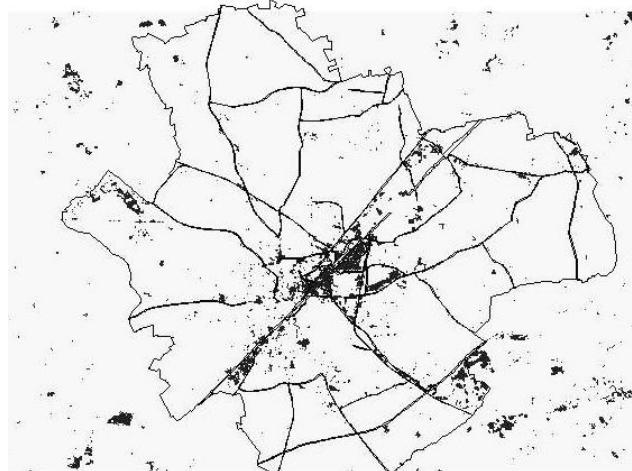


Abb. 6: Versiegelte Bereiche in Gütersloh und Umgebung

Karten dieser Art lassen auch im Sinn einer Change detection Landnutzungsänderungen deutlich werden. Diese haben wir beispielhaft im Bereich des Bönischsees berechnet und anschließend in einer Karte veranschaulicht.

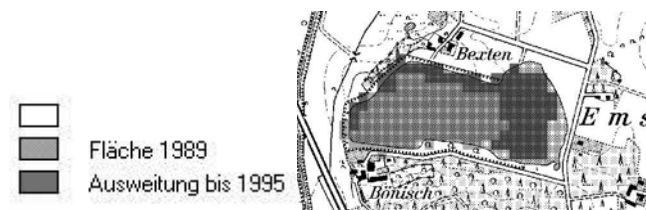


Abb. 7: Flächenveränderungen des Bönisch-Sees zwischen 1989 und 1995

### 3 Schlussbemerkungen

1. Für die unterrichtliche Umsetzung ist es qualitativ ein didaktisch wichtiger Schritt, möglichst noch relativ unverarbeitete Daten computergestützt auszuwerten. Unverarbeitete Rohdaten fördern die Erhöhung von Authentizität und bedeuten didaktisch, dass das forschende Lernen besonders angesprochen wird. So wird die Notwendigkeit geschaffen, mit diesen Basisinformationen verantwortlich umzugehen. Es darf nicht allein darum gehen,

schon vorgefasste Hypothesen wieder zu entdecken. Die Schülerinnen und Schüler müssen sich der Tatsache bewusst sein, dass zwischen spektralen Signaturen, Umweltobjekten und Landschaftselementen nicht immer eindeutige Beziehungen bestehen.

2. Der besondere aus der räumlichen Auflösung resultierende Maßstabsbereich führt zu Aussagen, die die punktbezogenen und kleinräumigen Untersuchungen durch ihre Flächenhaftigkeit ergänzen könnten. Wichtig ist der Ansatz, durch die Satellitenperspektive von dem variationsreichen und kleinräumigen Mosaik der umweltbezogenen Phänomene zu abstrahieren und auf objektive Art und Weise zu flächenbezogenen Aussagen zu kommen.
3. Hinzu kommt, dass durch satellitengestütztes Arbeiten Hypothesenbildung unterstützt wird. Wichtig ist, ein methodenbezogenes Vorgehen den Schülern näher zu bringen. Unter Hinzunahme verschiedener Karten aus dem Umweltinformationssystem wird eine Vorstrukturierung von Daten gewonnen; Wald-, Siedlungs- und Ackerflächen können dann vektorieLL erfasst und dann im Satellitenbild genauer untersucht werden. Biotopkartierungen des Umweltamtes können helfen, Trainingsgebiete zu finden, die dann weiterhelfen, Klassifizierungen eines größeren Umlandgebietes durchzuführen.
4. Als zusammenfassende Analyse eignet sich inhaltlich die Auswertung spektraler Signaturen auf abgeernteten Feldern und offenen Bereichen, da sich hierbei alle methodischen Ansätze noch einmal wiederfinden. An Beispielen lassen sich abgeerntete, also offen liegende Flächen ermitteln. Daten des nahen Infrarotes werden nur für diese offenen Flächen untersucht. Unterschiedliche spektrale Informationen können dann auf einen unterschiedlichen Humusgehalt zurückzuführen sein. Die Untersuchungen von Einzelgebieten zeigt, dass – sind sie erst einmal aus dem Satellitenbild extrahiert – Inhomogenitäten auftreten. Es kommt nun nicht darauf an, möglichst homogen zu klassifizieren, sondern räumliche Unterschiede innerhalb der jeweiligen Fläche zu analysieren. Flächenbeispiele zeigen, dass ein Wechsel der Bodenart unterschiedliche Spektralwerte und NDI- Werte nach sich ziehen kann.

## 4 Literaturverzeichnis

- Möller, Matthias (1998): Hoch auflösende Fernerkundungsdaten als Quelle für den Aufbau von Stadtinformationssystemen am Beispiel eines digitalen Versiegelungskatasters. In: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt [DLR]: Tagungsband: 15. Nutzerseminar des Deutschen Fernerkundungsdatenzentrums DFD - Mitteilung 98-03.
- Parlow, Eberhard (1998): Analyse von Stadtklima mit Methoden der Fernerkundung. In: Geographische Rundschau, 2/1998, S. 89 - 93.
- Kindermann, Detlef (1998): Auswertung digitaler Satellitenbilddaten mit dem Idrisi-Programm. In: Handbuch zur Arbeit mit Satellitenbildern im Unterricht, S. 61 - 64.
- Klaedke, Hans-Georg (1991): Bodenversiegelung in Stuttgart. In: Sonderdruck aus: Naturschutz und Landschaftsplanung - Zeitschrift für angewandte Ökologie 6/1991.
- Steinborn, Wolfgang (1999): Satellitenfernerkundung in der Land- und Forstwirtschaft - eine Übersicht über den Stand und Perspektiven. In: GIS, 6/99, S. 4 - 12.

# Laser-Scanning – Ein Paradigma-Wechsel in der Photogrammetrie

KARL KRAUS<sup>1</sup>

*Zusammenfassung: Das Laser-Scanning hat sowohl die Geländeaufnahme als auch die Objekterfassung im Nahbereich revolutioniert. Man kann im Sinne des deutsch-amerikanischen Wissenschaftsphilosophen Thomas Kuhn von einem Paradigma-Wechsel sprechen. Es ist in erster Linie ein Paradigma-Wechsel in der Photogrammetrie, der gegenwärtig voll im Gange ist. Die Photogrammeter haben wesentliche Beiträge zur Auswertung der Laser-Scanner-Daten geleistet (Stadt- und Geländemodelle, Kalibrierung und Georeferenzierung, etc.). Zum Schluss wird – ausgehend von der Lasertechnik - ein gemeinsames Paradigma für Photogrammetrie und Fernerkundung vorgestellt, das die Denk- und Handlungsweise der beiden Disziplinen sehr eng zusammenführt.*

## 1 Vorbemerkungen

Der Begriff „Paradigma“ (engl. *paradigm*) ist viel strapaziert. Viele Leute verbinden damit etwas Grundlegendes; man weiß aber nicht genau, was mit diesem Begriff zum Ausdruck gebracht werden soll.

Der Begriff „Paradigma“ wurde von dem deutsch-amerikanischen Wissenschaftsphilosophen Thomas Kuhn (1922 bis 1996) zur Beschreibung der Denk- und Handlungsmodelle – insbesondere in den Naturwissenschaften – eingeführt. Kuhn (1962) unterscheidet zwischen normalen und revolutionären Phasen wissenschaftlicher Tätigkeit. Normale Phasen wissenschaftlicher Tätigkeit werden von Paradigmen geleitet, die durch Ausbildung und Praxis einen besonderen Status erlangt haben. In revolutionären Phasen wissenschaftlicher Tätigkeit kommt es zu einem totalen Wechsel dieser Paradigmen; in revolutionären Phasen ist das Wissen neu zu organisieren<sup>2</sup>.

Einen Paradigma-Wechsel in den Ingenieur- und Naturwissenschaften hat zum Beispiel der Computer gebracht (Schmutzer, 1994); es sind computerbasierte Paradigmen entstanden, die teilweise die reinen mathematischen Modelle abgelöst und zu neuen „Wahrheiten“<sup>3</sup> geführt haben (Abelson et al., 1986).

In der Photogrammetrie bin ich auf einen Aufsatz gestoßen, der das Denk- und Handlungsmodell der analytischen Photogrammetrie als ein Paradigma anspricht und der die digitale Photogrammetrie als einen Sprung im photogrammetrischen Paradigma sieht. Dieser Aufsatz stammt von Prof. Ackermann (1995). Ackermann ist bescheiden; er spricht in diesem Zusammenhang nämlich nur von einem Paradigmasprung oder Paradigma-Schub und nicht von einem Paradigma-Wechsel.

---

<sup>1</sup> Prof. Dr. K. Kraus, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung der TU Wien, Gusshausstrasse 27-29, A-1040 Wien, e-mail: kk@ipf.tuwien.ac.at

<sup>2</sup> Die deutschsprachigen Formulierungen orientieren sich an Schmutzer (1994).

<sup>3</sup> Bei meinen Vorbereitungen bin ich auf eine Äußerung von Max Planck gestoßen, der gesagt haben soll: „Die Wahrheit triumphiert nie, ihre Gegner sterben nur aus.“

Bevor ausgeführt wird, dass meines Erachtens das Laser-Scanning durchaus als Paradigma-Wechsel in der Photogrammetrie bezeichnet werden kann, soll die Terminologie wie folgt konkretisiert werden:

- Paradigma: (Denk-)Muster, das einer Disziplin – zum Beispiel der Photogrammetrie – dient.
- Paradigma-Wechsel: Ersetzen eines (Denk-)Musters durch ein weitgehend neues (Denk-)Muster.

## 2 Paradigmen der Photogrammetrie und des Laser-Scannings

Zunächst ist die Frage zu beantworten, welches Paradigma in der Photogrammetrie am stärksten ausgeprägt ist. Meines Erachtens<sup>4</sup> ist es die geometrische Rekonstruktion der Objekte im dreidimensionalen Raum aus mindestens zwei Aufnahmen. Eine Aufnahme definiert ein Bündel von Richtungen, das Strahlenbündel genannt wird. Ein Objektpunkt ist im dreidimensionalen Raum rekonstruierbar, wenn er **mindestens von zwei Richtungen** getroffen wird. Die Richtungen bzw. Strahlen – durch das Licht der Sonne erzeugt - werden von passiven Sensoren registriert.

Dieses **Grundmuster der (bisherigen) Photogrammetrie** zeigt Abb.1. Im Sinne eines Paradigmas ist es gleichgültig, ob

- die Aufnahmen auf Film oder mittels einer elektronischen Bildaufzeichnung erfolgen,
- die elektronische Bildaufzeichnung in einem zweidimensionalen Detektorfeld oder in einer eindimensionalen Detektorzeile erfolgt,
- die Messung der Bildpunkte stereoskopisch von einem Operateur oder digital mit einem Korrelationsalgorithmus erfolgt,
- eine dritte Aufnahme vom gleichen Objektpunkt vorhanden ist (*Multimatching* in der digitalen Photogrammetrie),
- eine (kalibrierte) Messkamera oder eine (unkalibrierte) Amateurkamera eingesetzt wird,
- die Lage der Aufnahmeorte und die Stellung der Aufnahmen aus Pass- und Verknüpfungselementen (Bündelblockausgleichung) oder aus GPS- und IMU-Aufzeichnungen ermittelt werden,
- das (natürliche) Sonnenlicht durch künstliches Licht – für manche Nahbereichsaufgaben – ersetzt wird,
- etc.

---

<sup>4</sup> Ein Paradigma und noch mehr ein Paradigmawechsel hängen weitgehend von einer persönlichen Sicht bzw. von der Sicht der jeweiligen Fachdisziplin ab. Ein Paradigmawechsel in der Theorie der Auswertetechnik muss zum Beispiel noch lange kein Paradigmawechsel in der Sensorentwicklung sein und umgekehrt. Dieser Beitrag ist von meiner Sicht – mit meiner Ausbildung und meinem wissenschaftlichen Umfeld – auf die Paradigmen und auf etwaige Paradigmen-Wechsel geprägt.

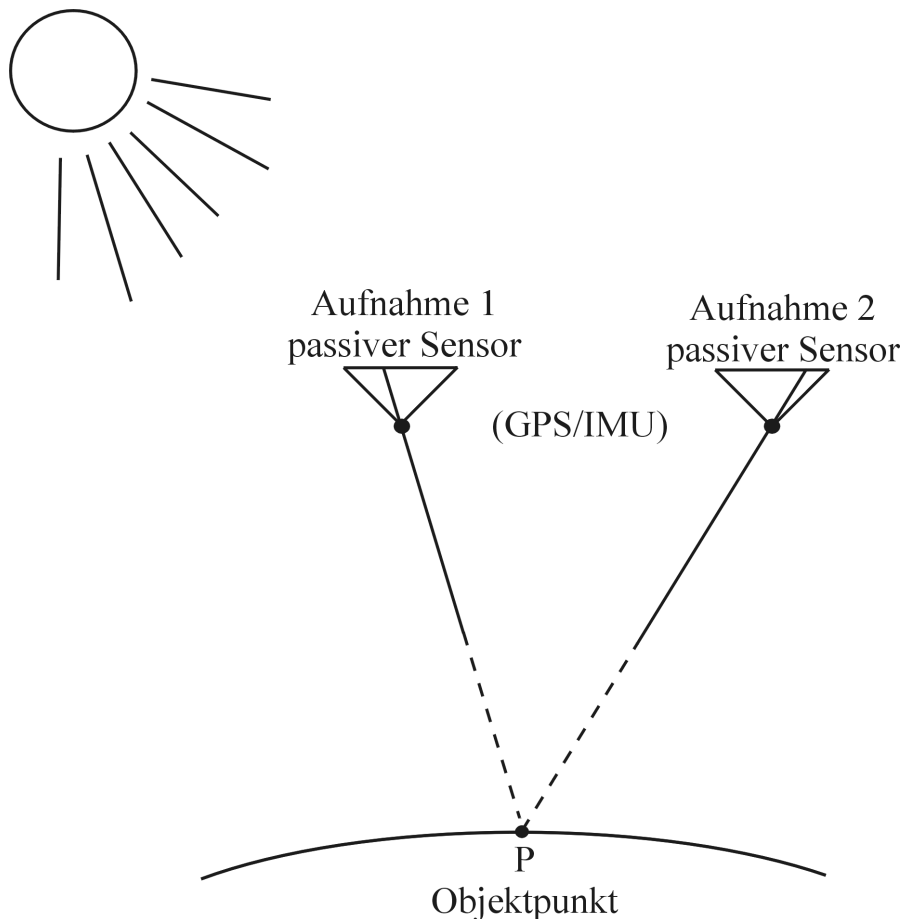


Abb. 1: Grundmuster der bisherigen Photogrammetrie

Nun steht die Frage an, welches Paradigma beim Laser-Scanning am stärksten ausgeprägt ist, m.a.W. welches Denkmuster liegt dem Laser-Scanning zugrunde. Wie bei der Photogrammetrie steht auch beim Laser-Scanning die geometrische Rekonstruktion der Objekte im dreidimensionalen Raum im Vordergrund, allerdings nicht aus mindestens zwei Aufnahmen sondern nur aus mindestens einer Aufnahme. An die Stelle eines Strahlenbündels tritt ein Bündel von Richtungen und Entfernungen, d.h. von **Vektoren**. An die Stelle passiver Sensoren treten aktive Sensoren. GPS-Positionierung und IMU-Orientierung werden – im Flugzeugeinsatz – essenziell; das Verknüpfen von zwei und mehr Aufnahmen zu einem räumlichen Netzwerk ist schwierig und erfolgt deshalb nur ausnahmsweise.

Dieses **Grundmuster des Laser-Scannings** zeigt Abb.2 . Im Sinne eines Paradigmas ist es gleichgültig, ob

- die Entfernungen mittels Impuls-Laufzeitmessung oder mittels Phasen-Vergleich bestimmt werden,
- die Abtastung mit einem Schwing Spiegel, einem rotierenden Spiegel oder mit einer Glasfaserzeile erfolgt,
- der erste oder der letzte (reflektierte) Impuls registriert wird,
- man sich bei der Erfassung der Objektpunkte nur mit einer Aufnahme begnügt oder doch überlappende Aufnahmen – wegen einer Verknüpfung und/oder zur Überwindung sichttoter Räume – anstrebt,



- noch die ursprüngliche profilweise Erfassung in Flugrichtung oder die gegenwärtig weit verbreitete Erfassung mittels Scanner quer zur Flugrichtung erfolgt,
- etc.

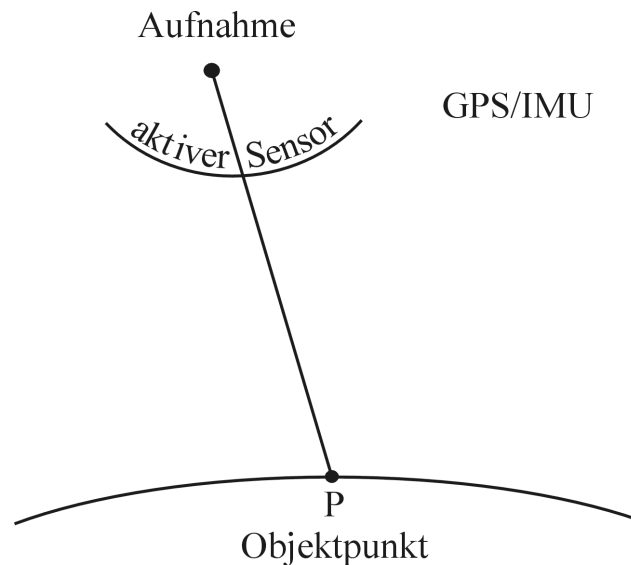


Abb. 2: Grundmuster des Laser-Scannings bzw. der neuzeitlichen Photogrammetrie

Das Paradigma des Laser-Scannings ist schon längere Zeit ein bekanntes Paradigma in der Fernerkundung. Dort spricht man von *Lidar* (*Light detection and ranging*). Auch das in Abb.1 skizzierte Paradigma ist ein Paradigma der Fernerkundung. Wenn allerdings geometrische Problemstellungen im Vordergrund stehen, spricht man nach wie vor von Photogrammetrie. In gleicher Weise sollte auch das in der Abb.2 skizzierte Paradigma als Paradigma der Photogrammetrie angesehen werden. Dieses Paradigma (Abb.2) wird immer mehr das Paradigma der Abb.1 ablösen. Dieser **Paradigma-Wechsel** ist in der Photogrammetrie voll im Gange.

Den angedeuteten Paradigma-Wechsel haben vor allem die Anwender zum Durchbruch verholfen. Ich möchte den Anwendern ein Kompliment für diese Risikobereitschaft und Aufgeschlossenheit für Neues aussprechen. In erster Linie war und ist die Praxis vom hohen Automationsgrad des Laser-Scannings angetan.

### 3 Beiträge der Photogrammetrie zum Laser-Scanning.

Es geht um Beiträge, die aus einer eher geometrisch geprägten Sicht entstanden sind bzw. entstehen. Diese Beiträge beziehen sich zwangsläufig auf die Auswertung der Laser-Scanner-Daten und nicht auf die Sensoren.

In Europa hat das Laser-Scanning zweifelsohne die größten Impulse durch den Sonderforschungsbereich SFB 228 (Hochgenaue Navigation) der Deutschen Forschungsgemeinschaft erfahren. Die Publikation (Ackermann et al., 1994) und die dort zitierten Publikationen waren bahnbrechend für den Einsatz der Laser-Technik in Waldgebieten. Die Ergebnisse ließen Wissenschaftler und Praktiker aufhorchen.

Das Laser-Scanning liefert eine Punktwolke, das *Matching* in der digitalen Photogrammetrie ebenfalls. Es ist daher nicht überraschend, dass Photogrammeter, die sich mit dem *Matching* intensiv befasst haben bzw. befassen, sich auch um die Auswertung der Laser-Scanner-Daten angenommen haben. Wie aus solchen Punktwolken Gebäude modelliert werden können, findet man unter anderem in den Publikationen von Förstner & Weidner (1995), Brenner & Haala (1999) und Maas & Vosselman (1999).

In der Folge sollen die Beiträge unseres Institutes, des Institutes für Photogrammetrie und Fernerkundung der TU Wien (I.P.F.), zum Laser-Scanning aufgezählt werden:

#### **a) Geländemodelle in Stadt- und Waldgebieten**

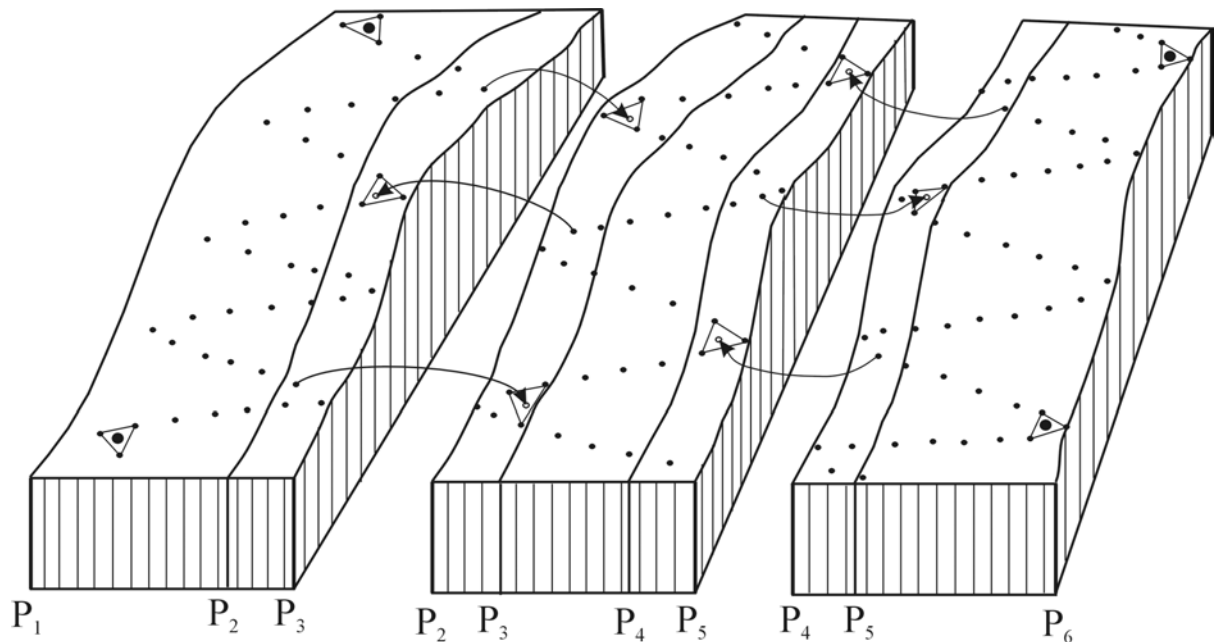
Der am I.P.F. seit langem verwendete Algorithmus zur Interpolation von Geländemodellen aus photogrammetrischen Daten zeichnet sich besonders dadurch aus, dass die zufälligen Messfehler weitgehend eliminiert - d.h. herausgefiltert - werden können (Kraus, 2000). Dieser Interpolations- und Filteralgorithmus war auf die Spezifika der Laser-Scanner-Daten anzupassen. Diese Anpassung konnte durch die Einführung einer schiefen und exzentrischen Fehlerverteilung in die robuste Schätzung erreicht werden (Kraus, 1997). Eine wesentliche Effizienz- und Leistungssteigerung konnte durch die vor kurzem vorgenommene Einführung von Datenpyramiden erzielt werden (Pfeifer et al., 2001).

Beispiele sind unter anderem in folgenden Publikationen zu finden: Kraus & Pfeifer (1998), Briese et al. (2001a), Briese et al. (2001b). In der zuletzt angegebenen Publikation sind auch Genauigkeiten von Geländemodellen in Stadtgebieten enthalten. Im Mittel beträgt die Genauigkeit  $\pm 7$  cm. Auf verkehrsfreien Straßen erreicht man sogar eine Genauigkeit von  $\pm 1.0$  cm; das Laser-Scanning ist also der **Präzisionsphotogrammetrie** zuzuordnen.

Zur Abrundung dieser Anwendung sollen noch einige Publikationen erwähnt werden, die sich ebenfalls mit der Ermittlung von Geländemodellen aus Laser-Scanner-Daten befassen: Hansen & Vögtle, 1999, Lohmann et al., 2000, Vosselman, 2000, Axelson, 2000).

#### **b) Simultane Einpassung der Laser-Scanner-Streifen in das Landeskoordinatensystem**

Die GPS-Positionierung und die IMU-Orientierung erlauben – bei einer (bekannten) Referenzstation und bei Kenntnis des Geoids – eine direkte Georeferenzierung. Verschiedene Einflüsse, z.B. Drifts in der IMU-Orientierung, führen zu systematischen Fehlern. Von der Photogrammetrie sind solche Phänomene aus der Streifentriangulation bekannt. Das Denkmuster der Streifentriangulation haben wir am I.P.F. zur simultanen Einpassung der Laser-Scanner-Streifen in das Landeskoordinatensystem übernommen. Abb. 3 zeigt das Grundprinzip anhand der Höheneinpassung. Details – insbesondere die Ermittlung der Streifen Verknüpfungselemente – findet man bei Kager & Kraus (2001). In einem Pilotprojekt im Oder-Gebiet konnte mit dieser Methode die Homogenität an den Streifenübergängen um den Faktor Zwei gesteigert werden (Brockmann & Mandlbürger, 2001).



- Höhenpaßpunkte
  - Laser Scanner-Punkte
- $P_i$  geradlinige Geländeprofile

Abb. 3: Simultane Höheneinpassung von überlappenden Laser-Scanner-Streifen in das Landeskoordinatensystem

**c) Simultane Einpassung frei gewählter terrestrischer Laser-Scanner Standpunkte**

Auch für terrestrische Laser-Scanner kann ein Denkmuster aus der Photogrammetrie ein interessantes Auswerteverfahren bieten. Terrestrische Laser-Scanner liefern standpunktweise Punktwolken. Man könnte die Laser-Scanner-Standpunkte in einem Koordinatensystem einmessen. So, wie man aber bei der terrestrischen Photogrammetrie immer mehr davon abkommt, die Aufnahmeorte einzumessen und statt dessen eine Phototriangulation mit Verknüpfungs- und Passpunkten vornimmt, sollte man auch die Laser-Scanner-Standpunkte einer Blockausgleichung mit „unabhängigen Modellen“ unterwerfen. Das Prinzip zeigt Abb. 4. Ein Modell entspricht einem Laser-Scanner-Standpunkt mit seinen Polarkoordinaten. Resultate einer solchen Blockausgleichung haben wir anhand einer Innenraumaufnahme im Schloss Schönbrunn bereits publiziert (Pfeifer et al., 2000). Ein großes Problem ist die Identifizierung von Verknüpfungspunkten in den Punktwolken der Laser-Scanner-Daten. Mit speziellen Marken, die im Innenraum angebracht wurden und die in den zusätzlich vorhandenen Intensitätsbildern identifiziert werden konnten, wurde dieses Problem gelöst.

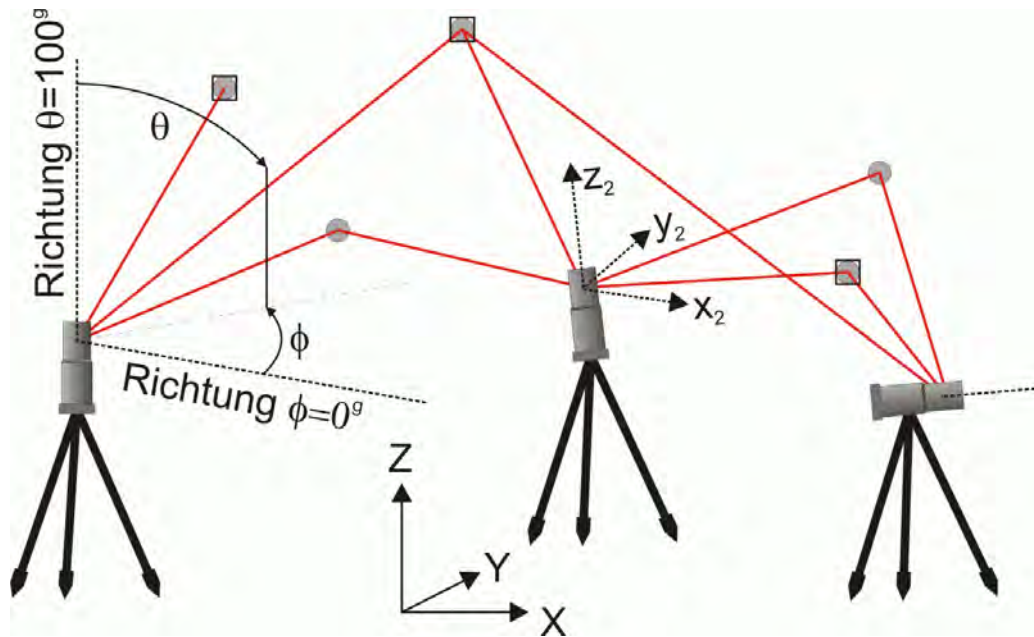


Abb. 4: Blockausgleichung mit „unabhängigen Modellen“

#### d) Ableitung von Strukturelementen aus Laser-Scanner-Daten

Die größte Schwäche der gegenwärtigen Laser-Scanner ist, dass man nur Punktwolken und keine Strukturelemente, wie zum Beispiel Geländekanten, erhält. Mit raffinierten Methoden können – auf Umwegen – trotzdem Strukturelemente abgeleitet werden.

Das I.P.F., aber auch andere Gruppen, bemühen sich gegenwärtig, Geländekanten aus Laser-Scanner-Daten zu extrahieren. Eine solche Kantenextraktion kann nicht mit den Methoden der digitalen Bildverarbeitung, die in zweidimensionalen Bildern automatisch (Kontrast-)Kanten finden, erfolgen, sondern es sind Methoden für eine 2.5D-Kantenextraktion gefragt. Mit solchen Problemstellungen sind Photogrammeter besser vertraut als andere Berufsgruppen.

Anhand eines anderen Strukturelementes, nämlich von Uferlinien, konnten wir, d.h. Herr Mandlbürger, zeigen, wie dreidimensionales Denken und Handeln zum Ergebnis führen. Diese Methode wurde anhand umfangreicher Beispiele für die Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz, mit Erfolg erprobt (Brockmann & Mandlbürger, 2001).

## 4 Gemeinsames Paradigma für Photogrammetrie und Fernerkundung als Ausblick

Das zuletzt erwähnte Beispiel demonstriert, wie hilflos man in einem reinen Entfernungsbild ist. Das gegenwärtige Laser-Scanning liefert nur Richtungen und Entfernungen; aus denen – im Flugzeugeinsatz – ein Bild von Höhenwerten abgeleitet wird. Von der aufgenommenen Landschaft hat man die Höhenwerte, aber sonst

nichts; es ist „Nacht“. So wie der Mensch für seine Aktivitäten das Licht schätzt, so muss auch das Laser-Scanning mit mehr Licht ausgestattet werden.

Bei der Fernerkundung spielt das Licht – als Sammelbegriff der elektromagnetischen Strahlung – die zentrale Rolle. Die Fernerkundung, die Informationen über Art und Eigenschaften entfernter Objekte - unter anderem auch geometrische Eigenschaften – gewinnt, benutzt als Informationsträger die elektromagnetische Strahlung. Dabei werden passive Sensoren (zur Aufzeichnung natürlicher Strahlung von Sonne und Erde) und aktive Sensoren (zur Registrierung künstlich erzeugter Strahlung) eingesetzt.

Ein gemeinsames Paradigma für Photogrammetrie und Fernerkundung ist gesucht. Dieses gemeinsame Paradigma sollte die beiden Paradigmen, die in den Abb. 1 und 2 skizziert sind, vereinigen und die elektromagnetische Strahlung als Informationsträger in den Mittelpunkt stellen. Abb. 5 ist der Versuch der Skizzierung eines gemeinsamen Paradigmas für Photogrammetrie und Fernerkundung, eines P&F-Paradigmas. Wegen der oben angegebenen weiten Definition der Fernerkundung sollte man es besser F&P-Paradigma nennen.

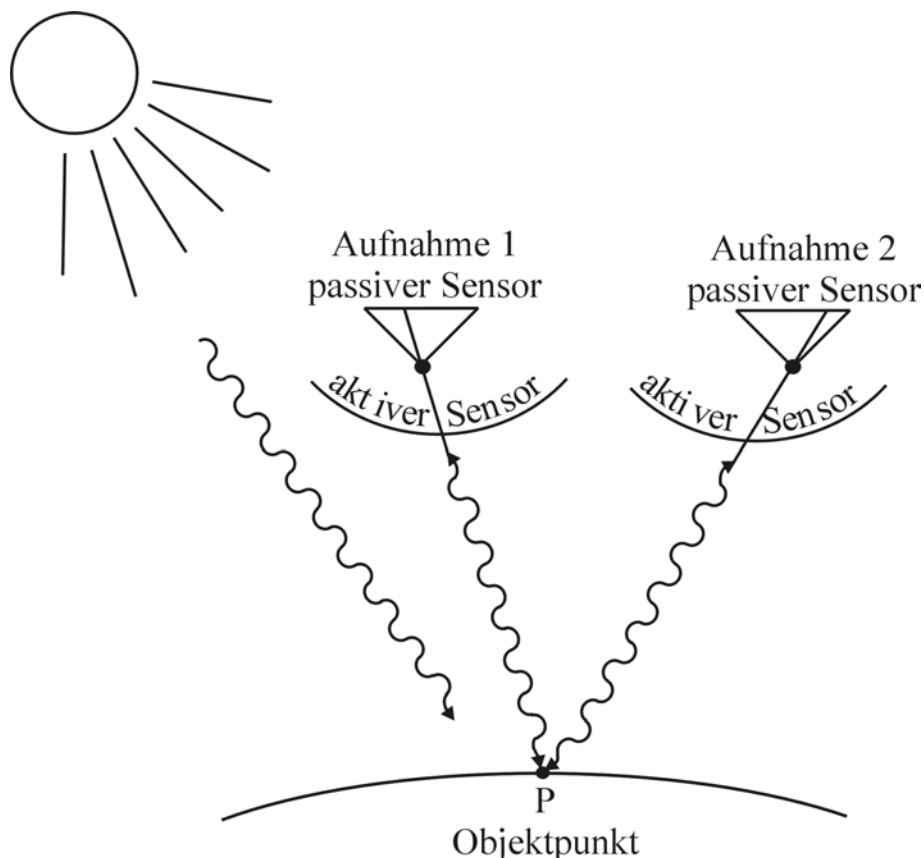


Abb. 5: Gemeinsames Paradigma für Photogrammetrie und Fernerkundung

Das F&P-Paradigma (Abb. 5) ist einerseits eine Vereinigung der Abb. 1 und 2, d.h. des bisherigen photogrammetrischen Paradigmas und des neuen photogrammetrischen Paradigmas, und andererseits wurden die (geradlinigen) Richtungen der abbildenden Strahlen (Abb. 1) und die (geradlinigen) Vektoren (Abb. 2) durch symboli-

sche (elektromagnetische) Wellen ersetzt. Die rein geometrische Sicht wird mit der physikalischen Sicht zusammengeführt.

Das F&P-Paradigma befriedigt die Fernerkundung und die Photogrammetrie in gleicher Weise. Das gemeinsame Paradigma ist **für beide Disziplinen ein Paradigma-Wechsel** im Vergleich zum gegenwärtigen Denk- und Handlungsmuster, denn

- zu jedem (Fernerkundungs-)Pixel gibt es auch ein „Spektrum“ der Entfernungen, das mindestens aus dem ersten und letzten Impuls besteht,
- zu jedem (Photogrammetrie-)Pixel gibt es auch ein Spektrum der elektromagnetischen Strahlung, das - abhängig vom Sensor – von natürlicher und/oder künstlicher Strahlung geprägt ist,
- zu jedem Pixel gibt es im Allgemeinen mindestens ein zweites Pixel mit dem gleichen photogrammetrischen und fernerkundlichen Informationsgehalt, aber aufgenommen aus einer anderen Richtung.

Die zuletzt angedeutete Einschränkung auf nur ein Pixel von der jeweiligen Objektstelle und die gegenseitige Substitution der Komponenten des F&P-Paradigmas sind für die Praxis von großer Wichtigkeit, denn

- das Laser-Scanning gestattet auch die Objektrekonstruktion nur mit einem Aufnahmestrahl (wichtig in bewaldeten oder eng bebauten Gebieten),
- das Laser-Scanning gestattet die Objektrekonstruktion auch in Gebieten ohne Textur, wo die Stereophotogrammetrie versagt,
- beim Laser-Scanning ist man nicht an eine gute Beleuchtung der Landschaft durch die Sonne gebunden,
- etc.

Die gerätetechnische Verwirklichung des in der Abb. 5 skizzierten F&P-Paradigmas wird von Firmen bereits angekündigt und wird sogar in Teillösungen bereits erprobt. Es war nicht die Absicht dieses Vortrages, auf gerätetechnische Aspekte einzugehen. Es sollten vielmehr die Wissenschaftler und Praktiker auf die verschiedenartige Nutzung der komplexen Datensätze der Zukunft aufmerksam gemacht werden. Diese Datensätze sollten möglichst simultan aufgenommen werden, aber auch eine zeitliche Versetzung bzw. eine Auswahl wird aus pragmatischen und finanziellen Gründen in vielen Fällen empfehlenswert sein.

## 5 Literaturverzeichnis

- ABELSON, H., et al., 1986: A New Era in Scientific Computation. MIT, Comp. Lab., Mimeo.
- ACKERMANN, F., ENGLICH, M., KILIAN, J., 1994: Die Laser-Profil-Befliegung „Gammertingen 1992“. ZfV **119** (5): 264-277.
- ACKERMANN, F., 1995: Digitale Photogrammetrie – ein Paradigma-Sprung. ZPF **63** (3): 106-115.
- AXELSSON, P., 2000: DEM Generation from Laser Scanner Data Using Adaptive Tin Models. Int. Archives of Ph. and RS, XXXIII (B4), ISPRS-Congress, Amsterdam.
- BRENNER, G., HAALA, N., 1999: Rapid Production of Virtual Reality City Models. GIS **12** (2): 22-28.

- BRIESE, Ch., KRAUS, K., MANDLBURGER, G., PFEIFER, N., 2001a: Einsatzmöglichkeiten der flugzeuggetragenen Laser-Scanner. Mitteilungen des Institutes für Geodäsie der Uni Innsbruck, Heft 19: 17-26.
- BRIESE, Ch., BELADA, P., PFEIFER, N., 2001b: Digitale Geländemodelle im Stadtgebiet aus Laser-Scanner-Daten. Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation **89** (2): im Druck und in diesem Tagungsband.
- BROCKMANN, H., MANDLBURGER, G., 2001: Aufbau eines Digitalen Geländemodells vom Wasserlauf der Grenzoder. In diesem Tagungsband.
- FÖRSTNER, W., WEIDNER, U., 1995: Towards Automatic Building Extraction from High-Resolution Digital Elevation Models. ISPRS-Journal **50** (4): 38-49.
- HANSEN, W., VÖGTLE, T., 1999: Extraktion der Geländeoberfläche aus flugzeuggetragenen Laserscanner-Aufnahmen. PFG 1999 (4): 229-236.
- KAGER, H., KRAUS, K., 2001: Height Discrepancies between Overlapping Laser Scanner Strips - Simultaneous Fitting of Aerial Laser Scanner Strips. Proceedings of the 5<sup>th</sup> Conference on Optical 3-D Measurement Techniques, Vienna, in print.
- KRAUS, K., 1997: Eine neue Methode zur Interpolation und Filterung von Daten mit schiefer Fehlerverteilung. Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation **85** (1): 25-30.
- KRAUS, K., PFEIFER, N., 1998: Determination of Terrain Models in Wooded Areas with Airborne Laser Scanner Data. ISPRS Journal **53** (4): 193-203.
- KRAUS, K., 2000: Photogrammetrie. Band 3 (Topographische Informationssysteme). – 1. Aufl., 419 S., Dümmler Verlag, Köln.
- KUHN, T., 1962: The Structure of Scientific Revolutions. 2<sup>nd</sup> Edition Univ. of Chicago Press.
- LOHMANN, P., KOCH, A., SCHAEFFER, M., 2000: Approaches to the Filtering of Laser Scanner Data. Int. Archives of Ph. and RS, XXXIII (B3), ISPRS-Congress, Amsterdam.
- MAAS, H., VOSSSELMAN, G., 1999: Two Algorithms for Extracting Building Models from Raw Laser Altimetry Data. ISPRS-Journal **54** (2-3): 153-163.
- PFEIFER, N., KRAUS, K., SCHWARZ, R., ULLRICH, A., 2000: Nahbereichs-Laser-Scanner für die Innenraum-Aufnahme. Tagungsband Ingenieurvermessung 2000, München, Wittmer-Verlag.
- PFEIFER, N., STADLER P., BRIESE, Ch., 2001: Derivation of Digital Terrain Models in the SCOP++ Environment. Proceedings of OEEPE Workshop on Airborne Laserscanning and Interferometric SAR for Detailed Digital Terrain Models, Stockholm, Sweden.
- SCHMUTZER, M., 1994: Ingenium und Individuum. – 1. Aufl., 472 S., Springer-Verlag Wien New York.
- VOSSSELMAN, G., 2000: Slope based filtering of laser altimetry data. Int. Archives of Ph. and RS, XXXIII, (B3/29), ISPRS-Congress, Amsterdam.

# Spectroradiometry as a Tool for Phenological Characterization of Agricultural Crop Stands

MATHIAS KNEUBÜHLER<sup>1</sup>

*From the early days of remote sensing until today, there has been a wide range of applications of remote sensing data for agricultural management. Improvements in spatial, spectral and temporal resolution of available data products together with precision agriculture have meant an increase in the availability of services and products that help to manage agricultural operation more efficiently and profitably. Image-based remote sensing offers the potential to provide spatially and temporally distributed information for agricultural management. Remote sensing information can improve the capacity and accuracy of decision support systems (DSS) and agronomic models by providing accurate input information or as a means of within-season calibration or validation. Crop phenology is an important variable required by precision crop management systems (PCMS) in support of time-critical crop management (TCCM). Estimates of crop development, which are used for nutrient deficiencies detection, crop yield prediction or timing of forthcoming harvest are important in agricultural planning and policy making.*

*While the collection of information on the status of biophysical and biochemical characteristics of a crop canopy, that can be correlated to its phenology, is time consuming and limited to punctual measurements, remote sensing allows large and continuous radiometric measurements. Parameters retrievable by a remote sensing system must have an impact on the spectral signal of vegetation canopies. Biophysical parameters are easier to determine because they affect broader spectral regions, whereas biochemical concentrations are more difficult to assess since their spectral features are small and therefore only detectable by hyperspectral sensors.*

*In this paper, a methodology to track the main development stages of two cereals relevant for agricultural purposes and precision farming needs, based on hyperspectral data, is presented. An investigation of the suitability of four key parameters to track a crop stand's vitality and an error assessment are performed. Leaf area index (LAI), fraction of absorbed photosynthetically active radiation (FAPAR), water content and chlorophyll content are defined as the main parameters reflecting vitality and therefore alter with the plants' phenological stage.*

## 1 Introduction

Between April and August 1999 periodic observations of a spring wheat and a winter barley field have been performed in an intensively cultivated agricultural area, the Limpach Valley (470 m a.s.l.) located in Western Switzerland. In addition, the two fields were covered by the HyMap imaging spectrometer on July 16<sup>th</sup> 1999, one day prior to harvest of the winter barley field. Wheat is the most important cool-temperate cereal in the world, being followed by barley. Wheat cultivars cover more than 30% of Switzerland's acreage for agricultural products, barley is grown on over 15% of this area.

---

<sup>1</sup> Mathias Kneubühler, Remote Sensing Laboratories (RSL), Universität Zürich, Winterthurerstrasse 190, CH-8057 Zürich



The selection of biophysical and -chemical variables to be investigated in this study is driven by their ability to track the phenological development of a plant. This implies detectable gradients of the observed data over time. In addition, it must be possible to ascertain them by means of reflectance measurements from a remote sensor. Data collection included spectroradiometric measurements of the crop canopy, determination of leaf area index (LAI), fraction of absorbed photosynthetically active radiation (FAPAR), plant-, leaf- and grain-water content and chlorophyll content. The plant growth stage was characterized using a decimal code (DC) for the growth stages of cereals, developed by Zadoks et al. [25]. According to this code, the phenological development of crops can be divided into a vegetative, a generative and a reproductive phase. The vegetative phase consists of the growth stages seedling growth (DC 10-19) and tillering (DC 20-29), the generative phase of stem elongation (DC 30-39), booting (40-49), inflorescence emergence (DC 50-59), and anthesis (DC 60-69), the reproductive phase of milk development (DC 70-79), dough development (DC 80-89), and ripening (DC 90-99). Data takes were aimed to representatively cover all these phenological stages. Mean dates and durations of phenological stages of cereals were used as a starting point [21][22][15]. Spectroradiometric data was collected using an ASD-Field Spectrometer covering the wavelength range from 0.4  $\mu\text{m}$  to 2.5  $\mu\text{m}$ . Leaf area index is determined using a LICOR LAI-2000 meter [24] and the fraction of absorbed photosynthetically active radiation is determined using a ceptometer [8]. Chlorophyll a and b content was determined from samples in the laboratory using the equations of Lichtenthaler [17]. Plant-, leaf- and grain-water content are measured by oven-drying of the samples.

## 2 Methodology

### 2.1 Measurement Plan

Both, the spectral characterization of an agricultural stand's phenology and the retrieval of quantitative information of plant variables from spectral data describing the stand's vitality status depend on accurate measurements. A standardized measurement plan, incorporating spectral data takes and acquisition of plant vitality parameters was developed. Sampling strategy considerations are based on temporal and spatial requirements as well as sample size considerations. Field and laboratory measurements consist of:

*Spectroradiometric measurements of the vegetation canopy using an ASD-Field Spectrometer.* To satisfactorily characterize the spectral variability within the crop fields, 50 to 60 reflectance measurements were recorded, performing stratified random sampling across a transect along the diagonal of one half part of the fields under investigation. Each measurement taken was visually described as being of dense, medium or low vegetation cover.

*Determination of leaf area index using a LICOR LAI-2000 Meter.* Acquisition of about 20 LAI measurements was performed in the same manner as for the spectroradiometric measurements. Since LAI data strongly depends on the canopy architecture, which itself varies during the day, the measurements were carried out around solar noon, weather permitting.

*Determination of the fraction of absorbed photosynthetically active radiation (FAPAR) by the canopy.* FAPAR measurements were carried out using a ceptometer based on the following equation [13]:

$$FAPAR = 1 - \frac{PAR_r + (PAR_t - PAR_s)}{PAR_0},$$

where  $PAR_t$  upward radiation at the top of the canopy,  $PAR_b$  downward radiation at the bottom of the canopy,  $PAR_s$  radiation reflected at soil surface and  $PAR_0$  incoming radiation at the top of the canopy.

To measure FAPAR in the field, the abovementioned radiation fluxes must be measured independently. Approximately 20 FAPAR values were recorded for each of the two agricultural stands per measurement day. The data was acquired randomly along a transect, and characterized as being of dense, medium or sparse vegetation coverage.

*Determination of plant-, leaf- and grain-water content.* Plant-, leaf- and grain-samples of a mean vegetation stand were collected and placed in a drying oven at 85° C for 48 hours (weight constancy). The weight and leaf area of the fresh samples were measured before drying to determine water content from weight loss.

*Determination of leaf chlorophyll content.* Leaf samples were collected in the field and taken to the laboratory for chlorophyll extraction. The photometric determination of chlorophyll a and b was performed with a CADAS-100 spectralphotometer [16] in 100% acetone using the equations of Lichtenthaler [17]:

$$\begin{aligned} C_a &= 11.24 \cdot A_{661.6} - 2.04 \cdot A_{644.8}, \\ C_b &= 20.13 \cdot A_{644.8} - 4.19 \cdot A_{661.6}, \\ C_{a+b} &= 7.05 \cdot A_{661.6} + 18.09 \cdot A_{644.8}, \end{aligned}$$

where A is the measured absorbance value. The leaf area of each leaf is determined using a LICOR LI-3100 Leaf Area Meter [18].

*Characterization of the growth stage of each measurement day using a decimal code for growth stages of cereals according to Zadoks et al. [25].*

## 2.2 Data Analysis

Each of the four biophysical and biochemical parameters chosen to track the vitality status of a crop stand (LAI, FAPAR, water content, chlorophyll content) is related to the spectral data of the corresponding phenological stages, following the methods described below.

### 2.2.1 Estimating LAI

LAI estimation is based on a semi-empirical reflectance model that calculates LAI of a green canopy based on the WDV (weighted difference vegetation index) and the inverse of an exponential function [5][6]. The WDV is a weighted difference between the measured reflectances  $\rho(\lambda_{NIR})$  and  $\rho(\lambda_{RED})$ , assuming that the ratio of these two reflectances is constant for a certain type of bare soil. In this way, the influence of soil background is corrected:

$$WDV = \rho(\lambda_{NIR}) - C \cdot \rho(\lambda_{RED}),$$

where  $C = \frac{\rho_{SOIL}(\lambda_{NIR})}{\rho_{SOIL}(\lambda_{RED})}$ .

The LAI is calculated as:

$$LAI = \frac{-1}{\alpha} \cdot \ln \left[ 1 - \frac{WDV}{\rho_{\infty}(\lambda_{NIR})} \right],$$

where  $\alpha$  describes the rate at which the abovementioned function runs to its asymptotic value and  $\rho_{\infty}(\lambda_{NIR})$  is the asymptotic limiting value for the WDV. Parameters  $\alpha$  and  $\rho_{\infty}(\lambda_{NIR})$  must be estimated empirically from a training set.

### 2.2.2 Estimating FAPAR

The fraction of photosynthetically active radiation is often expressed as an exponential function of LAI [1]:

$$FAPAR = A \cdot [1 - B \cdot \exp(-C \cdot LAI)],$$

where  $A$ ,  $B$  and  $C$  must be estimated empirically from a training set.

### 2.2.3 Estimating Water Content

Although the spectral reflectance properties of vegetation canopies are determined primarily by the absorption and scattering processes within the plant material and the stand's structure, there are superimposed effects of absorption by water and other biochemical constituents. Early studies by Gates et al. [10], Sinclair et al. [23] and Gausman [11] showed that in the near- and shortwave-infrared region, a negative relationship between leaf water content and leaf reflectance can be found. Water content determination of a whole plant canopy is highly influenced by canopy characteristics, making reflectance a mixture of contributions from plant biochemicals, canopy structure and soil background contribution. Since water content and green biomass are positively correlated, observed high positive correlations between canopy water content and reflectance values in this region [20] are basically caused by biomass and not by water itself. Nevertheless, this relation bears the potential for canopy water estimation from a remote sensor in the near-infrared region. In this study, determination of plant water content is performed using stepwise multiple linear regression from wavelengths showing highest correlation of measured water content and corresponding spectral data for all phenological stages available. Plant water content  $c$  can be expressed as:

$$c = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i \cdot \rho(\lambda_i),$$

where  $c$  is the plant water content,  $n$  the number of wavelengths  $\lambda_i$  used in the regression model,  $a_0$  the regression constant,  $a_{i=1,n}$  the coefficients of the selected regressor wavelengths  $\lambda_i$ , and  $\rho(\lambda_i)$  the reflectances of the selected regressor wavelengths  $\lambda_i$  between 400-1800 nm.

### 2.2.4 Estimating Chlorophyll Content

Most non-destructive techniques for the determination of chlorophyll relate the leaf reflectance at about 675 nm to the concentration of the total chlorophyll. Chappelle [4] used ratio spectra that allow the identification of reflectance bands corresponding to the absorption bands of specific pigments. The developed *ratio analysis of reflectance spectra* (RARS) *algorithm* allows estimation of the concentrations of chlorophyll a and b per unit mass solvent using a linear relationship. Blackburn [2] describes the relationship of  $RARS_a$  with canopy chlorophyll a concentration per unit area using an exponential function.  $RARS_b$  is reported to have no relationship with chlorophyll b.

The algorithms for chlorophyll a and b are defined as follows:

$$RARS_a = \frac{\rho_{675}}{\rho_{700}} \text{ and } RARS_b = \frac{\rho_{675}}{\rho_{650}} \cdot \rho_{700},$$

where  $r_i$  is the reflectance at the wavelength  $i$ .

Blackburn developed the *pigment specific simple ratio* (PSSR) *algorithm*. An exponential function is reported to best describe the relationship of PSSR and chlorophyll a and b concentration.  $PSSR_a$  and  $PSSR_b$  are defined as follows [2]:

$$PSSR_a = \frac{\rho_{800}}{\rho_{680}} \text{ and } PSSR_b = \frac{\rho_{800}}{\rho_{635}}.$$

In addition, the absolute feature height and feature width of the 675 nm chlorophyll a absorption region are investigated for the spectral data of the different phenological stages, in order to compare the results to measured chlorophyll concentrations.

### 3 Results and Conclusions

#### 3.1 LAI

Although the concept of estimating LAI from WDVl was developed for green vegetation [5][6], it is reported to be likewise applicable to the phenological stages of flowering and ripening [7], when LAI and photosynthetic activity decrease. In this study, the growth stages of the vegetative phase and the generative phase until the beginning of anthesis (flowering) are subsequently referred to as *growing phase*, the stages of anthesis and the following reproductive phase are referred to as *senescing phase*.

Best results for LAI estimation from WDVl were found for separate treatment of the *growing* and the *senescing phase*. The combined use of the two data sets of spring wheat and winter barley for LAI estimation yielded the best results:

The *growing phase* (solid lines in Figure 1) of both wheat and barley is best described by a joint dataset of both cultivars over the whole cropping cycle. Fit-parameters for LAI estimation from WDVl of both spring wheat and winter barley can be used interchangeably.

The *senescing phase* (dashed lines in Figure 1) of both wheat and barley is best described by a joint data set of both cultivars over the *senescing phase*. Especially LAI estimates in the senescing phase are more accurate under absence of data from the *growing phase*.

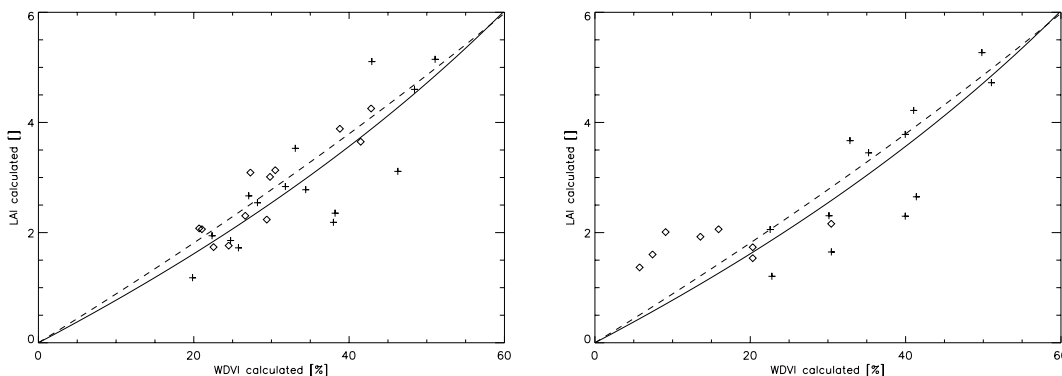


Figure 1: Fitted relationship between WDVl and LAI for spring wheat (left, rms\_rel *growing*: 20.2%, rms\_rel *senescing*: 13.1%) and winter barley (right, rms\_rel *growing*: 23.0%, rms\_rel *senescing*: 100.7%). The solid line represents the exponential fit for the *growing phase*, the dashed line for the *senescing phase*. Crosses denote WDVl values and corresponding measured LAI of the *growing phase*, asterisks WDVl values and measured LAI of the *senescing phase*. The presence of weeds and standing litter material strongly deteriorates LAI estimation from WDVl towards the end of the cropping cycle.

LAI estimates of winter barley in the *senescing phase* suffer from heavy weed infestation during ripening. This disturbs both the LAI-2000 meter readings and the spectroradiometric measurements (WDVI values). In addition, the LAI-2000 meter's measurement design, which is based on a radiation interception method involving all elements of a vegetation canopy's architecture, such as green leaves, litter and ears, tends to overestimate LAI of a crop stand mainly towards the end of a vegetation period [24]. As a consequence, it can be concluded, that LAI estimates based on the joint data set of *senescing* spring wheat and winter barley yields more accurate results of LAI of winter barley towards the end of the cropping cycle than can actually be indicated by the applied accuracy investigation of Figure 1. Almost

any weeds were present in the winter barley field anymore at the day of the HyMap data take. As can be seen in Figure 6 (right), the mean LAI value calculated on the basis of the imaging spectrometer data is LAI=0.32 for the barley field, which is much lower than the values recorded under weed presence. An LAI of 0.41 was recorded using the LAI-2000 meter one day after the overflight (see Table 1).

### 3.2 FAPAR

A plant's capacity to absorb incoming radiation for biomass production is dependent on its physiological state and therefore related to its phenological stage. Highest LAI values for spring wheat were measured during stem elongation for DC 32-33 (2<sup>nd</sup> to 3<sup>rd</sup> node detectable). Highest FAPAR values were recorded on the same day. LAI and FAPAR values stay constantly high until completion of anthesis.

Winter barley showed highest measured LAI and FAPAR values during inflorescence emergence (DC 55-59). Contrary to spring wheat, the ears of winter barley are larger and tend to bend sideward, preventing incoming radiation from penetrating the canopy, which leads to highest observed LAI and FAPAR readings.

Estimation of FAPAR can be performed using an exponential relationship with LAI. The fitted relationship between modelled LAI values derived from WdVI (see chapter 3.1) and measured FAPAR for spring wheat, winter barley and a joint data set are presented in Figure 2 (left). Based on the derived fit parameters, FAPAR can be modelled over the cropping cycle (Figure 2, right).

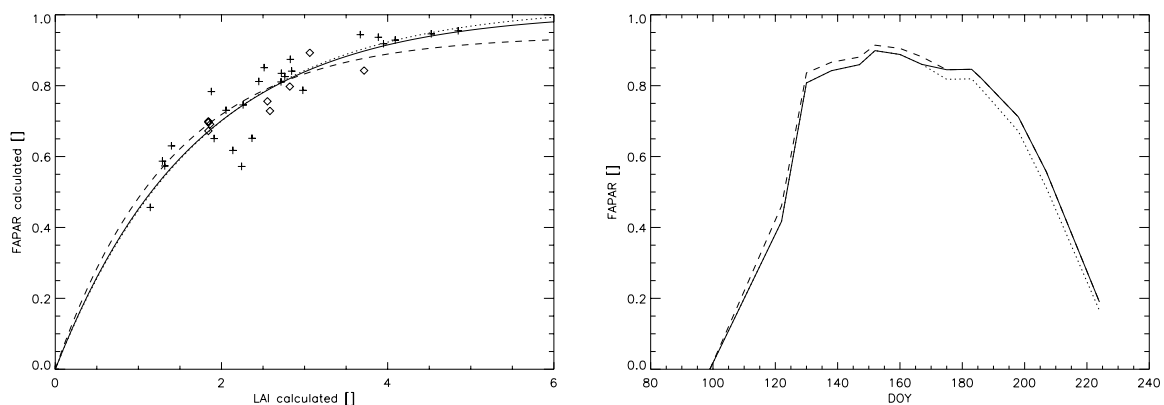


Figure 2: Left: Fitted relationship between LAI values derived from WdVI and measured FAPAR values for spring wheat (dotted line), winter barley (dashed line) and a joint data set (solid line). Crosses denote LAI values and corresponding, measured FAPAR values of spring wheat, asterisks LAI values and corresponding, measured FAPAR values of winter barley (rms\_rel spring wheat: 8.2%, rms\_rel winter barley: 4.1%, rms\_rel joint data set: 7.5%). Right: Modelled FAPAR of spring wheat over the cropping cycle (solid line: FAPAR from optimal fit parameters for separate treatment of *growing* and *senescing phase*; dashed line: FAPAR from LAI based on fit parameters of *senescing phase*; dotted line: FAPAR from LAI based on fit parameters of *growing phase*). DC 32-33 of the phenological cycle show maximum values for both LAI and FAPAR of spring wheat.

### 3.3 Water Content

Water content determination in the laboratory was performed for plant-, leaf- and grain-samples. As a general trend, water content decreases from the early stages of plant growth towards the end of the cropping cycle. Whereas plant- and grain-water content decrease steadily towards the end of the *senescing phase*, leaf-water content decreases abruptly from the water ripe stage (DC 71), clearly marking the beginning of the reproductive phase.

Since spectroradiometric measurements of a crop canopy, as recorded by a remote sensor, do not represent single leaves, but a whole plant, the extraction of plant-water content from spectroradiometric data was investigated. Determination of predictive wavelengths  $\lambda_i$ , the regression constant  $a_0$  and regression coefficients  $a_i$  was carried out on a calibration data set of measured plant-water content and corresponding spectral data for all phenological stages available. The investigation was performed at HyMap resolution to test the suitability of an imaging spectrometer's spectral resolution. First derivative analysis of the wavelength dependent correlation coefficient  $r$  was applied to select predictive spectral wavebands, that are consecutively entered into stepwise multiple linear regression. The optimal number of regressor wavelengths  $\lambda_i$  was determined by a maximal multiple coefficient of determination  $R^2$  and a minimal *relative rms* of a verification data set (Figure 3).

The phenological stages of the reproductive phase (milk development (DC 70-79), dough development (DC 80-89) and ripening (DC 90-99)) show characteristic water contents of the grains [25]. Strong linear correlations ( $r=0.99$ ) of plant-water content and grain-water content were found for the time between DC 71 (caryopsis water ripe) and DC 92 (caryopsis hard) under dry atmospheric conditions. Nevertheless, humid conditions around the stage of hard dough (DC 87) can prevent the grains from losing moisture and reaching the desired grain moisture content of 15% at harvest (DC 92). This effect disturbs the linear relationship between plant- and grain-water content.

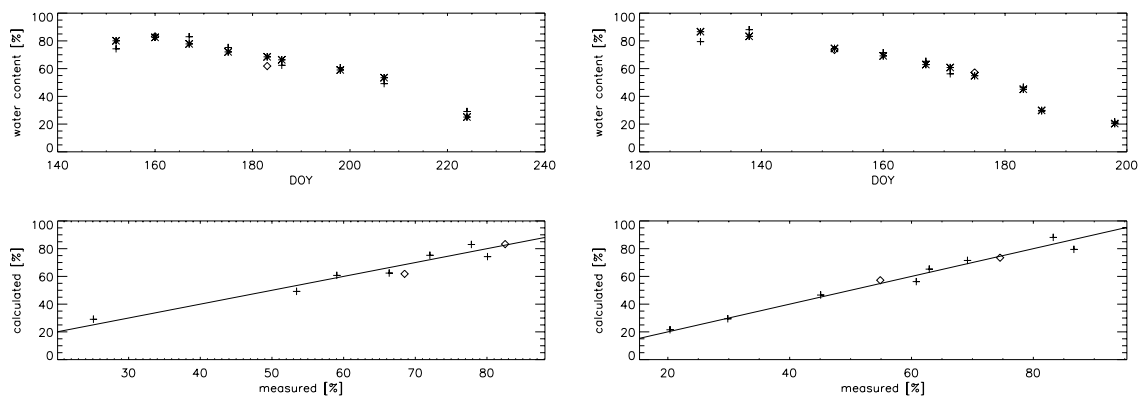


Figure 3: Determination of plant water content of spring wheat (left, rms\_rel of the verification data: 7.7%) and winter barley (right, rms\_rel of the verification data: 3.1%) using stepwise multiple linear regression. Asterisks denote plant water content as measured in the laboratory, crosses are water content values from the calibration set of the multiple regression and squares are water content values calculated for validation of the regression equation.

### 3.4 Chlorophyll Content

Several studies have demonstrated that determination of leaf chlorophyll content from spectroradiometric data is possible [14][4][12][2], whereas chlorophyll determination of spectral data from vegetation canopies suffer from influences of the total biomass (LAI) [9]. The applied algorithms in Figure 4 were originally developed for soybean leaves (RARS) and senescent tree leaves (PSSR) and applied to a canopy of bracken throughout a growing season [3]. None of the methods was applied to agricultural crop stand canopies.

Figure 4 shows a strong variation over time in the reflectance ratios of RARS and PSSR and chlorophyll a and b content per unit area. Both algorithms show a turning point, which, for spring wheat is reached at the stages of *flag leaf sheath opening / half of inflorescence emerged* (DC 47, 55). For winter barley, this turning point is only reached at *the beginning of anthesis* (DC 61). Nevertheless, the strong relationships between the reflectance ratios and chlorophyll concentrations using an exponential function, as described in the literature, could

not be found for the two data sets under investigation. It is obvious that the two algorithms are not able to track chlorophyll of plants that undergo such fundamental physiological changes over a cropping cycle as crop stands do, by an exponential function.

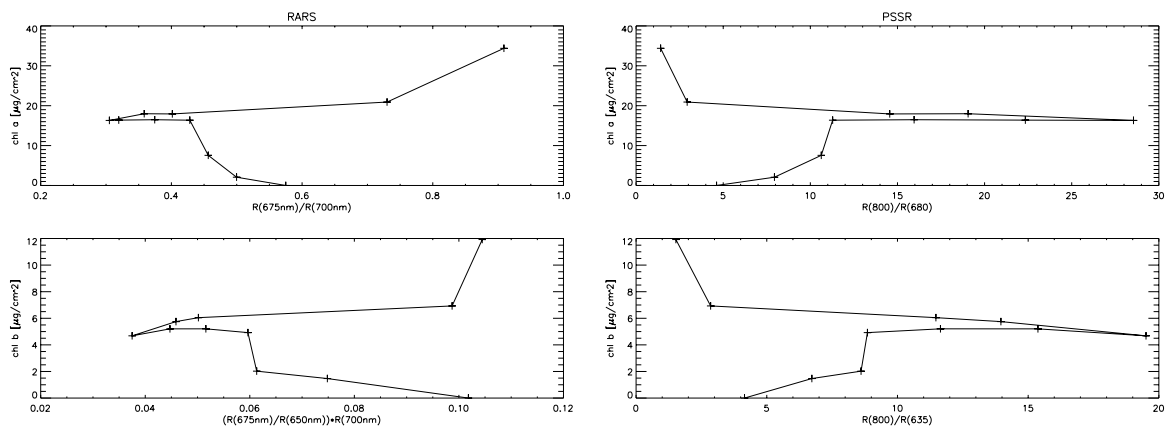


Figure 4: Ratio analysis of reflectance spectra (RARS) algorithm (left) and pigment specific simple ratio (PSSR) algorithm (right) for a dense spring wheat canopy during a cropping cycle. Both algorithms show a strong variation in the relationship between reflectance ratio and chlorophyll a and b content per unit area.

Calculation of the absolute feature height (Figure 5, left) and feature width of the 675 nm chlorophyll a absorption region of spring wheat show high correlations with LAI derived from WDVl (Figure 5, middle), whereas measured chlorophyll a and b concentrations per leaf area decrease during the vegetation period (Figure 5, right). As a consequence, it must be concluded, that the spectral response of a vegetation canopy as seen by a remote sensor around the main chlorophyll a absorption region (675 nm) is predominantly driven by green biomass (green LAI), not chlorophyll per leaf area. This makes chlorophyll estimation of a crop stand over a vegetation period impossible, using the abovementioned spectral region.

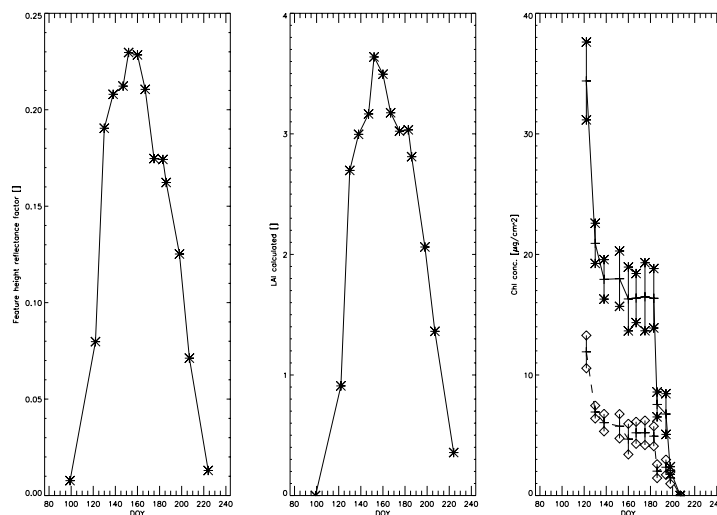


Figure 5: Absolute feature height of the 675 nm chlorophyll a absorption feature (left), calculated LAI from WDVl (middle) and chlorophyll a,b concentration including one standard deviation from mean for spring wheat over a cropping cycle (right, solid line: chl a, dashed line: chl b).

### 3.5 Application to HyMap Imaging Spectrometer Data

The algorithms used for retrieval of LAI, FAPAR and plant water content, as described in Chapter 2.2, were applied to an imaging spectrometer data set of HyMap using the derived parameters from the extensive ground truth data set. The two fields of spring wheat and winter barley were flown by HyMap on July 16<sup>th</sup>, one day prior to harvest of winter barley (DC 94, over-ripe) and covering the medium milk stage (DC 75) of spring wheat. The data was atmospherically corrected to get apparent reflectances, using ATCOR4 [19]. Figure 6 shows the spatial distribution of LAI, FAPAR and plant water content of spring wheat (left) and winter barley (right) during the overflight.

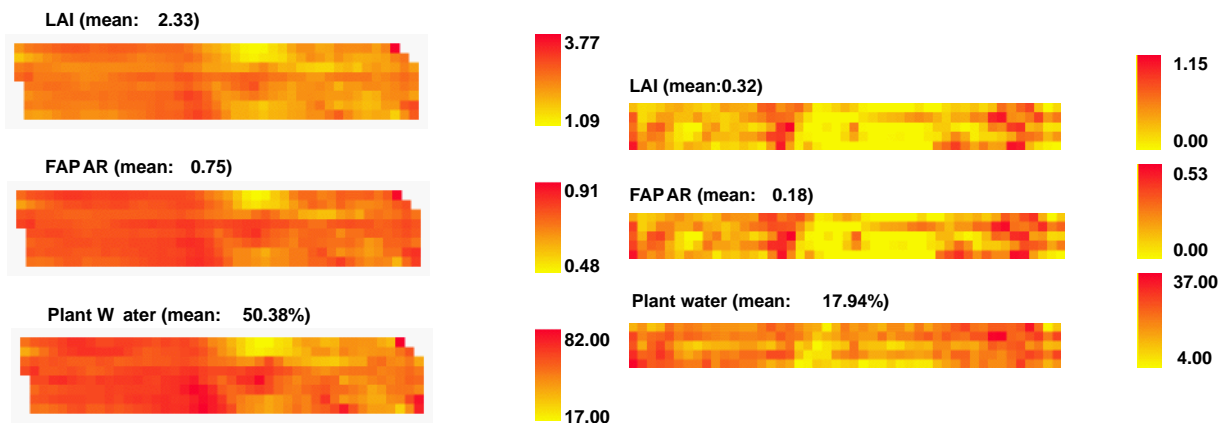


Figure 6: Determination of LAI, FAPAR and plant-water content from HyMap data for the spring wheat field (left) and the winter barley field (right), using the applied methods and derived parameters of the ground truth data acquired during the 1999 cropping cycle

Table 1 holds mean values of the retrieved vegetation parameters of the observed spring wheat and winter barley field as measured (July 17<sup>th</sup> 1999) and derived from HyMap data (July 16<sup>th</sup> 1999).

Table 1: Retrieved and measured values of LAI, FAPAR and plant water content of the observed spring wheat and winter barley field for the time of the HyMap overflight. (The field measurements were performed one day after the overflight.)

retrieved parameter	spring wheat HyMap July 16 <sup>th</sup> 1999	spring wheat measured July 17 <sup>th</sup> 1999	winter barley HyMap July 16 <sup>th</sup> 1999	winter barley measured July 17 <sup>th</sup> 1999
mean LAI [ ]	2.33	2.13	0.32	0.41
mean FAPAR [ ]	0.75	0.78	0.18	-
mean plant water [%]	50.38	59.04	17.94	20.36

As far as the suitability of the four observed parameters (LAI, FAPAR, water content and chlorophyll content) is concerned to track the phenological stages of winter barley and spring wheat, it can be concluded, that the estimation of LAI, FAPAR and plant water content from hyperspectral measurements is possible within the specified accuracies, whereas chlorophyll estimation was not successful due to canopy structural effects (LAI) present in the observed spectral region. The comprehensive collection of ground truth data during the 1999 field campaign bears the potential to relate retrieved LAI, FAPAR and water content values of spring wheat and winter barley from future hyperspectral data takes to specific, corresponding phenological stages.



## 4 References

- [1] Baret, F., Guyot, G.: "Potentials and Limits of Vegetation Indices for LAI and APAR Assessment", *RSE*, 35: 161-173, 1991
- [2] Blackburn, G. A.: "Spectral Indices for Estimating Photosynthetic Pigment Concentrations: A Test Using Senescent Tree Leaves", *Int. J. Remote Sens.*, 19 (4), pp: 657-675
- [3] Blackburn, G.A.: "Quantifying Chlorophylls and Carotenoids at Leaf and Canopy Scales: An Evaluation of some Hyperspectral Approaches", *RSE*, 66: 273:285, 1998
- [4] Chappelle, E. W., Moon, S. K., McMurtrey, J. E.: "Ratio Analysis of Reflectance Spectra (RARS): an Algorithm for the Remote Estimation of the Concentrations of Chlorophyll a, Chlorophyll b and Carotenoids in Soybean Leaves", *RSE*, 39: 239-247, 1992
- [5] Clevers, J. G. P. W.: "The Derivation of a Simplified Reflectance Model for the Estimation of Leaf Area Index", *RSE*, 25: 53-69, 1988
- [6] Clevers, J. G. P. W.: "The Application of a Weighted Infrared-Red Vegetation Index for Estimating Leaf Area Index by Correcting for Soil Moisture", *RSE*, 29: 25-37, 1989
- [7] Clevers, J. G. P. W.: "Application of the WDV I in estimating LAI at the Generative Stage of Barley", *ISPRS J. Photogramm. Remote Sensing*, 46: 37-47, 1991
- [8] Delta-T Device LTD: "Sunfleck Ceptometer User Manual", Decagon Devices Inc., Cambridge England, pp: 28, 1989
- [9] Filella, I., Peñuelas, J.: "The Red Edge Position and Shape as Indicators of Plants Chlorophyll Content, Biomass and Hydric Status", *Int. J. Remote Sens.*, 15 (7), pp: 1459-1470, 1994
- [10] Gates, D. M., Keegan, H. J., Schleter, J. C., and Weidner, V. R.: "Spectral Properties of Plants", *App. Optics*, Vol. 4, No. 1, pp: 11-20, 1965
- [11] Gausman, H. W.: "Plant Leaf Optical Properties in Visible and Near-Infrared Light", Graduate Studies No. 29, Texas Technical University, Lubbock, Texas, 1985
- [12] Gitelson, A. A., Merzlyak, M., N.: "Remote Estimation of Chlorophyll Content in Higher Plant Leaves", *Int. J. Remote Sens.*, 18 (12), pp: 2691-2697, 1997
- [13] Goward, S. N., Huemmerich, K. F.: "Vegetation canopy PAR absorbance and the normalized difference vegetation index: an assessment using the SAIL model", *RSE*, 39: 119-140, 1992
- [14] Horler, D. N. H., Dockray, M., and Barber, J.: "The Red Edge of Plant Leaf Reflectance", *Int. J. Remote Sens.*, 4 (2), pp: 273-288, 1983
- [15] Kolbe, W.: "Studies on the Course of Development of Cereals (1968-1984) in Relation to Sowing Time", *Pflanzenschutz-Nachrichten Bayer*, 37, pp: 337-423, 1984
- [16] Lange, B., GMBH: "Spektralphotometer CADAS 100, Bedienungsanleitung", Lange GMBH Berlin, pp: 59, 1990
- [17] Lichtenthaler, H. K.: "Chlorophylls and Carotenoids: Pigments of Photosynthetic Biomembranes", *Methods in Enzymology*, 48: 350:382, 1987
- [18] Licor Inc., "LI-3100 AreaMeter", <http://env.licor.com/products/li3100/3100spec.htm>, 2001
- [19] Richter, R.: "Atmospheric / Topographic Correction for Wide FOV Airborne Imagery: Model ATCOR4", DLR - German Aerospace Center, DLR-IB 552-05/00, Version 2.0, 2000
- [20] Rollin, E. M., Milton, E. J.: "Processing of High Spectral Resolution Reflectance Data for the Retrieval of Canopy Water Content Information", *RSE*, 65: 86-92, 1998
- [21] Russell, G.: "Barley Knowledge Base", Commission of the European Communities, Luxembourg, EUR 13040 EN, pp: 135, 1990
- [22] Russell, G., and Wilson, G. W.: "An Agro-Pedo-Climatological Knowledge-Base of Wheat in Europe", Commission of the European Communities, Luxembourg, EUR 15789 EN, pp: 160, 1994
- [23] Sinclair, T. R., Hoffer, R. M., and Schreiber, M. M.: "Reflectance and Internal Structure of Leaves from Several Crops During a Growing Season", *Agronomy Journal*, 63, pp: 864-867, 1971
- [24] Welles, J. M., and Norman, J. M.: "Instrument for Indirect Measurement of Canopy Architecture", *Agronomy Journal*, 83, No. 5: 818-825, 1991
- [25] Zadoks, J. C., Chang, T. T., Konzak, C. F.: "A Decimal Code for the Growth Stages of Cereals", *Weed Research*, 14: 415-421, 1974

# **Statusbericht über Stand und Planung der internationalen und nationalen Standards für Photogrammetrie und Fernerkundung WOLFGANG KRESSE<sup>1</sup> & REINER SCHWEBEL<sup>2</sup>**

*Abstract:*

*The standardization of photogrammetric and remote sensing data has been discussed in various standardization committees for about five years*

*In 1997 the Working group DIN/NABau 03.02 "Photogrammetrie und Fernerkundung" of the German Institute for Standardization" started to deal with a standardized exchange of photogrammetric data. In 1999 the ISPRS proposed a generic "Image transfer standard" (ITS) which has been prepared by the former working group II/7. Since the ISPRS congress in 2000 the working group II/4 titled "Image data standards" continues this work and keeps close contacts to developments of ISO und OGC. Within the International Organization for Standardization (ISO) the Technical Committee 211 (ISO/TC 211) is responsible for Geographic Information / Geomatics. As a part of the ISO/TC 211 the new ISO-project 19130 "Sensor and Data models for imagery and gridded data" has been approved in 2001. The outcome of this project will be an International Standard for photogrammetric and remote sensing sensors and their associated data models. The first meetings of the people of the ISPRS WG II/7 and the ISO 19130 project-team took place as a joint meeting in Berlin, Germany, June 18 and 19, 2001.*

*A second work item of the working group DIN/NABau 03.02 deals with the quality standards of photogrammetric and remote sensing products. The first completed standard is DIN 18740-1 part 1 "Photo flight and analogue aerial image". The second project to be completed soon is DIN 18940-3 "Orthophoto products". The third project deals with the digital aerial imagery.*

## **1 Einleitung**

Viele verbinden mit dem Begriff Normung etwas Statisches, vielleicht auch ein Hemmnis für eine ideenreiche und lebendige Weiterentwicklung. Wenn Normen geschrieben werden, hat sich eine neues Fachgebiet bereits entfaltet und geht in das Alltagsgeschäft über. Dann sind die Details oft nicht mehr so spannend. Aber genau dann, wenn der Alltag beginnt, sind Normen unabdingbar für den erfolgreichen und breiten Einsatz von neuen Verfahren. Genau dieses gilt auch für das Feld der raumbezogenen Geodaten und deren Teilgebiete Photogrammetrie und Fernerkundung. Hier besteht z.B. Bedarf an genormten Schnittstellen für Bilddaten.

In seltenen Fällen gibt es a priori nur eine Lösung für die Formulierung einer Norm. Der Regelfall sind mehrere sich zunächst ausschließende Ansätze, die oft in langwieriger Detailarbeit zu einem Kompromiss geführt werden müssen. Deshalb bleiben bei fertigen Normen manchmal ein paar Wünsche unerfüllt. Eine erfolgversprechende Strategie ist oft, vom Großen ins Kleinere zu arbeiten, und gegebenenfalls Details einer späteren Bearbeitung zu überlassen.

---

<sup>1</sup> 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

<sup>2</sup> Dr. Reiner Schwebel, Reuchlinstr. 32, 73431 Aalen, Tel., Fax 07361 / 31868, E-mail Reiner.Schwebel@t-online.de

Einen gewissen Sonderfall nehmen die Photogrammetrie und die Fernerkundung ein. Die Luftbildphotogrammetrie ist eine seit Jahrzehnten gewachsene Wissenschaft, die in der Praxis zum Teil so genannte "Industrienormen" entwickelt hat. Die heutige Normung im größeren Rahmen dient unter anderem dazu, das photogrammetrische Fachwissen einem größeren Kreis bekannt zu machen. Die Fernerkundung hat dagegen in den letzten Jahren viele neue Sensoren hervorgebracht. Das Ende der Entwicklung ist noch nicht absehbar. Die aktuelle Normungsarbeit schafft hier die Basis für eine umfassende Betrachtungsweise und für die integrierte Nutzung ganz unterschiedlicher Fernerkundungsdaten. Fernerkundungsnormung ist heute zum Teil noch Entwicklungsnormung.

## 2 ISO/TC211

Das Technical Committee 211 (ISO/TC 211) hat den Titel "Geographic Information / Geomatics" und ist für die internationale Normung auf dem Gebiet der Geoinformation zuständig. Das ISO/TC 211 wurde 1994 gegründet. Es gliedert sich in etwa 25 Einzelprojekte, aus denen in der Regel jeweils eine eigene ISO-Norm hervorgeht. Jedes Einzelprojekt gehört zu einer der fünf Arbeitsgruppen (Working Groups, WG). Ihre Titel lauten: "Rahmennorm und Referenzmodell" (WG 1, Framework and reference model), "Modelle und Regelwerke für raumbezogene Geodaten" (WG 2, Geospatial data models and operators), "Verwaltung raumbezogener Geodaten" (WG 3, Geospatial data administration), "Dienste für raumbezogene Geodaten" (WG 4, Geospatial services), "Profile, und (ähnliche) funktionale Normen" (WG 5, Profiles and functional standards). Alle Einzelnormen haben Nummern zwischen 19100 und 19199 und bilden daher die "19100-Familie".

Wichtige Einzelthemen des ISO/TC 211 sind die Aufstellung von Qualitätskriterien für Geodaten und die Festlegung der zugehörigen Evaluationsmethoden, die Normung der Koordinatenreferenzsysteme, der Aufbau von Vektor- und Raster-GIS, die Visualisierung, die Festlegung von Schnittstellen und Metadaten, die Normung der Terminologie und die Festlegung von Regeln für die Anwendung der Normen.

Viele der Normentwürfe werden im Jahr 2001 als Internationale Norm veröffentlicht. Daher steht eine Umstrukturierung und Neuorientierung des ISO/TC 211 an. Von den bisherigen Arbeitsgruppen wird nur die WG 4 (Geospatial services) bestehen bleiben. Im Oktober 2001 werden dem nächsten Plenum des ISO/TC 211 in Adelaide, Australien, die folgenden Arbeitsgruppen zur Neueinrichtung vorgeschlagen: "Bilddaten, Raster-GIS" (WG 1, Imagery), "Raumbezogene Dienste" (WG 2, Locational based services), "Kommunikation" (WG 3, communication), "Modelle und Verwaltung" (WG 5, Models and administration). Der Inhalt der neuen WG 1 wird wesentlich von den Sensor- und Datenmodellen der Photogrammetrie und der Fernerkundung bestimmt. Die neue WG 2 geht auf ein Projekt des OpenGIS Consortiums (OGC) zurück. Die neue WG 3 beschäftigt sich unter anderem mit der Vereinheitlichung von Berufsabschlüssen. In der WG 5 sind die Restarbeiten der künftig wegfallenden Arbeitsgruppen zusammengefasst.

Der Weg zu einer Internationalen Norm folgt einem strengen Zeit- und Abstimmungsreglement. Neue normungswürdige Themen werden als "Vorschlag für eine neues Normungsvorhaben" (New Work Item Proposal, NP) der internationalen Gemeinschaft der Normungsinstitute zur Abstimmung vorgelegt. Wenn mehr als fünf zustimmen, wird ein neues ISO-Projekt eingerichtet. Die Projektgruppe schreibt ihre Ideen und Vorschläge zur neuen Norm in einem Arbeitspapier (Working Draft, WD) nieder, das spätestens sechs

Monate nach der Bestätigung des ISO-Projektes dem Plenum des ISO/TC 211 zur ersten Kenntnisnahme vorlegt werden muss. An Hand des "Entwurfs der Projektgruppe" (Committee Draft, CD) können die Mitglieder des ISO/TC 211 Stellung nehmen. Dann wird der Normentwurf als "Entwurf für eine internationale Norm" (Draft International Standard, DIS) dem ISO-Zentralsekretariat in Genf übergeben, das schließlich die "Internationale Norm" (International Standard, IS) verkündet. Im kürzesten Fall vergehen zwei Jahre vom NP bis zum IS.

### **3 ISO-Normungsprojekte für Photogrammetrie und Fernerkundung**

#### **3.1 ISO-Projekt 19121 „Imagery and Gridded Data“**

Mit dem Projekt 19121 „Imagery and Gridded Data“ begann 1998 das ISO/TC 211, sich der Welt der Bilddaten und der Rastermodelle (Höhenmodelle) zuzuwenden. Aus der Projektarbeit ist ein technischer Bericht hervorgegangen, der in Form eines veröffentlichten ISO-Dokumentes eine Bestandsaufnahme der für die Normung näher zu betrachtenden Rasterdatenformate enthält. In der Rückschau ist die Auswahl der Formate allerdings stark von den im ISO/TC 211 aktiven Gruppen geprägt. Allen voran seien die USA, Kanada und die NATO genannt. Hinzu treten Großbritannien und die skandinavischen Staaten. Der Bericht (ISO/TECHNICAL REPORT, 2000) enthält 14 Formate, die bekannteren unter ihnen sind GeoTIFF, CEOS und HDF. Die meisten in Deutschland oder in der Photogrammetrie und Fernerkundung üblichen Rasterdatenformate erscheinen allerdings nicht. Die ISO erkannte an, dass die Entwicklung fach- und organisationsspezifischer Rasterdatenformate weit vorangeschritten ist und eine Vereinheitlichung oder gar Normung bestenfalls mittel- oder langfristig erreichbar sein würde.

#### **3.2 ISO-Projekt 19124 „Imagery and Gridded Data Components“**

Im Projekt 19124 „Imagery and gridded data components“ wurden die Inhalte des Projektes 19121 in detaillierterer Form weiterentwickelt. Dabei entstand vor allem eine Abgrenzung der weiteren Normungsarbeit. Den Schwerpunkt bildete der Aufbau von Datenmodellen und die Festlegung der zugehörigen Metadaten. Als weiteres Ergebnis der Arbeit entstanden viele englischsprachige Begriffsdefinitionen, die weitgehend mit dem üblichen Gebrauch der Fachbegriffe übereinstimmen.

Die ISPRS hatte kurz vor Beginn der Arbeiten des Projektes 19124 den Entwurf für ein allgemeingültiges Datenaustauschformat für Anwendungen in Photogrammetrie und Fernerkundung fertiggestellt und unter dem Namen „Image Transfer Standard“ ITS veröffentlicht. ITS passte ausgezeichnet zu den Konzepten der ISO und behielt bis heute einen wesentlichen Anteil an der Gestaltung der ISO-Norm.

Die Ergebnisse der Projektarbeit 19124 sind in einer so genannten „Review Summary“, einem ISO-internen Abschlussbericht, zusammengefasst (ISO REVIEW SUMMARY, 2001). Darin wird den photogrammetrischen und fernerkundlichen Sensoren ein besonderer Stellenwert eingeräumt und die Einrichtung eines neuen ISO-Projektes empfohlen, das sich mit den Spezifika der Sensoren und einer adäquaten Modellbildung beschäftigen soll, um daraus eine eigene ISO-Norm entstehen zu lassen. Bei allen übrigen Teilgebieten des Projektes 19124 hat man auf neue Normen verzichtet. Statt dessen sollen nur alle bisher

schon fertigen Normen des ISO/TC 211 um die Besonderheiten der Bild- und Rasterdaten ergänzt werden.

### **3.3 ISO-Projekt 19129 „Imagery, Gridded Data and Coverage Framework“**

Während der Bearbeitungszeit des Vorgängerprojektes 19124 wurde im ISO/TC 211 der Begriff “Coverage” als Oberbegriff für Bild- und Rasterdaten eingeführt. Daher wurde eine Änderung des Titels „Imagery and Gridded Data Components“ erforderlich. Nach ISO-Regularien ist die Änderung eines Projekttitels nicht möglich und kann nur indirekt durch Einrichtung eines neuen Projektes erreicht werden. In dem Projekt 19129 werden alle Themen behandelt, die nicht zu den Sensormodellen gehören, z.B. die Aufteilung einer Fläche oder eines Raumes in unterschiedlich große Rasterzellen.

### **3.4 ISO-Projekt 19130 „Sensor and Data Models for Imagery and Gridded Data“**

Das Projekt 19130 „Sensor and Data Models for Imagery and Gridded Data“ bietet die Chance für eine allgemeingültige, umfassende und weltweite Normung für photogrammetrische und fernerkundliche Datenformate.

#### **3.4.1 Sensormodell**

Ein Sensormodell ist die mathematische Beschreibung der geometrischen und radiometrischen Eigenschaften eines Sensors. Mit Hilfe des Sensormodells können aus den Original- oder Rohdaten diejenigen Richtungen im Raum rekonstruiert werden, aus denen der Sensor das betreffende Signal empfangen hat. Die Größen oder Parameter, mit denen ein Sensor quantitativ beschrieben wird, fallen in die Gruppe der Metadaten und werden weiter unten erläutert.

Bei der Festlegung der Sensortypen wurde eine weitestgehend generische Lösung angestrebt. Nach derzeitigem Stand werden sechs Sensortypen definiert:

- |   |  |
|---|--|
| 1. Rahmenkamera/<br>Flächenkamera                   | Analoge filmbasierte photogrammetrische<br>Reihenmesskamera und digitale Luftbildkamera mit<br>Flächensensor |
| 2. Swath/Pushbroom:                                 | Satelliten- und flugzeuggestützte Zeilenkamera mit quer<br>zur Flugrichtung stehenden Zeilen                 |
| 3. Synthetic Aperture Radar/<br>Interferometric SAR | Auf Distanzmessung mittels Radar basierendes<br>bilderzeugendes System.                                      |
| 4. Laserscanner:                                    | Auf Distanzmessung mittels Laser basierendes vor allem<br>oberflächenmodellerzeugendes System                |
| 5. Hydrographischer Sonar:                          | Auf Distanzmessung mittels Schall basierendes System zur<br>Oberflächenbestimmung des Meeresgrundes          |
| 6. Papier- und Filmscanner:                         | System zur analog-digital Wandlung von Karten- und<br>Filmvorlagen   |

Für die Aufnahme weiterer Sensortypen ist die Projektgruppe offen. Raumbezogene Videodaten und seismische Bildaufzeichnungssysteme sind bereits in der Diskussion.

### 3.4.2 Datenmodell

Die Datenmodelle bauen auf den Sensormodellen auf. Ein Datenmodell beschreibt die Menge und die Struktur derjenigen Metadaten, die zu einem Sensor und seinem Bezug zu einem Objektkoordinatensystem gehören. Für eine unzweifelhafte Anwendung dieser Metadaten werden die verschiedenen Transformationsalgorithmen der Verarbeitungskette zwischen Rohdaten und orthorektifiziertem Bild in die ISO-Norm aufgenommen. Im photogrammetrischen Standardfall werden die innere und die äußere Orientierung sowie die Kollinearitätsgleichungen oder eine äquivalente Beschreibung im Datenmodell erscheinen.

Im Rahmen der Normung wird angestrebt, möglichst viele, im Idealfall alle, für den Gebrauch des Sensors relevanten Parameter als Metadatenelemente festzulegen. Eine umfangreiche Liste von Metadaten für Rahmenkameras entstand aus einer Zusammenarbeit zwischen dem FGDC (Federal Geographic Data Committee) der USA und der ISPRS (FGDC, 2000).

Einen Teil des Datenmodells bilden die Modelle für die Georeferenzierung. Aus der Suche nach einer für Photogrammetrie und Fernerkundung gemeinsamen Lösung sind die folgenden drei Modelle hervorgegangen:

1. Strenge Lösung (rigorous solution): Die Lösung entspricht dem photogrammetrischen Regelfall und baut auf geradlinigen Bildstrahlen zwischen Objektpunkt, Projektionszentrum und Bildpunkt auf. Als Quellen für die Bestimmung der äußeren Orientierung werden Passpunkte (Punktnummer, X, Y, Z), GPS und INS genannt.
2. Näherungslösung (functional fitting): Diese Lösung ist von der Fernerkundung her bekannt und nutzt für die Orientierung nur identische Punkte, von denen Bildkoordinaten und 2D- oder teilweise auch 3D-Geländekoordinaten bekannt sind. Für die Zuordnung zwischen Bild und Gelände werden Polynommodelle, gebietsweise Polynommodelle oder auch Modelle mit gebrochen rationalen Funktionen eingesetzt.
3. Passpunkte: Auf besonderen Wunsch einzelner Projektgruppenmitglieder wurden die „Passpunkte“ als Methode zur Georeferenzierung aufgenommen. Es handelt sich hierbei eigentlich um eine Variante des Modells "Näherungslösung", bei der nicht die Polynomkoeffizienten, sondern die „Beobachtungen“ übergeben werden. Die Beobachtungen sind hier die Passpunktkoordinaten und die zugehörigen Bildpunktkoordinaten (X, Y, Z, x', y').

Zu den Projektzielen gehört nicht die Normung der Schnittstellen (Encoding) und der graphischen Darstellung (Portrayal). Ersteres bedeutet, dass die heute verbreitete Nutzung der Extensible-Markup-Language XML zur Beschreibung und Programmierung von Schnittstellen eher der Anwendungsebene überlassen bleibt. Das hat den Vorteil, dass die ISO-Norm unabhängig von der Weiterentwicklung von XML bleibt.

### 3.4.3 Koordinatensysteme

Für eine eindeutige Formulierung der Transformationsgleichungen müssen auch die beteiligten Koordinatensysteme in die Norm aufgenommen werden. Bei der Systemauswahl hat man sich von den üblichen Transformationsschritten zwischen Scannen und

Orthophotoherstellung leiten lassen. Bei fernerkundlichen Anwendungen tritt meistens noch ein an die Plattform gebundenes Koordinatensystem hinzu.

Die Normungsarbeiten des Projektes 19130 schließen an die fast fertige Norm ISO 19111 „Raumbezogene Referenzierung nach Koordinaten“ (Spatial referencing by coordinates) an. Das Projekt 19111 hat das Stadium „Final Draft International Standard“ (FDIS, 07/2001) erreicht und legt ein konzeptionelles Schema für die Festlegung von 1-, 2- und 3-dimensionalen Koordinatenreferenzsystemen fest. Der Koordinatenübergang zwischen unterschiedlichen Systemen ist ebenfalls beschrieben.

Nach diesen Überlegungen sind im Projekt 19130 die folgenden Koordinatensysteme vorgesehen:

- Scanner- oder Tischkoordinatensystem
- Sensor-, Bild- oder Papierkoordinatensystem
- Modellkoordinatensystem
- Plattformkoordinatensystem
- Erdfestes Koordinatensystem

### **3.4.4 Levels**

Aus der Fernerkundung ist der Begriff „Level“ zur Beschreibung unterschiedlicher Verarbeitungszustände von Bilddaten bekannt. Meistens weist Level 0 auf Rohdaten hin, die die unveränderte Aufzeichnung des Sensors darstellen. Oft sind diese Daten gar nicht als Bild interpretierbar, so z.B. beim Radar. Höhere Level-Nummern, üblicherweise bis drei oder vier, bezeichnen geometrisch und/oder radiometrisch veränderte Daten zur Herstellung einer bestimmten Produktqualität. Die höchste Stufe ist meist die georeferenzierte Satellitenszene oder im Fall von großmaßstäbigen Anwendungen auch das Orthophoto.

Eine Normung der Level-Bezeichnungen wird als wünschenswert angesehen. Im Laufe der Jahre haben die meisten Systembetreiber aber eigene im Detail stark voneinander abweichende Definitionen in Gebrauch gebracht. Seitens der ISO wird behutsam eine Vereinheitlichung angestrebt. Im Gespräch ist ein „zweidimensionaler“ Ansatz mit zweistelligen Level-Nummern. Die eine Stelle wird dann für die geometrische und die andere Stelle für die radiometrische Verarbeitung vergeben werden.

Normungsarbeit wird oft als langwieriger Prozess angesehen. Die Projektgruppe des ISO-Projektes 19130 ist zur Zeit noch bemüht, diesem Vorurteil nicht gerecht zu werden. Man kann einerseits auf die bis zu siebenjährigen Erfahrungen bei den anderen „Geoinformationsnormen“ der Normenfamilie 19100 aufbauen. Zum anderen sind bei allen Beteiligten die Ressourcen begrenzt. Daher ist im Beschluss 171 des ISO/TC 211 als Zieltermin September 2002 für die Verabschiedung des Projektes 19130 als Internationale Norm vorgesehen. Ein etwas späterer Termin ist aber wahrscheinlich.

## **4 Normung in der ISPRS**

Die Internationale Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung (ISPRS) besitzt innerhalb des ISO/TC 211 den Status eines Liaison-Members. Das bedeutet, dass die ISPRS

gleich einer Nation an allen Sitzungen teilnehmen darf, aber nur beschränkt stimmberechtigt ist. Das bedeutet auch, dass Fachleute im Auftrag der ISPRS aktiv an der Gestaltung der Internationalen Normen mitwirken dürfen.

## **4.1 Die frühere ISPRS WG II/7**

Die ISPRS wandte sich 1996 nach dem Kongress in Wien erstmals der Normung von fachbezogenen Datenformaten zu. In der Arbeitsgruppe II/7 mit dem Titel „Praxis- und Implementierungsfragen in der digitalen Kartenherstellung“ (Practical and Implementation Issues in Digital Mapping) wurden erste Kontakte zwischen Systemherstellern und Anwendern geknüpft, um den Aufwand für die Entwicklung systemübergreifender und anwendungsfreundlicher Datenformate für Photogrammetrie und Fernerkundung auszuloten. Seitens der Systemhersteller war die Neigung begrenzt, in Austauschformate zu Fremdsystemen zu investieren. Auf der Anwenderseite fehlten meist das notwendige Wissen über die Interna der Systemsoftware und vor allem die finanziellen Ressourcen.

Dennoch war es einer kleinen Entwicklungsgruppe innerhalb der WG II/7 gelungen, einen Rahmen für Datenformatstandards in Photogrammetrie und Fernerkundung festzulegen, der sich im wesentlichen heute im ISO-Projekt 19130 in der Gliederung der Sensortypen und der Datenmodelle wiederfindet (KRESSE, 2000).

Zum Abschluss der Arbeit der WG II/7 wurden zwei interessante Ansätze zur Normung photogrammetrischer Daten vorgestellt. Beide Ansätze waren als Pilotsoftware auf dem Kongress in Amsterdam vorführbereit. Der eine Ansatz baute auf einer XML-basierten Beschreibung der Orientierungsdaten auf. Die Stereoplottersoftware war als Plug-In für einen Standardbrowser ausgelegt. Die Bildtrennung wurde mit dem Anaglyphenverfahren realisiert. Der andere Ansatz enthielt Stereoplottersoftware, Bilddaten und Metadaten, modellweise sortiert in einer Art zip-File zur Selbstinstallation. Vorteilhaft war bei diesem Ansatz die sichere Verknüpfung zwischen den Bild- und Orientierungsdaten, die Dateiverwechslungen bei großen Projekten ausschließt.

Eine XML-Formulierung der photogrammetrischen Orientierungsdaten hat kürzlich eine gemeinsame Initiative von ZI-Imaging und PCI unter dem Namen DPML (Digital Photogrammetry Markup Language) veröffentlicht (FELLAH, 2001).

## **4.2 ISPRS WG II/4**

Nach der Neuordnung der Kommission II beim Kongress in Amsterdam 2000 werden die Arbeiten der WG II/7 in der WG II/4 mit dem Titel „Normung von Bilddaten“ (Image data standards) fortgesetzt (ISPRS/WG II/4, 2000). Der Titel ist recht weit gefasst, so dass die Bemühungen der Arbeitsgruppe nur einem Teil des Anspruchs gerecht werden können. Um die Belange von Photogrammetrie und Fernerkundung wird man sich in jedem Fall kümmern. Fraglich sind aber zum Beispiel hydrographische Daten. Medizinische Bilddaten gehören sicher nicht dazu.

Für die WG II/4 wurden die folgenden Grundsätze für die Arbeit bestätigt (Terms of Reference):

- Analyse der Anforderungen für die Normung von Austauschformaten für Bilddaten
- Charakterisierung eines universellen Sensormodells



- Entwicklung eines Metadatenstandards, der alle notwendigen Sensorparameter für die Datenaufnahme und für die Datennutzung enthält
- Zusammenarbeit mit ISO/TC 211 und OGC in Fragen der Normung von Bilddaten

Ein erstes inoffizielles Treffen der WG II/4 fand am Rande der Intergeo im Oktober 2000 in Berlin statt. Bereits damals zeichnete sich ein deutlich gestiegenes Interesse der Systemhersteller an genormten Datenformaten ab.

Die erste offizielle Sitzung fand wieder in Berlin statt, und zwar zusammen mit der ISO-Projektgruppe 19130 im Juni 2001. Bei dieser Sitzung wurden die ISPRS-Teilnehmer mit der Arbeitsweise der ISO vertraut gemacht, ebenso wie die ISO-Projektmitglieder mit der Struktur der ISPRS. Aufgrund der idealen gegenseitigen Ergänzung der beiden Gruppen ist eine weitere Kooperation zu erwarten. Das Arbeitstempo dürfte von der ISO bestimmt werden. Mehrere ISPRS-Mitglieder bekundeten ihr Interesse an einer verstärkten Mitarbeit, damit die von ihnen künftig betriebene Software normgerecht gestaltet werden kann.

## **5 Photogrammetrie und Fernerkundung beim OGC**

Auch das Open GIS Consortium (OGC) sieht die Entwicklung von Standards für Photogrammetrie und Fernerkundung als eine seiner Aufgaben an. Unter dem Titel "Services für die Bildauswertung" (Image Exploitation Services) widmet sich eine kleine Arbeitsgruppe (Special Interest Group) dem Thema. Der Kurzname der Gruppe lautet IES SIG.

Die Entwürfe der IES SIG gaben der früheren ISPRS WG II/7 viele interessante Anregungen. Auf die IES SIG lassen sich die grundlegenden Sensormodelle Rahmenkamera (frame), Zeilenkamera (Pushbroom) und SAR (Synthetic Aperture Radar) zurückführen (WHITESIDE, 1998). Die Modelle für die Georeferenzierung waren allerdings stark von den fernerkundlichen und militärischen Erfahrungen wichtiger Mitglieder der IES SIG geprägt. Deshalb waren in dem Entwurf der IES SIG nur vier Varianten des Polynommodells und nicht die in der Photogrammetrie übliche strenge Lösung vorgesehen.

Die neueren Vorschläge der IES SIG modellieren in ausführlicher Weise viele Varianten der photogrammetrischen Standardfälle und Koordinatentransformationen (WHITESIDE, 1999(1), 1999(2)). Die wesentlichen Ideen daraus sind in den Arbeiten der ISO berücksichtigt.

## **6 Qualitätssicherung für photogrammetrische Produkte beim DIN Deutsches Institut für Normung e.V.**

Ein Arbeitsschwerpunkt des DIN-Arbeitsausschusses 03.02 „Photogrammetrie und Fernerkundung“ ist die Qualitätssicherung photogrammetrischer Produkte. Ziel ist es, für die wichtigsten photogrammetrischen Kernprodukte Qualitätsstandards zu erstellen, mit deren Hilfe die Produkt- und Projektparameter festgelegt und die Produktqualität sichergestellt werden soll. Als photogrammetrische Kernprodukte gelten hier analoge und digitale Luftbilder sowie digitale Orthophotos. Für andere photogrammetrisch erzeugte Produkte, wie z. B. digitale Höhenmodelle, oder GIS-Datenbestände werden die Qualitätsanforderungen

primär von der Anwendung her bestimmt. Die qualitätsorientierte Arbeit des DIN-Arbeitsausschusses läuft zur Zeit auf der nationalen Ebene, die Einbringung der Ergebnisse in das internationale Normenwerk ist vorgesehen.

## 6.1 Grundsätze der Qualitätssicherung

Qualitätssicherung ist nach DIN EN ISO 9000 „*Teil des Qualitätsmanagements, der auf das Erzeugen von Vertrauen darauf gerichtet ist, dass Qualitätsanforderungen erfüllt werden*“. Die Qualitätsanforderungen betreffen produzierende Systeme, Verfahren und Endprodukte. Die Qualitätsanforderungen werden in der Regel in einem Dokument festgelegt, hier in der Form von DIN-Normen.

Die Qualitätssicherung ist eine zentrale Aufgabe der Normung. Das Konzept der vorliegenden Normenfamilie,

- die grundsätzlichen Anforderungen in einem Block und
  - die produkt- und projektspezifischen Parameter in einem zweiten Block
- zusammenzufassen, bietet dem Anwender ein umfassendes und flexibles Werkzeug zur Qualitätssicherung.

Qualitätsnormen können und sollen Bestandteile des Vertragswerkes zwischen Auftraggebern und Auftragnehmern sein. Die Norm kann auch als Richtlinie für die internen Abläufe und Produktanforderungen innerhalb einer Organisation dienen. Nicht einbezogen in die Normen sind wirtschaftliche und juristische Aspekte wie z.B. Preise, Lieferzeiten oder Garantieleistungen. Die Verifizierung der Qualitätsanforderungen muss nach dem Stand der Technik möglich sein.

## 6.2 Normenfamilie für photogrammetrische Produkte

### 6.2.1 Bildflug und analoge Luftbilder

Die Norm DIN 18740-1 *Photogrammetrische Produkte – Teil 1: Anforderungen an Bildflug und analoges Luftbild* (DIN, 2001) betrifft das Instrumentarium (Luftbildkamera, System für Positionsbestimmung), Prozesse (Aufnahme, Filmentwicklung), Produkte (Filme und daraus abgeleitete Produkte, Hilfsdaten) und die Dokumentation. Einzelheiten hierzu sind in SCHWEBEL (2001) beschrieben.

Der Abschnitt *Allgemeine Anforderungen* enthält alle Anforderungen, die grundsätzlich bei Bildflug, Luftbild und Bildflugdaten zu erfüllen sind. Die produkt- und projektspezifischen Parameter sind in dem Formblatt *Spezifikation für photogrammetrische Bildflüge* zusammengefasst. Die Vervielfältigung des Formblattes ist gestattet. Die Norm will keinen standardisierten Einheitsflug erzwingen, sondern es ermöglichen, alle zwischen Auftraggeber und Auftragnehmer relevanten Punkte anzusprechen und zu sinnvollen Auftragsvergaben zu kommen.

### 6.2.2 Digitales Luftbild

Eine Qualitätsnorm für digitale Luftbilder ist zur Zeit in der Konzeptionsphase. Die grundsätzliche Frage, ob für analoge und digitale Luftbilder eine gemeinsame Norm erstellt werden sollte, wurde nach eingehender Diskussion im Arbeitsausschuss negativ beantwortet:

- Photographische und digitale Aufnahmen sind technologisch sehr unterschiedlich
- die digitale Technik ist noch voll in Entwicklung und
- Projekte auf photographischer und digitaler Basis werden getrennt ausgeschrieben und durchgeführt.

Die geplante Norm wird für digitale Bilder gelten, die aus photographischen Bildern abgeleitet oder direkt mit digitalen Luftbildkameras aufgenommen sind. Somit werden die A/D-Wandlung mit Präzisionsscannern, digitale Luftbildkameras und Bildflug mit digitalen Kameras mit einbezogen sein, soweit dies für die Produktqualität relevant ist.

### 6.2.3 Digitales Orthophoto

Das Normvorhaben DIN 18740-3 *Photogrammetrische Produkte – Teil 3: Anforderungen an Orthophotoprodukte* liegt in Kürze als Norm-Entwurf vor. Tabelle 1 gibt eine Übersicht über den Inhalt der Norm.

Vorwort
1 Anwendungsbereich
2 Normative Verweisungen
3 Begriffe
3.1 Photogrammetrie, Topographie
3.2 Qualitätssicherung
4 Allgemeine Anforderungen
4.1 Grundlegende Qualitätsparameter
4.2 Analoges Messbild
4.3 Digitales Messbild
4.4 Digitales Höhenmodell
4.5 Digitales Orthophoto
4.6 Digitales Orthophotomosaik
4.7 Digitale Orthophotokarte
4.8 Speicherung und Ausgabe von Orthophotoprodukten
5 Prüfung von Orthophotoprodukten
5.1 Prüfung von digitalen Orthophotoprodukten
5.2 Prüfung von analogen Orthophotoprodukten
6 Besondere Anforderungen
Anhang A (normativ) Spezifikation für Orthophotoprodukte
Anhang B (informativ) Beispiel für Spezifikation von Orthophotoprodukten
Anhang C (informativ) Beispiel eines Prüfberichtes für Orthophotoprodukte
Stichwortverzeichnis

Tabelle 1: Inhalt des Norm-Entwurfes DIN 18740-1

Die Norm gilt für Luftbilder, die digitalisiert oder originär digital aufgenommen sind. Im Abschnitt *Allgemeine Anforderungen* werden die Qualitätsanforderungen an Eingabedaten, Prozessverarbeitung und Endprodukte festgelegt, ausgehend von den grundlegenden Parametern „Größe der Bodenpixel“ und geforderte „Standardabweichung des Orthophotos“. Die Projekt- und Produktparameter werden ebenfalls in einem Formblatt (Anhang A) festgelegt. Die Qualitätsanforderungen werden in Abschnitt *Prüfung von Orthophotoprodukten* verifiziert, ein Beispiel eines Prüfberichtes ist beigefügt.

## 6.3 Praktische Handhabung

Das flexibel angelegte Konzept erlaubt es, die Normen in verschiedener Art und Weise zu nutzen:

- Die einfachste und beste Art der Nutzung ist die Formel „Produkt nach DIN 18740-...“. Somit gelten sämtliche allgemeinen Anforderungen und die im Formblatt spezifizierten Parameter. Die Parameter können dem Projekt angepasst werden.
- Bei einer Teilnutzung der Norm können in einem Projekt einzelne Passagen ausgeklammert oder nur einzelne Passagen herangezogen werden.

Wenn wir dem Ziel der Normungsarbeit – Standardisierung und Qualitätssicherung – gerecht werden und die wirtschaftlichen Vorteile wahrnehmen wollen, ist eine möglichst umfassende Nutzung der Norm angeraten. Da in vielen Fällen schon Prozeduren und Regelungen zwischen den Partnern bestehen, kann auch eine Teilumsetzung der Norm gerechtfertigt sein.

## 7 Schluss

Wie sich die neuen Normen im Einzelnen auswirken werden, kann man nur vermuten. Auf Grund der vielfältigen neuen Möglichkeiten der digitalen Photogrammetrie und den damit verbundenen spezialisierten Teilsystemen sowie auf Grund der interessanten neuen Sensoren für groß- und mittelmaßstäbige Anwendungen besteht ein akuter Bedarf an der Normung der Sensormodelle, der Transformationen, der Metadaten und möglichst auch der Datenaustauschformate. Die Firmen werden bestrebt sein, ihre Daten normgerecht anzubieten. Für die Datenaustauschformate werden einstweilen noch Industriestandards, z.B. XML-Formulierungen, vorherrschen. Für eine ISO-Norm ist diese Ebene bislang noch zu kurzlebig. Die im Teil 6 vorgestellten deutschen Normen werden den Photogrammetriemarkt transparenter machen und das hohe Qualitätsniveau der photogrammetrischen Produkte garantieren helfen.

## 8 Literaturverzeichnis

- BARTELME, N. (2000): Geoinformatik, – 3. Aufl., (Springer)
- FELLAH, S. (2001): Digital Photogrammetry Markup Language (DPML), – PowerPoint Presentation, ASPRS-Convention, St. Louis (2001-04)
- KRESSE, W. (2000): Status report on Image Transfer Standard (ITS), – Proceedings XIX<sup>th</sup> ISPRS Congress Amsterdam
- SCHWEBEL, R. (2001): Qualitätssicherung für Bildflug und analoges Luftbild durch neue DIN-Norm. – PFG 1/2001
- WHITESIDE, A. (1998): The OpenGIS Specification Model, Topic 7: The Earth Imagery Case, Version 3, OpenGIS Project Document Number 98-107, Wayland
- WHITESIDE, A. (1999): OpenGIS Specification Model, Topic 15: Image Exploitation Services, OpenGIS Project Document Number 99-115r2, Wayland
- WHITESIDE, A. (1999): OpenGIS Abstract Specification, Topic 16: Image Coordinate Transformation Services, Version 4, OpenGIS Project Document Number 99-116r2, Wayland

- DIN (1995): DIN 18716-1 (1995-11), Photogrammetrie und Fernerkundung – Teil 1, Grundbegriffe und besondere Begriffe der photogrammetrischen Aufnahme. - Beuth-Verlag, Berlin
- DIN (1996): DIN 18716-2 (1996-07), Photogrammetrie und Fernerkundung – Teil 2: Besondere Begriffe der photogrammetrischen Auswertung. - Beuth-Verlag, Berlin
- DIN (1997): DIN 18716-3 (1997-07), Photogrammetrie und Fernerkundung – Teil 3 Begriffe der Fernerkundung. - Beuth-Verlag, Berlin
- DIN (2001): DIN 18740-1, Photogrammetrische Produkte – Teil 1: Anforderungen an Bildflug und analoges Luftbild
- FGDC (2000): Content Standard for Digital Geospatial Metadata: Extensions for Remote Sensing Metadata (Public Review Draft), December 21, 2000, [http://www.fgdc.gov/standards/status/csdgm\\_rs\\_ex.html#public](http://www.fgdc.gov/standards/status/csdgm_rs_ex.html#public), Datei: Extensions\_PublicReviewDraft.doc
- ISO/REVIEW SUMMARY (2001): Review Summary for Stage 0 Project 19124 Imagery and Gridded Data Components, <http://www.statkart.no/isotc211/>, Oslo (ISO/TC 211 secretariat)
- ISO/TECHNICAL REPORT (2000). Technical Report 19121:2000 Geographic Information – Imagery and Gridded Data, <http://www.statkart.no/isotc211/>, Oslo (ISO/TC 211 secretariat)
- ISPRS/WG II/4 (2000): "Image Data Standards", <http://www.commission2.isprs.org/wg4>

# Blockgletscher-Monitoring mittels Digitalphotogrammetrie

RICHARD LADSTÄDTER<sup>1</sup>

*Zusammenfassung:*

*Zur Erfassung geomorphodynamischer Prozesse, wie z.B. von Hangrutschungen und Fließbewegungen von Blockgletschern, werden häufig Fernerkundungsmethoden eingesetzt. Das Monitoring solcher, meist langsamer Veränderungen der Geländeoberfläche kann z.B. durch jährliche Luftbildaufnahmen dokumentiert werden. Die automatisierte, digitale Verarbeitung solcher multitemporalen Stereomeßbilder erlaubt die exakte Vermessung der stattgefundenen Bewegungen in Form eines dichten 3D-Vektorfeldes und stellt eine deutliche Erleichterung im Vergleich zur sehr zeitaufwendigen manuellen (analytischen) Auswertung dar. Ein Prototyp für ein solches digitalphotogrammetrisches Monitoringsystem wurde an der TU Graz entwickelt. Die damit durchgeführten Auswertungen der beiden Blockgletscher im Hohebenkar (Ötztal, Tirol) zeigen das hohe Potential dieser Methode. Dieser Beitrag beschreibt das bestehende System ADVm sowie aktuelle und geplante Weiterentwicklungen.*

## 1 Einleitung

Bei der Erfassung geomorphodynamischer Prozesse gibt es zwei grundsätzlich getrennte Aufgabenstellungen: (a) Auffinden von sich verändernden Gebieten (Change Detection) und (b) Monitoring bekannter Bewegungszonen. In diesem Beitrag steht die genaue Quantifizierung von Bewegungen in einem vorgegebenen Gebiet im Vordergrund (Fall b), wobei speziell auf das Monitoring von Blockgletschern mit Hilfe von multitemporalen Luftbildserien eingegangen wird. Zunächst werden die Vorteile, sich sich beim Einsatz von automatisierten, digitalen Methoden ergeben kurz erläutert. Dann werden einige grundlegende Konzepte und Methoden des bestehenden Systems ADVm sowie dessen mögliche Erweiterungen vorgestellt. Abschließend wird ein Ergebnis aus einer Auswertung des Blockgletschers Hohebenkar präsentiert.

### 1.1 Blockgletscher- Monitoring

Blockgletscher (Blg.) sind ein im Hochgebirge auftretendes Phänomen des diskontinuierlichen Permafrosts (BARSCH, 1996). Im Gegensatz zu (Eis-)Gletschern handelt es sich dabei um ein Gemenge aus Blockschutt, feinerem Geröll und Eis. Aufgrund der Schwerkraft treten langsame Kriechbewegungen auf, die an der Oberfläche Geschwindigkeiten von wenigen Zentimetern bis Meter pro Jahr erreichen.

Am Institut für Angewandte Geodäsie der TU Graz wurde bereits 1995 ein Monitoringprogramm für den Dösener Blg. (Nationalpark Hohe Tauern, Kärnten) gestartet. Durch

---

<sup>1</sup> Dipl. Ing. Richard Ladstädter, Institut für Angewandte Geodäsie, Abteilung für Photogrammetrie und Fernerkundung, Technische Universität Graz, Steyrerg. 30/1, 8010 Graz, e-mail: richard.ladstaedter@tugraz.at

die Lage in 2500 Meter Höhe und den unwegsamen Blockschutt sind die jährlichen Wiederholungsmessungen mit großem Aufwand verbunden.

Parallel zu diesen geodätischen Messungen wurden von V. Kaufmann, Mitarbeiter am Institut, Luftbilder der Jahre 1954, 1975 und 1993 am analytischen Plotter DSR-1 von Kern ausgewertet (KAUFMANN, 1998). Einige hundert idente Punkte mußten in diesen drei Epochen identifiziert und manuell eingemessen werden. Der große Zeitbedarf solcher Auswertungen ließ den Bedarf an einem automatischen, digitalen Meßsystem entstehen.

## **1.2 Einsatz von Digitalphotogrammetrie für das Monitoring**

Grundsätzlich gelten für den Einsatz von digitalen Methoden die gleichen Voraussetzungen wie bei der analytischen Auswertung: Die Geländeoberfläche muß genügend Struktur enthalten, um markante Punkte zu finden und es dürfen keine zu großen (unstetigen) Veränderungen zwischen zwei Beobachtungsepochen auftreten. Wie bei der analytischen Auswertung treten Probleme auf, wenn das Bildmaterial der einzelnen Epochen sehr inhomogen ist, d.h. wenn z.B. große Maßstabsunterschiede, Verkantungen oder verschiedene Film- und Kamertypen vorliegen. In Problemzonen (Schlagschatten, Gebiete mit wenig Textur) ist ein geschulter Operateur einem automatischen Meßsystem aufgrund seiner Erfahrung und der Fähigkeit zur Interpretation meist überlegen, ansonsten kann bei der digitalen Messung von einer vergleichbaren Genauigkeit und Fehlerquote ausgegangen werden.

Der größte Vorteil der Digitalphotogrammetrie liegt aber in der Automatisierung des Meßvorgangs, wodurch in wesentlich kürzerer Zeit eine ungleich höhere Anzahl von Einzelpunkten gemessen werden kann. Das resultierende dichtere Vektorfeld erlaubt eine bessere Modellierung des dynamischen Verhaltens von Blockgletschern.

## **1.3 ADVM: Ein Prototyp für ein automatisches Meßsystem**

Das System ADVM (Automatic Displacement Vector Measurement) wurde 1999 im Rahmen einer Diplomarbeit an der TU Graz entworfen und implementiert (LADSTÄDTER, 1999). Es ermöglicht die Verarbeitung von beliebig vielen Stereobildern pro Epoche und liefert für jede Epoche ein digitales Geländemodell (DGM) sowie die dreidimensionalen Bewegungsvektoren zwischen diesen Epochen. Als Eingangsdaten werden Pseudo-Orthophotos (Definition s. Abschnitt 2.1), die Parameter der äußeren Orientierung der Luftbilder, die Grenzen des auszuwertenden Projektgebietes und eine Klassifizierung des Gebietes in zumindest zwei Klassen (unbewegt, bewegt) benötigt. ADVM wurde in dieser Form für eine Reihe von Auswertungen (Dösener Bgl., Gößnitzkees (schuttbedeckter Gletscher) und Hochebenkar Bgl.) eingesetzt. Ein vergleichbares System, allerdings ohne exakte Rekonstruktion, wird in KÄÄB (2000) beschrieben.

# **2 Grundlegende Konzepte und Methoden**

## **2.1 Verwendung von Pseudo-Orthophotos**

Pseudo-Orthophotos (POP's) stellen ein wichtiges Konzept innerhalb des Systems ADVM dar. Zu einem Luftbild erhält man das entsprechende POP, indem man es innerhalb des Projektgebietes mit einem genäherten (grobem) DGM entzerrt. Durch die Abweichungen zum wahren DGM entstehen im POP radiale Restverzerrungen, die aber im Vergleich zu den perspektiven Verzerrungen im Originalbild (Hochgebirge!) gering sind. Mit Hilfe der POP's wird eine Abbildung der Luftbilder aller Epochen in eine einheitliche Bildgeometrie erreicht,

wodurch die in Abschnitt 1.2 erwähnten Probleme größtenteils gelöst sind. Ein weiterer Vorteil von POP's ist die deutliche Reduktion der Bilddatenmenge im Vergleich zum gescannten Luftbild<sup>2</sup>, die eine deutliche Erleichterung bei der Bildverarbeitung am PC darstellt. Ein Nachteil von POP's ist die Notwendigkeit ein grobes DGM zur Verfügung zu haben<sup>3</sup>. Außerdem muß deren spezielle Geometrie bei der Rekonstruktion bzw. bei der Verwendung von geometrischen Bedingungen (vgl. Abschnitt 2.4.1) berücksichtigt werden.

## 2.2 Systemkomponenten

### 2.2.1 Interestpunktsuche

Jeweils ein Bild pro Epoche wird als Referenzbild gewählt, in denen mit Hilfe des Moduls INTEREST eine automatische Selektion von Interestpunkten durchgeführt wird. Es wird dabei der Interestoperator von Förstner verwendet (FÖRSTNER & GÜLCH, 1987), der gut definierte Punkte (z.B. Eckpunkte) findet. Es werden zwei Interestbilder  $Q$  und  $W$  abgeleitet, die jeweils die Isotropie bzw. Stärke der Grauwertgradienten des betrachteten Pixels angeben. Das  $W$ -Bild stellt dabei eine Art Texturanalyse dar und kann in modifizierter Form als „Textur-Map“ auch zur Steuerung der Fenstergröße beim Matching herangezogen werden<sup>4</sup>. Als Ergebnis des INTEREST-Moduls erhält man eine große Anzahl (~10.000-100.000 Pkte) an unregelmäßig verteilten Interestpunkten, die mit Subpixelgenauigkeit positioniert sind. Mit Hilfe eines Klassifizierungsbildes<sup>5</sup> wird zusätzlich jedem Punkt eine bestimmte Klasse in Form eines Punktcodes zugeteilt (z.B. Festpunkt, bewegter Punkt am Blg.).

### 2.2.2 Prädiktion von Näherungswerten

Für die Beschaffung von Näherungspositionen für das spätere Matching werden für Punkte, die im POP auf einem regelmäßigen Raster liegen,  $x$ - und  $y$ - Disparitäten gemessen. Dazu kann die normalisierte Kreuzkorrelation (NKK) verwendet werden, da in den POP's keine größeren Maßstabsunterschiede oder Verkantungen mehr zu erwarten sind. Die Größe des Suchbereichs richtet sich nach dem maximal zu erwartenden Höhenfehler des groben DGM (bei der Korrelation von POP's einer gemeinsamen Epoche) bzw. nach der max. Fließgeschwindigkeit zwischen zwei Epochen<sup>6</sup>. Die Größe des NKK- Fensters kann fest vorgegeben oder über die Textur-Map gesteuert werden. Die mit Pixelgenauigkeit erhaltenen Disparitäten werden als Grauwerte codiert in Disparity-Maps gespeichert.

### 2.2.3 Digitale Punktübertragung (Stereo-Matching)

Die digitale Punktübertragung der Interestpunkte von den Referenzbildern in die Stereopartner erfolgt mittels Least-Squares-Matching (LSM) (ACKERMANN, 1984) im Modul PTRANSFER. Die Näherungsposition wird in der entsprechenden Disparity-Map interpoliert. Die Größe des LSM-Fensters kann wiederum adaptiv über die Textur-Map gesteuert werden. Das Modul PTRANSFER liefert homologe (bzw. idente) Punktpositionen mit Subpixelgenauigkeit.

---

<sup>2</sup> Reduktionsfaktor typischerweise 50-100.

<sup>3</sup> Bei iterativer Anwendung reicht als erste Näherung meist eine mittlere Projekthöhe.

<sup>4</sup> Bei schlechter Textur wird das Fenster vergrößert, bei guter Textur kann es verkleinert werden.

<sup>5</sup> Z.B. aus geologischer Karte oder durch Luftbildinterpretation abgeleitet.

<sup>6</sup> Kann z.B. aus einem a priori Fließmodell geschätzt werden.



## 2.2.4 Photogrammetrische Rekonstruktion

Ziel der photogrammetrischen Rekonstruktion ist es, die 3D-Koordinaten der Punkte im Objektraum zu berechnen, ohne daß die Höhenfehler des DGM Einfluß auf die Genauigkeit nehmen können. Dazu werden im Modul INTERSECT die in den POP's gemessenen Punkte über das grobe DGM wieder in das Bildkoordinatensystem der Luftbilder abgebildet. Durch einen räumlichen Vorwärtsschnitt wird eine Näherungsposition für den Objektpunkt und die Restparallaxe im Objektraum erhalten. Nach Überprüfung der Restparallaxe wird der Punkt entweder als Ausreißer eliminiert oder mit Hilfe eines Bündelausgleichs streng berechnet. Das Ergebnis sind die ausgeglichenen Objektkoordinaten  $Q_i^j$  und deren mittlere Fehler.

## 2.3 Das Gesamtsystem ADVM (Workflow)

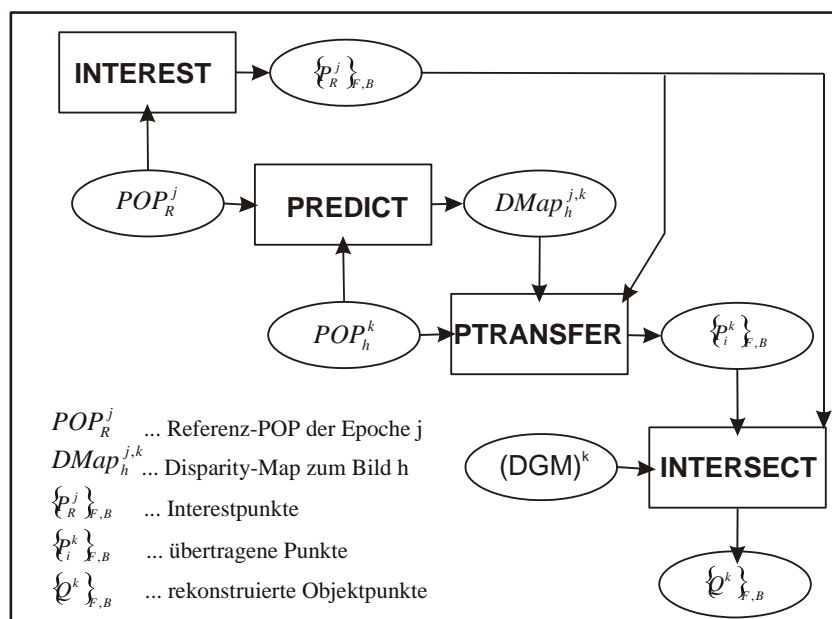


Abb. 1: ADVM - Workflow

In Abb. 1 werden die vier ADVM-Moduln (eckige Felder) sowie deren Ein- und Ausgangsdaten (rund) noch einmal im Überblick gezeigt. Die Herstellung der POP's (Vorverarbeitung) und die Weiterverarbeitung der berechneten Objektpunkte (Auftransformation der Festpunkte, Triangulation und Berechnung der Fließvektoren) erfolgt durch externe Programme und wird hier nicht gezeigt.

## 2.4 Zukünftige Erweiterungen

### 2.4.1 Multi-Photo-Constrained Matching (MPCM)

In den bisherigen Versionen von ADVM werden keine geometrischen Bedingungen beim Matching berücksichtigt. Grobe Fehler in der Punktzuordnung werden erst bei der Rekonstruktion entdeckt und der Punkt muß daher als Ausreißer eliminiert werden. MPCM ist eine Weiterentwicklung des Least-Squares-Matchings (GRÜN & BALTSAVIAS, 1988), die die Epipolarbedingung direkt beim Matchingprozeß berücksichtigt. Die Objektkoordinaten eines Punktes und die affinen LSM-Parameter in beliebig vielen Bildern werden gleichzeitig in einem gemeinsamen Ausgleich bestimmt. In der XYZ-Version des MPCM-Verfahrens wird ein Punkt in einem Bild festgehalten und definiert damit einen Projektionsstrahl  $s$ , auf dem der Objektpunkt liegen muß. In allen anderen Bildern erhält man die Epipolarlinie durch den Schnitt der Bildebene mit der durch die Basis  $b$  und  $s$  aufgespannten Epipolarebene. Die linearisierten Abbildungsgleichungen liefern die Verbindung zwischen den unbekanntem Objektkoordinaten X,Y und Z und den LSM-Translationsparametern dx und dy im Bild:

$$\begin{aligned} dx &= F_X^x \cdot dX + F_Y^x \cdot dY + F_Z^x \cdot dZ \\ dy &= F_X^y \cdot dX + F_Y^y \cdot dY + F_Z^y \cdot dZ \end{aligned} \quad (1)$$

Diese Gleichungen werden als Pseudo-Beobachtungen in den Ausgleich eingeführt, sodaß die Einschränkung des Suchraums auf die Epipolarlinie in Abhängigkeit von der Gewichtung mehr oder weniger streng ist. Aufgrund der Reduktion auf ein eindimensionales Suchproblem

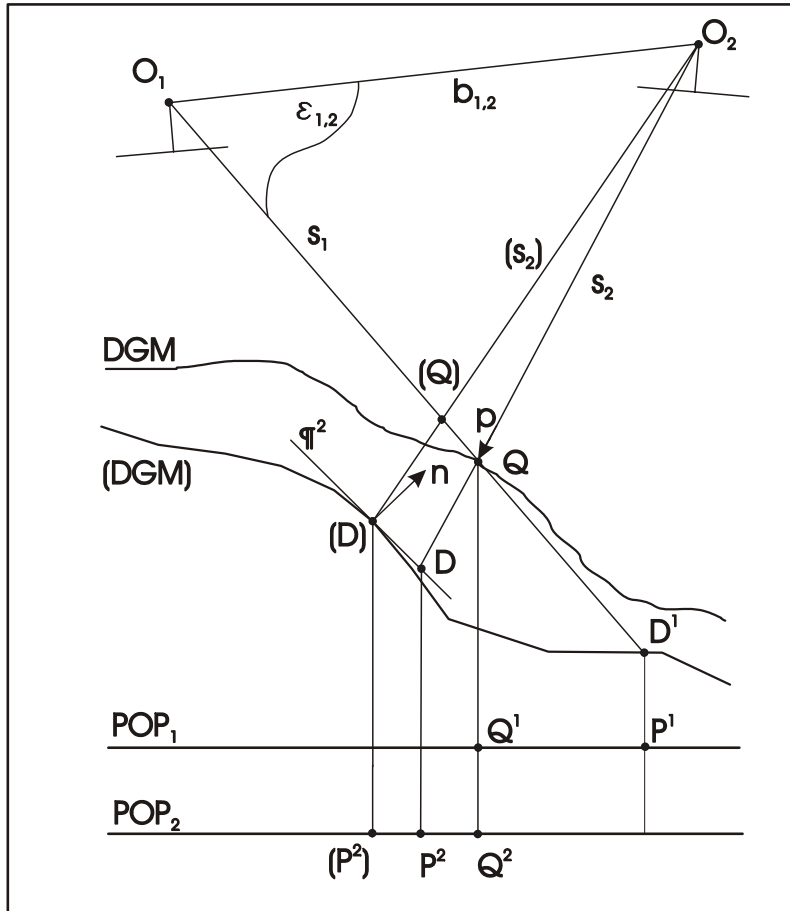


Abb. 2: Epipolargeometrie für Pseudo-Orthophotos

ist eine deutliche Verbesserung der Konvergenz und Toleranz bei Bildstörungen oder selbstähnlichen Mustern zu erwarten.

Soll der MPCM-Algorithmus auch für POP's verwendet werden, dann muß deren spezielle Bildgeometrie berücksichtigt werden (vgl. Abb. 2)<sup>7</sup>.

Da die ursprünglichen Bildpunkte über das DGM in das POP abgebildet wurden und das Matching homologer Punkte dort stattfindet, ist die Epipolarebene mit dem DGM zu verschneiden. Die Projektion der resultierenden Schnittkurve in den Grundriß ergibt eine Epipolarlinie als geometrischen Ort für die homologen Punkte (vgl. auch Abb. 3). Um eine modifizierte Abbildungsgleichung für die Bildkoordinaten  $u, v$  des POP in der Form von Formel (1) zu erhalten, werden die geometrischen Zusammenhänge aus Abb. 2 verwendet:

Für einen Näherungspunkt ( $Q$ ) auf dem festgehaltenen Strahl  $s_1$  wird im Schnittpunkt ( $D$ ) mit dem DGM die Tangentialebene  $\pi$  mit dem Normalenvektor  $n$  bestimmt. Für einen Objektpunkt  $Q$  kann dann der Schnittpunkt  $D$  mit der Tangentialebene berechnet werden:

$$D = O_2 + \lambda \cdot p \quad \text{mit } p = Q - O_2 \quad (2)$$

$$\lambda = -\frac{(O_2 - (D)) \cdot n}{p \cdot n} \quad \text{mit } n = \left. \frac{\partial D}{\partial X} \right|_{(D)} \times \left. \frac{\partial D}{\partial Y} \right|_{(D)} \quad (3)$$

Eine kleine Änderung des Objektpunktes  $Q$  bewirkt folgende Änderung des Schnittpunktes  $D$  in der Tangentialebene:

<sup>7</sup> Hier nur für ein Stereobildpaar gezeigt, analog für  $n > 2$  POP's.

$$dD = d\lambda \cdot \mathbf{p} + \lambda \cdot d\mathbf{p} = \lambda \cdot \begin{pmatrix} (\mathbf{n} \cdot d\mathbf{p}) \\ (\mathbf{n} \cdot \mathbf{p}) \end{pmatrix} \cdot \mathbf{p} + d\mathbf{p} \quad ; \quad d\mathbf{p} = dQ = \begin{pmatrix} dX \\ dY \\ dZ \end{pmatrix} \quad ; \quad dD = d \begin{pmatrix} \Delta X \cdot du \\ \Delta Y \cdot dv \\ dZ_{DGM} \end{pmatrix} \quad (4)$$

Aus den ersten beiden Komponenten von  $dD$  folgen die gesuchten modifizierten Abbildungsgleichungen für POP's ( $\Delta X, \Delta Y$ : Größe eines Orthophotopixels in X- bzw. Y-Richtung):

$$\begin{aligned} du &= \frac{\lambda}{\Delta X} \left( \frac{\mathbf{n}_1 \cdot \mathbf{p}_1}{(\mathbf{n} \cdot \mathbf{p})} + 1 \right) \cdot dX + \frac{\lambda}{\Delta X} \left( \frac{\mathbf{n}_2 \cdot \mathbf{p}_1}{(\mathbf{n} \cdot \mathbf{p})} \right) \cdot dY + \frac{\lambda}{\Delta X} \left( \frac{\mathbf{n}_3 \cdot \mathbf{p}_1}{(\mathbf{n} \cdot \mathbf{p})} \right) \cdot dZ \\ dv &= \frac{\lambda}{\Delta Y} \left( \frac{\mathbf{n}_1 \cdot \mathbf{p}_2}{(\mathbf{n} \cdot \mathbf{p})} \right) \cdot dX + \frac{\lambda}{\Delta Y} \left( \frac{\mathbf{n}_2 \cdot \mathbf{p}_2}{(\mathbf{n} \cdot \mathbf{p})} + 1 \right) \cdot dY + \frac{\lambda}{\Delta Y} \left( \frac{\mathbf{n}_3 \cdot \mathbf{p}_2}{(\mathbf{n} \cdot \mathbf{p})} \right) \cdot dZ \end{aligned} \quad (5)$$

Die Gleichungen (5) definieren gleichzeitig eine Tangente  $t_{1,2}$  an die Epipolarkurve im Näherungspunkt, die der Schnittgeraden der Epipolarebene mit der Tangentialebene entspricht (vgl. Abb. 3). Der Epipolarlinie im ursprünglichen Bild entspricht im POP also eine Tangente an die Epipolarkurve.

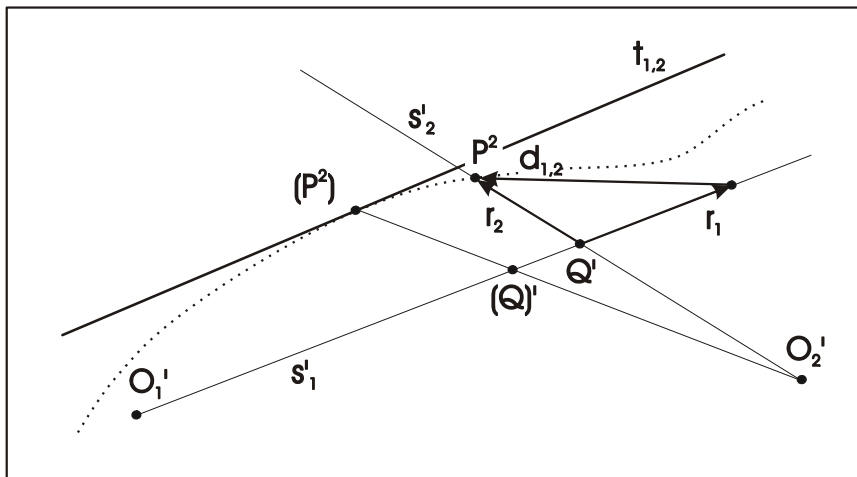


Abb.3: Epipolarkurve im Pseudo-Orthophoto

Die homologen Punkte  $P^1$  und  $P^2$  im  $POP_1$  bzw.  $POP_2$  sind um  $r_1$  bzw.  $r_2$  radial vom wahren Punkt  $Q'$  versetzt und durch die gemessene Disparität  $d_{1,2}$  miteinander verbunden. Sie liegen außerdem auf den Projektionen  $s_1'$  bzw.  $s_2'$  der Strahlen durch die Hauptpunkte  $O_1'$  bzw.  $O_2'$  und dem Punkt  $Q'$ .

## 3 Resultate des Projektes Hochebenkar

### 3.1 Projektbeschreibung

Die beiden benachbarten Blockgletscher Inneres- und Äußeres Hochebenkar befinden sich in den Ötztaler Alpen (Tirol). Die bis ins Jahr 1938 zurückreichenden Messungen können zu Vergleichszwecken herangezogen werden. Das Projekt umfaßte die Auswertung von insgesamt acht Epochen im Zeitraum von 1953 bis 1997, mit 22 Luftbildern im Maßstab 1:12.300 bis 1:38.500 (KAUFMANN & LADSTÄDTER, 2000). Die Luftbilder wurden für die digitale Verarbeitung mit dem Photogrammetrie-Scanner UltraScan5000 von Vexcel Imaging Austria GmbH. in einer Auflösung von  $10\mu\text{m}$  gescannt. Die Orientierung wurde von V. Kaufmann am analytischen Plotter DSR-1 durchgeführt.

### 3.2 Ergebnisse

Aus den durchgeführten Auswertungen wird beispielhaft das Ergebnis der Bewegungsmessung aus den Luftbildern 1953 und 1997 des inneren Hochebenkars präsentiert. Die zugehörigen POP's wurden mit einer Bodenauflösung von 0.5m für das 1500m x 800m große Projektgebiet berechnet. *Abb. 5* zeigt die mit dem System ADVM für diesen 44 Jahre umfaßenden Zeitraum berechneten Bewegungsvektoren:

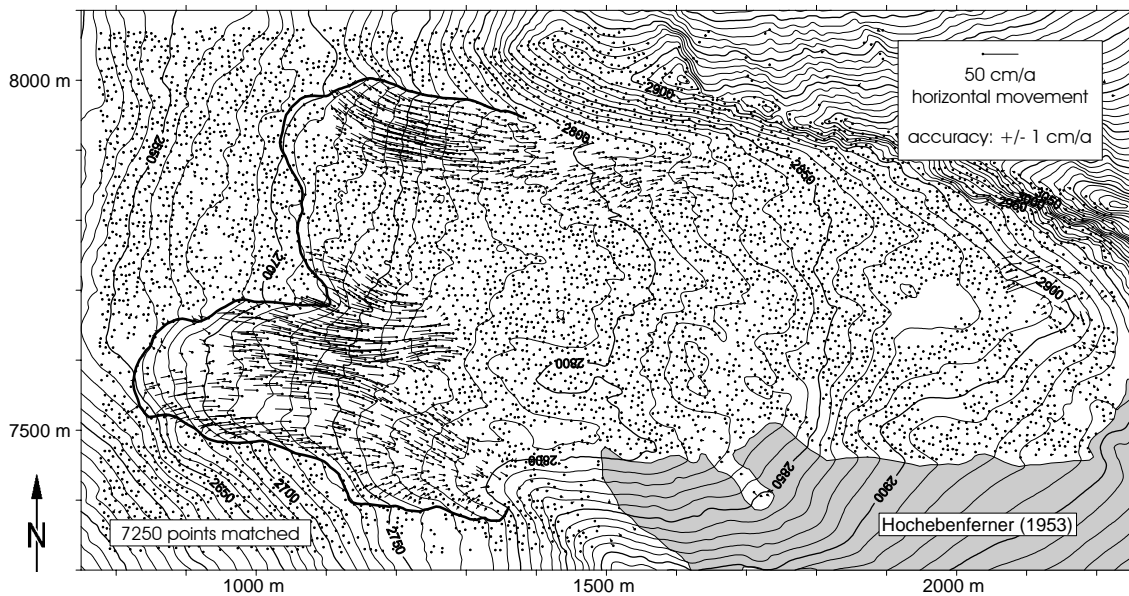


Abb. 5: Bewegungsvektoren des Inneren Hochebenkars (1953-1997)

Während der Großteil des Blg. inaktiv ist, können im nördlichen und südlichen Zungenbereich zwei Bereiche mit interessanten Fließstrukturen identifiziert werden. Die horizontale Bewegungskomponente wird in *Abb. 6* als farbcodierter Isolinienplot dargestellt:

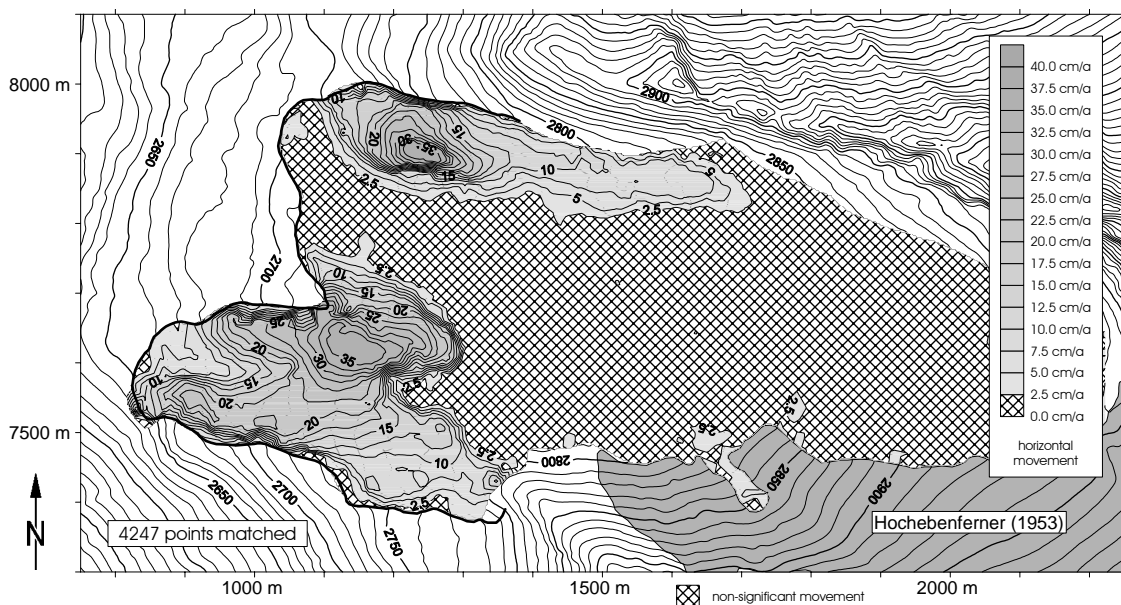


Abb. 6: Horizontale Bewegungskomponente (1953-1997)

## 4 Schlußfolgerungen und Ausblick

Anhand des Prototypen ADVM wurde gezeigt, daß die Digitalphotogrammetrie ein geeignetes Werkzeug für das Monitoring geomorphodynamischer Vorgänge ist. Das System kann in Hinblick auf Robustheit (z.B. durch MPCM) und Benutzerfreundlichkeit noch stark verbessert werden. Letzteres kann vor allem dadurch erreicht werden, daß explizite Parametereinstellungen wie z.B. die Fenstergröße beim Matching durch Zielvorgaben (z.B. maximal tolerierbarer Höhenfehler) ersetzt werden. Das System sollte dann unter Berücksichtigung des Bildmaterials selbstständig jene Parameter wählen, die ein optimales Ergebnis liefern.

ADVM soll in Zukunft auch für andere Monitoringaufgaben eingesetzt werden. Ein solches Projekt ist die Dokumentation einer großen Hangrutschung, das am Institut im April 2001 gestartet wurde. ADVM soll auch versuchsweise für die Messung von Fließgeschwindigkeiten großer Eisgletscher wie z.B. dem Unteraargletscher (Berner Alpen, Schweiz) eingesetzt werden. Diese Aufgabe stellt aufgrund der schlechten Textur und der raschen Veränderungen der Gletscheroberfläche eine große Herausforderung an ein digitales Meßsystem dar.

## 5 Literaturverzeichnis

- ACKERMANN, F., 1983: High Precision Digital Image Correlation. - Schriftenreihe des Instituts für Photogrammetrie, Heft 9, Vorträge der 39. Photogrammetrischen Woche 1983, Stuttgart 1984, Seite 231-243.
- BARSCHE, D., 1996: Rockglaciers: Indicators for the present and former geocology in high mountain environments. - Springer Series in Physical Environment, 16, 331 p.
- FÖRSTNER, W. & GÜLCH, E., 1987: A fast operator for detection and precise location of distinct points, corners and centers of circular features. - Proc. of Fast Processing of Photogrammetric Data, Interlaken 1987, Seite 281-305.
- GRUEN, A.W. & BALTSAVIAS, E. P., 1988: Geometrically Constrained Multi-Photo-Matching. - Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol 54, No. 5, May 1988, Seite 633-641.
- KÄÄB, A. & VOLLMER, M., 2000: Surface Geometry, Thickness Changes and Flow Fields on Creeping Mountain Permafrost: Automatic Extraction by Digital Image Analysis. - Permafrost and Periglacial Processes, 11, p. 315-326.
- KAUFMANN, V., 1998: Deformation analysis of the Doesen rock glacier (Austrian Alps, Europe). - Proceedings of the 7th International Conference on Permafrost, 23-27 June, 1998, Yellowknife, NWT, Canada, pp. 551-556.
- KAUFMANN, V. & LADSTÄDTER, R., 2000: Spatio-temporal analysis of the dynamic behaviour of the Hochebenkar rock glaciers (Oetzal Alps, Austria) by means of digital photogrammetric methods. 6th International Symposium on High Mountain Remote Sensing Cartography 2000, Ethiopia, Kenya, Tanzania, 3-18 September 2000.
- LADSTÄDTER, R., 1999: Automatisierte Messung von Geländemodellen und Fließvektoren aus digitalen, multitemporalen Orthophotos - ein neuer Ansatz für das Blockgletscher-Monitoring. - Unpubl. Diplomarbeit, Institut für Angewandte Geodäsie, TU Graz, 185 Seiten.

# Digitale Photogrammetrie für Jedermann - ein neues Low-Cost-System

WILFRIED LINDER<sup>1</sup>

*In vielen Fachbereichen außerhalb der Photogrammetrie wie Geographie, Geologie, Forstwesen, Kampfmittelbeseitigung u.a. werden photogrammetrische Auswerteverfahren eingesetzt, wobei nicht in jedem Fall höchste Genauigkeit, sondern vor allem einfache Bedienung und bezahlbare Preise im Vordergrund stehen. Für diese früher von (semi-)analytischen Geräten 2. Ordnung bedienten Felder wird eine neue, leistungsstarke Stereo-Arbeitsstation vorgestellt.*

## Einleitung

Photogrammetrische Auswerteverfahren werden seit Jahrzehnten in vielen Sachgebieten eingesetzt, um räumliche Objektinformationen zu erfassen. Dabei waren allerdings die Kosten für das Auswerteequipment sowie das benötigte Fachwissen bzw. die Erfahrung des Operateurs oft wesentliche limitierende Faktoren, wenngleich über die drei großen Phasen der Photogrammetrie hinweg - analoge, analytische und heute digitale - ein genereller Trend fallender Preise und komfortablerer Bedienung festzustellen ist. Dennoch, eine digitale photogrammetrische Arbeitsstation inklusive der notwendigen Peripherie wie Präzisionsscanner, Ausgabemedien und Archivierungssystemen ist auch heute noch für viele Anwender eine kostspielige Angelegenheit. Einen recht aktuellen Überblick über die derzeit angebotenen kommerziellen Systeme geben PETRIE & WALKER (2000).

Auf der anderen Seite gibt es eine Reihe von Anwendungen bzw. Fachgebieten, in denen photogrammetrische Auswertungen nur sporadisch erfolgen und nicht notwendiger Weise höchste geometrische Genauigkeit benötigt wird, früher die Domäne (semi-)analytischer Geräte 2. Ordnung. Beispiele dafür aus der Geographie, Geologie, dem Forstwesen usw. gibt es genug. Um diesen potentiellen Anwendern die Photogrammetrie zu erschwinglichen Preisen zu erschließen, wird am Geographischen Institut der Uni Düsseldorf in enger Zusammenarbeit mit dem Institut für Photogrammetrie und Ingenieurvermessungen (IPI) der Uni Hannover ein benutzerfreundliches System entwickelt, welches ausschließlich mit Standard-Hardware arbeitet. Konzept und derzeitiger Leistungsumfang sollen hier vorgestellt werden.

## Konzept

Schwerpunkt des Programms ist die stereoskopische Auswertung von Luftbildern. Dabei erfolgt die Steuerung der Meßmarken über Koordinaten im Objektraum; mit Hilfe des Strahlenganges werden dann die korrespondierenden Bildausschnitte bestimmt. Bei diesem auch als *vertical line locus* bezeichneten Verfahren bewegt man sich im Stereomodell bekanntlich entlang von Epipolarlinien, wodurch die y-Parallaxen bis auf z.B. rundungsbedingte Restfehler eliminiert werden. Dieser "von unten nach oben" arbeitende Ansatz bietet eine Reihe von Vorteilen, die beispielsweise bei der Stereokorrelation (matching) oder dem Ableiten von Orthobildern konsequent genutzt werden.

---

<sup>1</sup> Dr. Dr.-Ing. Wilfried Linder, Geographisches Institut, Universität Düsseldorf, Universitätsstraße 1, 40225 Düsseldorf. E-Mail: wilfried.linder@uni-duesseldorf.de

Durch Schnittstellen zu den Aerotriangulationsprogrammen BLUH (IPI Uni Hannover) und BINGO (GIP Aalen) wird die gesamte Palette photogrammetrischer Anwendungen von der Bildkoordinatenmessung über die Bündelblockausgleichung bis hin zu automatisierter DGM-Erstellung, Mono- und Stereoplotting, Orthobildern und Mosaiken bereitgestellt.

Das Programm ist als Zusatzpaket zur Raster-GIS-Software LISA erhältlich und hierzu voll kompatibel. Daher stehen z.B. alle DGM-Operationen wie die Ableitung und Überlagerung von Höhenlinien, 3D-Ansichten, Volumenberechnungen usw. zur Verfügung. Die zum LISA-System gehörende Bilddatenbank GIDB schließlich ermöglicht die Verwaltung geocodierter Rasterdaten in Ebenen mit automatischer Mosaikfunktion, wodurch etwa Geländemodelle oder Orthobilder größerer Projekte bequem gehandhabt werden können.

## **Übersicht Leistungsumfang**

Nachstehend seien zunächst einige der wichtigsten Möglichkeiten des Programms kurz beschrieben.

### **Bildmaterial, Orientierung, Modellbildung**

Neben Luftbildern handelsüblicher Reihenmeßkameras können auch Daten von Reseau- bzw. Digitalkameras verarbeitet werden. Mit Hilfe des Moduls IMGEO aus dem BLUH-System lassen sich ferner Satelliten-Zeilenscannerdaten (z.B. SPOT, IRS 1C, MOMS) sowie Panoramaaufnahmen nutzen.

Die innere Orientierung der Bilder geschieht durch manuelle Rahmenmarkenmessung mit Vorpositionierung und optionaler automatischer Zentrierung, die äußere Orientierung durch Paßpunktmessung (räumlicher Rückwärtsschnitt) bzw. Übernahme von Parametern aus BLUH bzw. BINGO. Eine aufwendig gestaltete Modelldefinition führt eine Reihe von Logik- und Plausibilitätskontrollen durch, um alle nur denkbaren Fehler (Bilder gedreht, vertauscht, schlecht orientiert) aufzudecken; ferner erfolgt hier eine Minimierung noch vorhandener y-Parallaxen durch eine Affintransformation (vgl. ZHANG & MILLER 1997).

### **Stereobetrachtung**

Bei manuellen Messungen im Stereomodell (Bild- bzw. Geländekoordinaten) erfolgt die Darstellung der korrespondierenden Bildausschnitte entweder nebeneinander (links - rechts) oder nach dem Anaglyphenverfahren (Rot-Grün-Brille). Grundprinzip der Steuerung ist das Verschieben der Bildausschnitte unter feststehenden Meßmarken, wobei eine flexible Handhabung über Zoom, Helligkeit und Kontrast der Bildausschnitte, verschiedene Fahrgeschwindigkeiten sowie Form und Farbe der Meßmarken ermöglicht wird. Das Verschieben der Bildausschnitte erfolgt mit der mittleren Maustaste, eine Feinpositionierung kann über die Pfeiltasten geschehen.

### **Bildkoordinatenmessung (ATM)**

Die Messung von Bildkoordinaten für eine Aerotriangulation erfolgt manuell. Enthalten sind u.a. die Vorpositionierung auf Gruberpunkte, Punktübertragung in das Nachbarmodell sowie die Möglichkeit, Bildausschnitte der Punktumgebungen im Sinne von Punktskizzen zu spei-

chern, um bei erneutem Messen eines Punktes seine genaue Position besser wiederzufinden. Diverse Editiermöglichkeiten (Punkt neu messen, Punkt löschen, Nummer verändern) sowie der Export nach BLUH bzw. BINGO runden diesen Programmteil ab.

## **Messen von Geländekoordinaten**

Die Aufnahme von Geländekoordinaten (Punkte, Linien) kann wahlweise im Mono- oder Stereomodus erfolgen, in beiden Fällen optional mit angekoppeltem DGM. Im Stereofall besteht ferner die Möglichkeit, die Meßmarken über Koordinaten aus einer Datei, entlang Profilen oder in einem Gitter vorzupositionieren. Bereits gemessene oder sonstige angegebene Vektordaten können in die Bildausschnitte sowie das Übersichtsbild eingeblendet werden (Overlay).

## **Automatisierte DGM-Ableitung**

Über eine Stereokorrelation läßt sich für den jeweiligen Modellbereich ein DGM ableiten. Grundansatz ist hier das sogenannte Area Based Matching, wobei allerdings die Positionierung im Objektraum erfolgt und Höhenänderungen sich so im Bildraum als Lageänderungen entlang von Epipolarlinien niederschlagen (zu den verschiedenen gebräuchlichen Methoden vgl. z.B. HANNAH 1989, HEIPKE 1996). Ein ausgeklügeltes System aus iterativ aufeinander aufbauenden Verbesserungen führt zu hoher Punktdichte, Zuverlässigkeit und Geschwindigkeit. Die einzustellenden Parameter sind auf ein Minimum beschränkt, Vorgabewerte werden Daten- und reliefabhängig berechnet sowie automatisch adaptiv verändert. In Gebieten, wo die Korrelation fehlschlug (z.B. zu geringer Kontrast), können manuell weitere Punkte gemessen werden. Eine abschließende Interpolation füllt freie Flächen auf. Aus dem ermittelten Oberflächenmodell kann sodann mit Hilfe des Moduls RASCOR aus dem BLUH-System ein wirkliches Höhenmodell (= Bodenpunkte) abgeleitet werden (vgl. JACOBSEN 2001).

## **Orthobilder**

Die Ableitung von Orthobildern erfolgt optional aus nur einem oder jeweils benachbarten Bildern eines Modells, wodurch ein stufenloses Überblenden und damit optimaler Grauwertabgleich im Streifen möglich wird. Falls (noch) kein DGM vorhanden ist bzw. das Gelände nur wenig Relief aufweist, kann auch mit einem Näherungs-DGM aus wenigen Punkten (z.B. Paßpunkte) oder sogar nur einer Horizontalebene (mittlere Geländehöhe) gearbeitet werden. Wie schon weiter oben erwähnt, können ferner die DGMs sowie die Orthobilder, da es sich hier um geocodierte Rasterdaten handelt, anschließend zu Mosaiken zusammengefügt werden.

## **Sonstiges**

Eine Reihe weiterer Möglichkeiten rundet das Programm ab. Hierzu zählen die üblichen Import- und Exportfilter wie auch z.B. die Option, durch einen Soll-Ist-Vergleich die DGM-Höhen aus der Stereokorrelation mit einem Referenz-DGM zu vergleichen, um Aufschluß über die Qualität des Datensatzes zu bekommen.

Als Hardwareausstattung genügt dem Low-Cost-Ansatz gemäß ein handelsüblicher PC, ein ordentlicher Scanner (idealerweise Format A3 mit optionalem Durchlichtaufsatz, um auch Standard-Luftbilder des Formates 23 x 23 cm sowie Filmmaterial verwenden zu können),



eine 3-Tasten-Maus sowie eine Rot-Grün-Brille. Für ein ergonomisches Arbeiten ist lediglich auf eine ausreichende Ausstattung des Kernspeichers zu achten (Minimum 128 MB).

## Beispiel

Abschließend sei noch ein Beispiel zur Illustration einiger Möglichkeiten angeführt. Es handelt sich um ein Gebiet nahe der Stadt Caicedonia in Kolumbien.

Ausgangsmaterial waren Schwarz-Weiß-Luftbilder des üblichen Formats 23 x 23 cm, aufgenommen mit einer Zeiss-Weitwinkelkamera ( $f = 153 \text{ mm}$ ), die mit einer Auflösung von 300 dpi (ca.  $85 \mu\text{m}$ ) eingescannt wurden, woraus ein Bodenauflösung von ca. 1,2 m resultierte. Das Höhen-Basis-Verhältnis liegt bei 2,15, so daß eine Einstellgenauigkeit in z von ca. 2,6 m erreichbar ist.

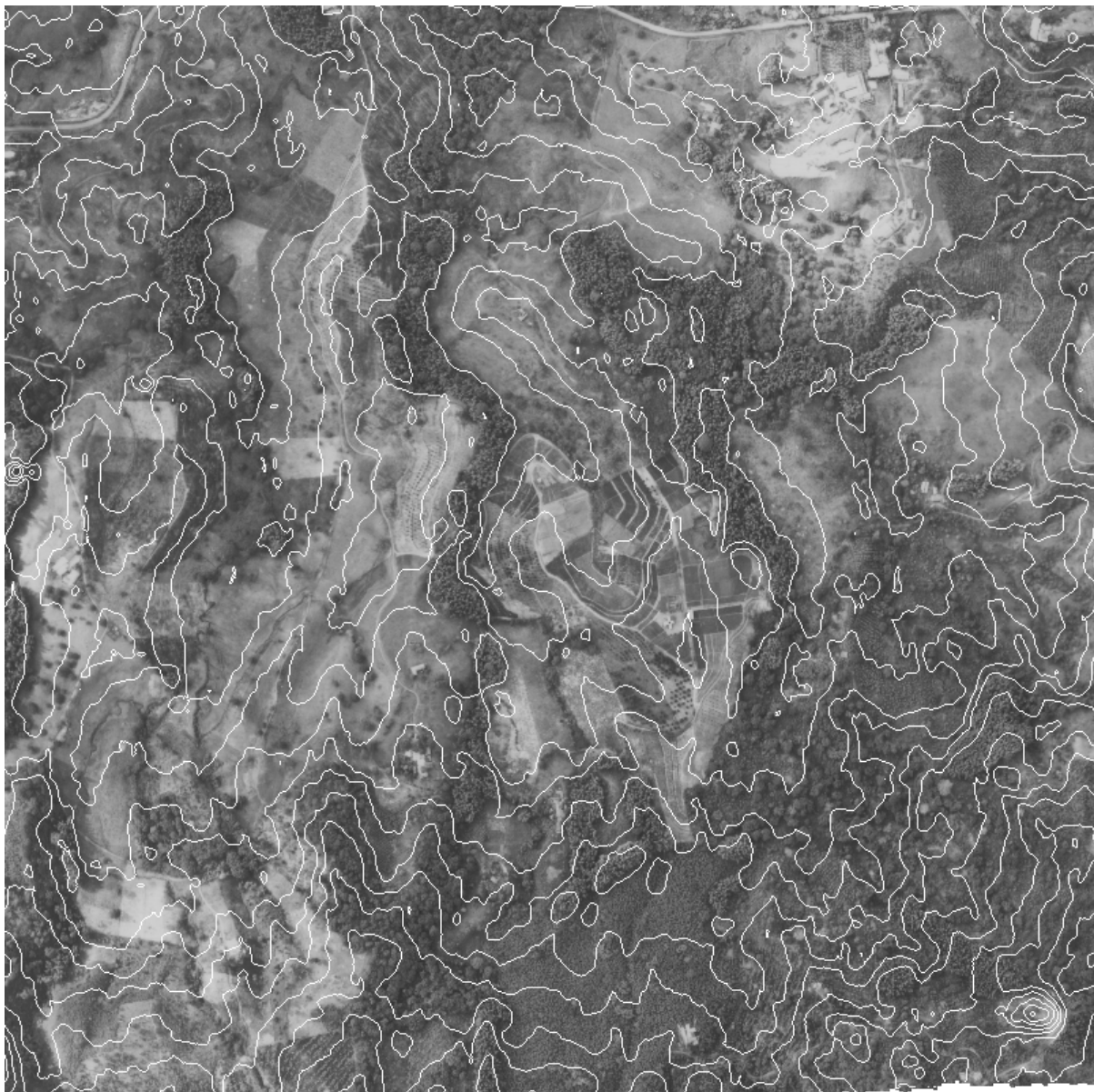


Abb. 1: Orthobild mit überlagerten Höhenlinien

Nach innerer und äußerer Orientierung der Bilder wurde zunächst über die Stereokorrelation ein DGM abgeleitet. Die gewählte Bodenauflösung, hier 2,5 m, bestimmt die Dichte der korrelierten Punkte. Bei einem gesetzten Schwellwert von 0,7 für den Korrelationskoeffizienten wurden insgesamt 747955 Punkte ermittelt - dies entspricht 82,6% aller Punkte im Modellbereich. Der verwendete PC (Pentium-Prozessor, 600 MHz) erreichte dabei eine Geschwindigkeit von 1760 Punkten pro Sekunde.

Zur Ermittlung der Qualität wurde ein Vergleich gegen vorliegende digitale Höhenlinien gerechnet. Über die Genauigkeit bzw. das Maß der Generalisierung dieser Daten war nichts bekannt, dennoch ergab sich mit einem Mittelwert von -0,168 m bzw. einer Standardabweichung von 3,160 m bei 2936 Referenzpunkten ein akzeptables Ergebnis.

Für die Berechnung des Orthobildes wurden zunächst die fehlenden Stellen im DGM durch Interpolation vervollständigt, anschließend das Orthobild mit einer Bodenauflösung von ebenfalls 2,5 m berechnet sowie mit dem Programm LISA BASIS aus dem DGM abgeleitete Höhenlinien (Äquidistanz 12,5 m) überlagert (Abb. 1). Eine Kombination aus Orthobild und DGM ergibt eine gute räumliche Vorstellung des Geländes: Blick aus Nordwest, Überhöhung 1,5-fach (Abb. 2).

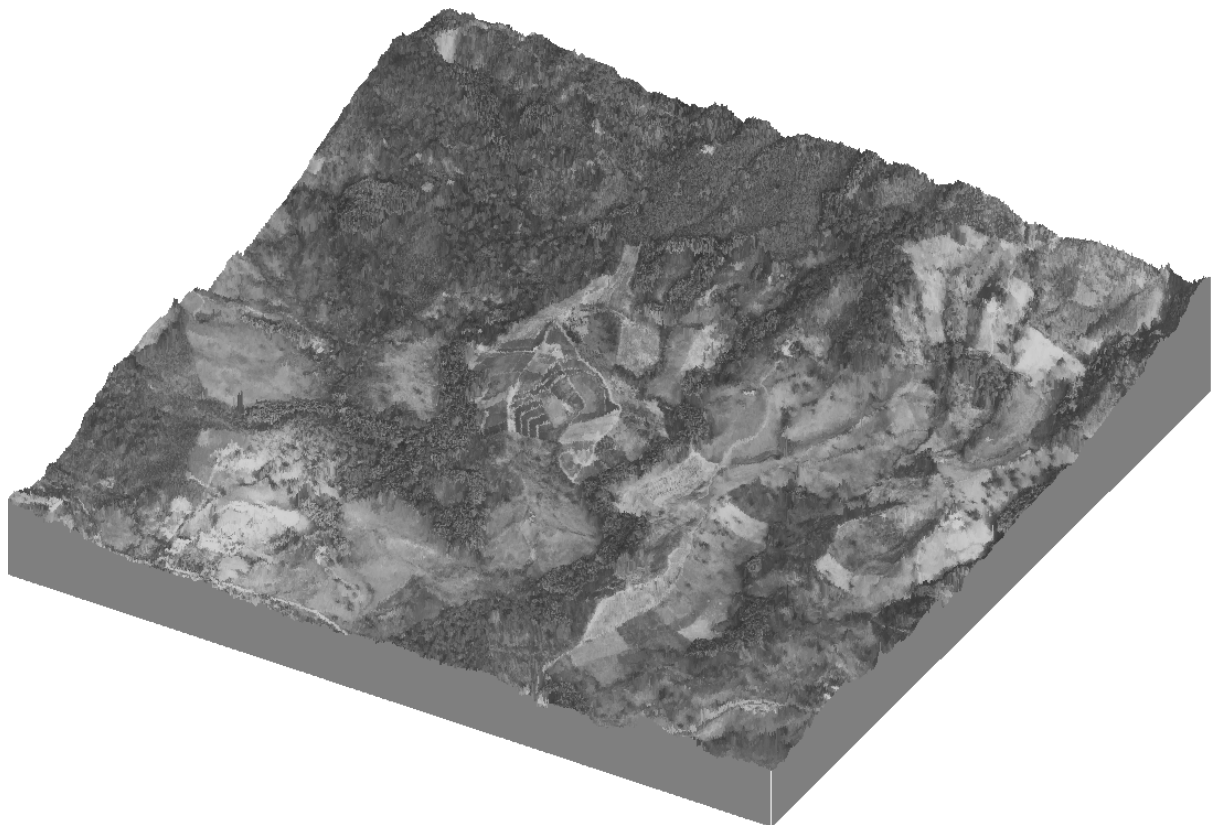


Abb. 2: Orthobild auf DGM projiziert, 3D-Ansicht.

## Kontakte

Die Programme LISA BASIS und LISA FOTO können als Testversionen von unserer Homepage geladen werden:

<http://www.uni-duesseldorf.de/WWW/MathNat/Geo/Lisa/>

Ansprechpartner ist der Autor.

Bezüglich der erwähnten Bündelblockprogramme seien nachstehende Adressen genannt:

BLUH: <http://www.ipi.uni-hannover.de/>, Ansprechpartner Dr. Karsten Jacobsen.

BINGO: <http://www.gip-aalen.de/>, Ansprechpartner Dr. Erwin Kruck.

Ein Komplettpaket zur digitalen Photogrammetrie, welches u.a. die Programme BLUH und LISA beinhaltet, wird unter der Bezeichnung SIDIP angeboten vom IPI, Uni Hannover, Adresse und Ansprechpartner wie vorstehend.

## Literatur

HANNAH, M. J., 1989: A System for Digital Stereo Image Matching. PE&RS, Vol. 55, No.12: 1765 - 1770.

HEIPKE, C. 1996: Overview of Image Matching Techniques. Proceedings of the OEEPE Workshop on 'Application of Digital Photogrammetric Workstations'.

JACOBSEN, K. 2001: New Developments in Digital Elevation Modelling. GeoInformatics Vol. 4: 18 - 21.

PETRIE, G. & WALKER, S. 2000: Digital Photogrammetric Systems Approach Maturity. GeoInformatics, Vol. 3: 18 - 25.

ZHANG, B. & MILLER, S., 1997: Adaptive Automatic Terrain Extraction. SPIE Vol. 3072: 27 - 36.

# Untersuchungen zur Anwendbarkeit der linearen spektralen Entmischung beim Bestandsmonitoring von Waldflächen

MICHAEL PRIEMER <sup>1</sup> & PETER LOHMANN <sup>2</sup>

## Abstract

*Due to the spatial resolution of some satellite sensors like LANDSAT or SPOT the use of multispectral classification of tree species at sub-pixel level within forest areas sometimes is limited or difficult. The investigations within this paper make use of the method of linear unmixing, being implemented within ERDAS Imagine as Subpixel-Classifer-Module (SPC) of Applied Analysis Inc. (AAI) . It relies on the derivation of signatures from well defined training sets and permits the determination of surface materials or material part fractions. Therefore it could be an interesting new tool for the management of forest areas, like inventory, mapping of pest investment and storm losses.*

*This paper investigates the potential of SPC in an area south east of Hannover using recent LANDSAT 7 data in combination with reference data from two official organizations being responsible for forest areas, namely the chamber of agriculture in Hannover and the forestry planning department in Wolfenbüttel.*

*Aside fir and beech-trees which are regionally wide spread, the investigations cover also species like oak trees, alder, sycamore and ash trees. The signatures have been derived from pure stands as well as mixed ones and the results are compared to a traditional multispectral classification using the maximum-likelihood method.*

*First results show, that both methods yield comparable results once the training sets are homogeneous. The subpixel analysis furthermore allows conclusions on the density and purity of stands, which is difficult to achieve by traditional classifiers.*

## 1 Theorie der linearen spektralen Entmischung

Die Lineare Spektrale Entmischung wird als Vorgang verstanden, die durch den Abbildungsvorgang entstandene spektrale Mischung in Pixeln zu invertieren. Mischpixel sind solche heterogenen Inhalts. Man spricht daher von der Subpixelanalyse.

### 1.1 Lineare Mischung

Im physikalischen Modell entsteht der gemischte Wert eines Pixels durch die Integration der reflektierten Strahlung über ein gemischtes, heterogenes momentanes Gesichtsfeld. Durch das Auftreten verschiedener Materialien und deren unterschiedlichen spektralen Eigenschaften innerhalb eines Pixels entsteht eine lineare Kombination der reinen auftretenden Komponentenspektren. Die vorkommenden Komponenten werden als Endmember bezeichnet.

---

<sup>1</sup> cand.-geod. Michael Priemer, Institut für Photogrammetrie und Geoinformation (IPI), Universität Hannover, Nienburger Str. 1, 30167 Hannover, miprie@web.de

<sup>2</sup> Dr.-Ing. Peter Lohmann, Institut für Photogrammetrie und Geoinformation(IPI), Universität Hannover, Nienburger Str.1, 30167 Hannover, lohmann@ipi.uni-hannover.de

### 1.1.1 Mathematisches Modell

Die lineare Mischung eines heterogenen Pixels ist also aufzufassen als gewichtete Mittelbildung nach physikalischen Anteilen der Endmember auf der Pixelfläche (SCHOWENGERDT, 1997). Die folgende Abbildung beschreibt exemplarisch die Entstehung eines Mischpixelspektrums. Die auftretenden Endmember „Kentucky Blue Gras“ und „trockener roter Ton/Lehm“ seien im betrachteten Mischpixel zu jeweils 50 % enthalten. Dargestellt ist neben den Einzelspektren der beiden Endmember das entstandene Mischspektrum.

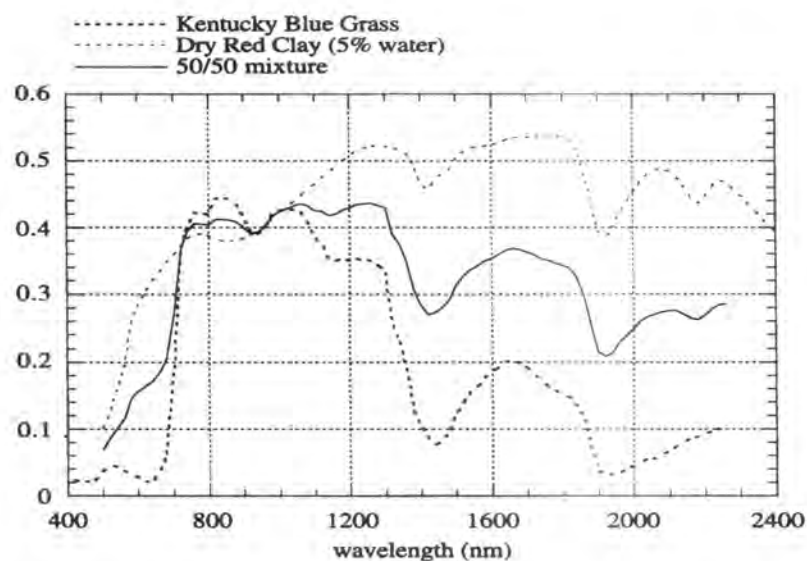


Abb.1 : Reflexionsspektrum eines Mischpixels und der beiden mischenden Endmember (SCHOWENGERDT, 1997)

Es bleibt anzumerken, dass einzig die Abundanzen (Flächenanteil eines Materials – Endmember – an der Gesamtfläche des Pixels) der Endmember sowie deren Reflexionsspektren für die lineare Mischung des heterogenen Pixels massgebend sind; deren geometrische Form, Lage oder Verteilung innerhalb des Pixels hat hierbei keine Wirkung.

### 1.2 Lineare spektrale Entmischung

Die Inversion der linearen Mischung führt auf die Abundanzen der Endmember. Voraussetzung für die Entmischung eines n-kanaligen gemischten Pixels ist die Kenntnis über alle vorkommenden Endmember sowie deren Referenzspektren.

Inversion :  $\mathbf{A} * \mathbf{X} = \mathbf{B} \implies \mathbf{X} = \mathbf{A}^{-1} * \mathbf{B}$

**A** : Mischungsbibliothek, enthält die Grauwerte aller Endmember

**X** : Vektor der Abundanzen

**B** : Reflexionsvektor des Mischpixelspektrums

In der Mischungsbibliothek A müssen alle im Auswertungsgebiet auftretenden Endmember mit ihren Reflexionsspektren enthalten sein. Die Selektion der Endmember erfolgt aus Zusatzinformationen über die Testgebiete. Um zusätzliche Unsicherheiten bei der Entmischung zu vermeiden, sollten Endmember, deren Vorkommen im Analysegebiet ausgeschlossen werden kann, auch nicht in die Mischungsbibliothek aufgenommen werden.

Die benötigten Referenzspektren können aus Labormessungen, aus ground-truth-Beobachtungen (terrestrisch) oder aus vorhandenen Daten abgeleitet werden.

Für den Fall, dass die Anzahl der Endmember kleiner ist als die Anzahl der Spektralkanäle, ist die Gleichung  $\mathbf{X} = \mathbf{A}^{-1} * \mathbf{B}$  als überbestimmtes lineares Gleichungssystem zu betrachten.

Die Lösung gelingt über eine lineare Regressionsanalyse nach der Methode der kleinsten Verbesserungsquadratsummen für die Vorkommenshäufigkeit der Endmember.

Innerhalb eines Pixels belegt jeder Endmember in jedem Kanal den gleichen Flächenanteil.

Wegen der Überbestimmung ist eine Qualitätsanalyse durch Restfehler und Standardabweichung zulässig. Die Entmischung wird für jedes Pixel einzeln berechnet.

## 2 Der AAI – Imagine Subpixel Classifier

Der AAI Imagine Subpixel Classifier (eine für das Bildverarbeitungspaket ERDAS von der Firma Applied Analysis Inc., Billerica, USA, entwickelte Software) baut eine Signatur für ein spezielles Material auf. Dieses Material wird im folgenden als MOI – Material of Interest bezeichnet. Die Subpixelanalyse soll eine feinere Klassifizierung als herkömmliche traditionelle Klassifizierungsalgorithmen liefern. Für jedes Pixel im Bild wird geprüft, ob das gesuchte Material (MOI) enthalten ist; im Ergebnis werden die Pixel je nach detektiertem Anteil des gesuchten MOIs den entsprechenden Klassen zugewiesen.

### 2.1 Ablauf der Subpixelanalyse

Die Durchführung einer Subpixelanalyse umfasst fünf Prozesse, die im Folgenden erläutert werden.

#### 2.1.1 Quality Assurance

Diese Funktion prüft die verwendeten Satellitenbilder hinsichtlich ihrer Qualität. Sollten beim Resampling der Bilder Datenlücken aufgetreten sein, werden diese aufgefüllt durch duplizierte Daten. In der Regel werden komplette Zeilen oder Spalten dupliziert. Auch bei Datenlücken aus Sensorfehlern findet die Technik des Datenduplizierens Verwendung. Die duplizierten Daten werden als DLAs bezeichnet, Duplicate Line Artefacts. Der Modus Quality Assurance findet duplizierte Daten, unabhängig für jedes Band durch Vergleich der Pixelgrauwerte und Suche nach identischen Pixelspektren. Gefundene DLAs werden in einem separatem Layer dargestellt.

### **2.1.2 Preprocessing**

Die Funktion überwacht den Hintergrund des Bildes, um ihn für die Signaturenableitung und die Klassifizierung zu entfernen. Die in einer Bibliothek zusammengestellten potentiellen Hintergrundspektren werden hinsichtlich ihrer spektralen Eigenschaften mit den auftretenden Pixelspektren verglichen. Die 44 Hintergrundspektren der Bibliothek, umfassen sowohl reine, wie auch gemischte Spektren. Es ist nicht bekannt, um welche Spektren es sich handelt.

### **2.1.3 Automatic Environmental Correction**

Die Funktion Automatic Environmental Correction analysiert die atmosphärischen Parameter zum Zeitpunkt der Aufnahme. Es werden Koeffizienten berechnet für die Korrektur der Bilder wegen der aktuellen Atmosphäre zum Aufnahmezeitpunkt sowie der Topographie innerhalb der Szene. Notwendig ist dieser Prozess sowohl für Auswertung genau dieser Szene (in-scene - Modus), als auch für Klassifikationen in anderen Bildern, die auf Signaturen dieser Szene basieren (scene-to-scene - Modus). Für den Fortgang der Subpixelanalyse ist dieser Prozess unerlässlich.

### **2.1.4 Signature Derivation**

Die Funktion Signature Derivation ermöglicht die Ableitung einer Signatur für ein bestimmtes zu klassifizierendes Material im Bild; dieses Material wird als MOI – Material of Interest bezeichnet. Der AAI Imagine Subpixel Classifier erlaubt die Ableitung von Signaturen für Materialien, die nur partiell in Pixeln auftreten. So ist die abgeleitete Signatur nicht als reines Reflexionsspektrum eines Materials zu betrachten, sondern enthält darüber hinaus zusätzliche Informationen, die einen Einsatz der Signatur im scene-to-scene – Modus erlauben. Die aus dem Material of Interest abgeleitete Signatur enthält neben dem Signaturespektrum, das als Äquivalent zu einem Pixelspektrum des reinen MOI betrachtet werden kann, den nicht – parametrischen Merkmalsraum, um die Restspektren bei der Ermittlung des Hintergrunds zu filtern. Grundlage für die Signaturenableitung sind vom Anwender vorgegebene Trainingsgebiete, deren Bedeckung mit Material of Interest wohl bekannt sein muss. Der Anteil an MOI innerhalb der Trainingsflächen wird dem Algorithmus durch den Anwender als MPF (Mean Material Pixel Fraction) vor der Signaturenableitung bekanntgegeben. Ebenfalls durch den Anwender wird eine Wahrscheinlichkeit geschätzt (confidence factor) über die Sicherheit der angegebenen MPF, anhand derer der Algorithmus während der Signaturenableitung Trainingspixel vom Prozess der Signaturenableitung ausschliessen wird. Hintergrund der Variationen der Restspektren sind einerseits tatsächliche Variationen im Spektrum des Materials of Interest, andererseits aber auch unvermeidbare Fehler während der Separation des Signaturhintergrunds. Während traditionelle Klassifizierungsalgorithmen über die spektrale Variation innerhalb der Trainingsgebiete die Breite der Signatur festlegen, extrahiert die Subpixelanalyse das Material als Signatur, welches in allen Trainingspixeln innerhalb der, durch Mean Material Fraction und confidence factor gesteckten Grenzen, vorhanden ist. Die Funktion Signature Environment and Refinement bietet die Möglichkeit der Verbesserung einer erzeugten Signatur, basierend auf neuen AOIs der Klassen: „Richtige Detektionen“; „Fälschlich nicht klassifizierte Pixel“ und „Fälschlich klassifizierte Pixel“.

### 2.1.5 MOI Classification

Inhalt dieser Funktion ist die eigentliche Klassifikation eines gesuchten MOI in einem Bild durch Anwendung einer zuvor abgeleiteten Signatur. Ergebnis der MOI – Classification ist ein Bild, das dem klassifizierten überlagert werden kann, um die Pixel, in denen MOI lokalisiert wurde, im Bild darzustellen. Die Schrittweite der zu klassifizierenden Subpixelklassen ist vor der Klassifizierung festzusetzen. Zu wählen ist hier zwischen 2 Klassen in 40% - Schritten, 4 Klassen in 20% - Schritten oder 8 Klassen in 10% - Schritten. Die niedrigste Klasse von 0 bis 20 % MOI – Pixelanteil ist Standard. Nach Anwendung der berechneten Korrekturparameter auf Bild und Signatur berechnet der Subpixelalgorithmus die Trennung von Signatur und Hintergrundspektrum für jedes Pixel unabhängig. Die innerhalb der Wahrscheinlichkeitsgrenzen des Merkmalsraumes gefundenen MOI – Anteile jedes Pixels werden in einer separaten Bildebene als Layer dargestellt. Die Angabe des Toleranzparameters erlaubt es dem Anwender, den Merkmalsraum der Signatur zu verkleinern oder auszudehnen, um die Detektionsrate zu optimieren.

## 3 Untersuchungen zur Detektion verschiedener Baumarten

### 3.1 Georeferenzierung

Erster Schritt nach Erhalt der LANDSAT TM7 – Daten war das Erstellen eines Ausschnitts, der die Testgebiete enthält. Es handelt sich um eine Fläche von 2500 km<sup>2</sup> südöstlich von Hannover. Aufnahmezeitpunkt der Szene war September 1999. Da das bevorzugte Datenformat für die Subpixelanalyse von LANDSAT – Daten vorsieht, radiometrisch korrigierte Daten, geometrisch nicht korrigiert, zu verwenden (AAI, 2001), wurden Daten mit dem Prozessierungslevel L1R verwendet. Daten dieses Levels sind radiometrisch korrigiert, jedoch weder geometrisch korrigiert, noch sind sie resampled. (USGS, United States Geological Survey, 2001).

Zur Zuordnung der Testflächen, die durch die Landwirtschaftskammer Hannover bereitgestellt wurden, war eine Georeferenzierung der Szene unerlässlich. Durch Festlegung von 62 Referenzpunkten mittels der Topographischen Karte 1:50000 für Niedersachsen wurde ein Resampling der Methode „Nearest-Neighbour“ durchgeführt. Da hier die Grauwertzuordnung nach dem Kriterium der nächsten Nachbarschaft geschieht, ist gegenüber anderen Verfahren die höchste Erhaltungsstufe der Grauwerte des Originalbildes zu erwarten (RICHARDS, 1999). Die Pixelgröße wurde mit 30 x 30 m<sup>2</sup> gewählt, um die Sensorauflösung nicht zu unterschreiten und somit ein Duplizieren von Grauwerten zu provozieren. Die Innere Genauigkeit der Entzerrung betrug 0,53 m, die Kontrolle an zehn unabhängigen Kontrollpunkten ergab einen mittleren Fehler von 6,2 m.

### 3.2 Festlegung der Trainingsgebiete

Durch die Landwirtschaftskammer Hannover wurden Forstdatenbanken zur Verfügung gestellt, die durch das Programm ArcView das Erstellen von Trainingsgebieten zulassen. In der flächenhaften Gliederung nach Gemarkung / Abteilung / Unterabteilung und Unterfläche sind die Bestandsschichten nach Hauptbaumart und zugehöriger Angabe über Teilflächenprozent



und Altersdurchschnitt nachgewiesen zum Aufnahmezeitpunkt 1990. Jedoch gibt es keinerlei Angaben über die Dichte des Bestandes mit Kronenabschlussgrad und dem Bodenbewuchs. Um zunächst von reinen Trainingsgebieten ausgehen zu können wurde lediglich auf Flächen trainiert, deren Hauptbaumart zu 100 % in einer einzigen Bestandsschicht angesiedelt war.

Die gefundenen Trainingspixel pro Baumart spiegeln das regionale Vorkommen der Baumart in der Region Hannover wieder. So ergab sich die Zusammensetzung der Trainingsgebiete wie folgt:

- 73 % Fichte (Fi)
- 16 % Buche (Bu)
- 6 % Eiche (Ei)
- 3 % Bergahorn (Bah)
- 1 % Esche (Es)
- 1 % Roterle (Rerl)

### 3.3 Signaturentraining

Ausgehend von diesen Trainingsflächen wurde das Signaturentraining iterativ durchgeführt. An identischen, laut Datenbank, reinen Pixeln wurde bis Iteration 10 das Verhalten der Signaturen ableitung für die beiden am häufigsten vertretenen Baumarten Buche und Fichte beobachtet und dokumentiert. Angegeben in Prozent sind jeweils folgende Klassen:

- richtig detektierte Pixel (valid det.)
- fälschlich nicht detektierte Pixel (missing det.)
- falsch detektierte Pixel (false det.) - aus Trainingsgebieten der anderen Baumarten

Die berechneten prozentualen Werte beziehen sich jeweils auf die Gesamtheit der maximal möglichen Menge an Pixeln pro Klasse.

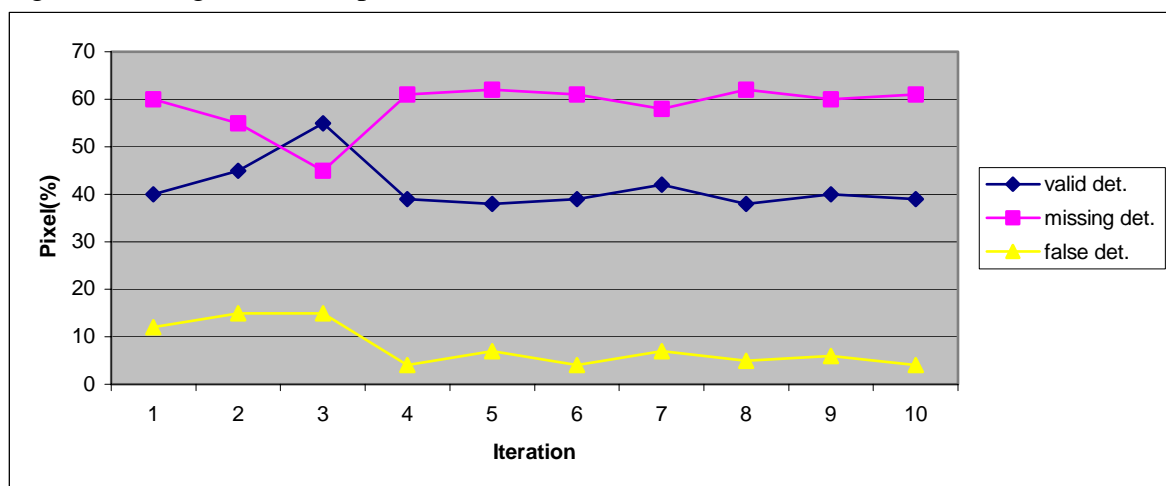


Abb. 2 : Iterative Signaturen ableitung der Baumart Buche

Da beide Untersuchungen im Ergebnis zeigen, dass eine Iteration bis Schritt 4 nachhaltige Verbesserungen der Signatur erwarten lässt, wurden die übrigen genannten Signaturen bis dorthin entwickelt. Als Grundlage eines Vergleichs der Subpixelanalyse mit einem traditionellen Klassifizierungsansatz wurde mit identischen Trainingsgebieten eine überwachte Klas-

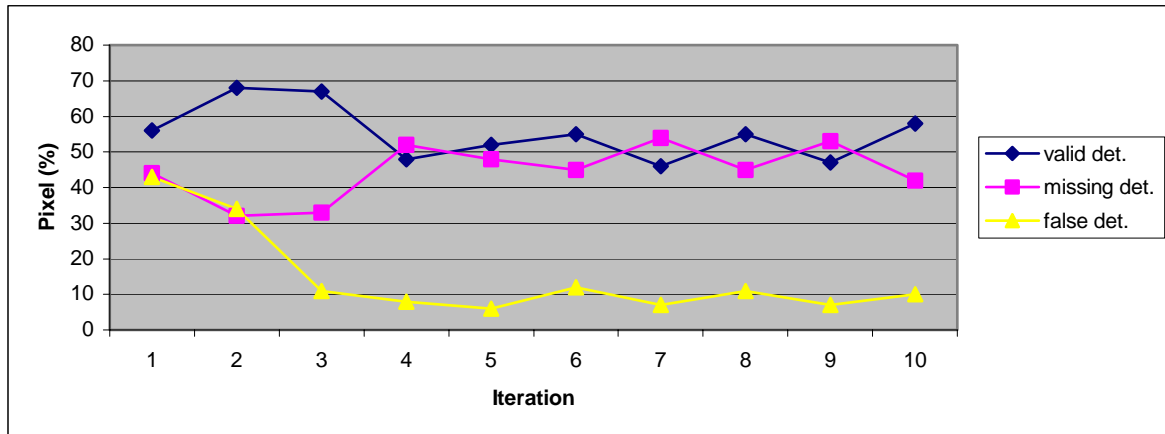


Abb. 3 : Iterative Signatureableitung der Baumart Fichte

sifizierung nach der Maximum – Likelihood – Methode durchgeführt. In einem zweiten Ansatz wurden Signaturen bereits auf Subpixelebene entwickelt, auf Flächen, deren Hauptbestand nur 60 bis 80 % des Gesamtbestandes beinhalten. Auch hier wurde parallel eine überwachte Klassifizierung der Methode Maximum – Likelihood durchgeführt, ebenfalls ausgehend von identischen Trainingsflächen.

### 3.4 Auswertung

Der Vergleich der beiden Algorithmen wurde durchgeführt an Beständen des niedersächsischen Staatswalds, dessen Datengrundlage das Niedersächsische Forstplanungsamt in Wolfenbüttel zur Verfügung stellte. Auch diese Daten wurden im ArcView – Format zur Verfügung gestellt mit Datenbanken, deren Inhalt an Details reichhaltig ist. Aufnahmezeitpunkte der Referenzdaten waren je nach Forstamtsbezirk variabel die für Jahre 1990 bis 2000. Neben der bestandsmässigen Zuordnung in Hauptbestand, Nachwuchs, Unterstand und Überhalt sind hier auch Angaben über die Mischungsart, wie zum Beispiel truppweise, horstweise oder flächenweise, sowie Angaben zum Vorbestand und Schäden nachgewiesen. Auch sind Daten zum Bestockungsgrad enthalten, der flächenmässig am Boden einen Ansatz zur Bestandsdichte liefert. Angaben zum Kronenabschluss oder zur Art des zu erwartenden Bodensignals sind jedoch nicht niedergelegt. Zum Abschluss wurden fragliche Klassifizierungsergebnisse stichprobenartig in einem Feldvergleich im Deister beurteilt, der sachverständig durch den zuständigen Revierförster unterstützt wurde.

## 4 Ergebnisse

Ausgangspunkt zum Finden der Ergebnisse sind die Forstbestandsdatenbanken über niedersächsische Staatswälder, die zur Verfügung gestellt wurden durch das niedersächsische Forstplanungsamt in Wolfenbüttel. Eine flächenhafte Auswertung des kompletten Ausschnitts war mangels Referenzdaten nicht möglich. Grundsätzlich wurden folgende zwei Ansätze verfolgt. Einerseits kam ein flächenhafter Ansatz zum Tragen, in dem für jeden einzelnen Layer der Klassifizierung einer Baumart über die Pixelanzahl der jeweiligen Testfläche der Anteil der gesuchten Baumart an der Fläche bestimmt wurde. Da jede Baumart unabhängig zu klassifizieren war, sind sowohl positive wie negative Differenzen zu einem Gesamtbestand

von 100 % innerhalb der Flächen aufgetreten. Andererseits wurde grundsätzlich der Bestand der Fläche auf 100 % festgesetzt und die Ergebnisse der flächenhaften Betrachtung nach den einzelnen klassifizierten Baumarten gewichtet. Letzterer Ansatz bietet einen engeren Bezug zur Vergleichsgrundlage der Forstbestandsdatenbanken, da hier jede Fläche pro Bestandsschicht als Summe aller Baumarten den Wert 100% aufweist. Gleichwohl werden so die Vorteile der Subpixelanalyse in Bezug auf eine feinere Differenzierbarkeit der Bestände beschnitten. Um an dieser Stelle jedoch eine Bewertung vornehmen zu können, hätten grossräumig Daten in einem Feldvergleich erhoben werden müssen. Nach Zuordnung der Attribute korrespondierender Flächen aus den Bestandsdaten zu den Satellitendaten wurden die benötigten Flächen als Areas of Interest (AOI) in Form von Polygonen eingerichtet. Die Polygone wurden nach innen gepuffert um Randpixel zu vermeiden. Im Anschluss wurden die Pixel innerhalb der Flächen ausgezählt und je nach Bewertung flächenhaft oder bestandsmässig betrachtet.

## 4.1 Gesamtergebnis

In 59 Testgebieten wurden Pixel ausgewertet und jeweils nach Fläche (SPC) und Bestand (Supervised und SPC(Best.)) bewertet. In der ersten Testreihe wurden Signaturen aus reinen Beständen bewertet, in einer zweiten Testreihe wurden Signaturen entwickelt aus Trainingsgebieten, deren Bedeckung an MOI, nach Aussage der Forstbestandsdaten, ca. 60 % beträgt. Parallel wurde auch hier nach Maximum-Likelihood-Methode eine überwachte Klassifizierung zum Vergleich durchgeführt mit identischen Trainingsflächen. Im Weiteren wurden nur die beiden regional weit verbreiteten Baumarten Buche und Fichte untersucht.

Fehler	SPC	Supervised	SPC (Best.)
Fichte	11,20%	10,30%	10,10%
Buche	33,30%	34,40%	35,90%
Eiche	8,20%	7,80%	7,90%
Bergahorn	18,30%	11,00%	14,40%
Esche	28,20%	29,90%	24,90%
Roterle	4,10%	2,60%	3,90%
Gesamt	17,20%	16,00%	16,20%

Abb.4 : Fehlervergleich aus reinen Trainingsflächen

Aus der Tatsache heraus, dass gemischte Trainingsgebiete verwendet wurden, war zu erwarten, dass das Ergebnis der Subpixelanalyse unter Verwendung der Signaturen aus schwächeren Testgebieten ein deutlich besseres Ergebnis liefert als die überwachte Klassifikation nach Maximum-Likelihood-Methode. Abbildung 5 zeigt, dass die Subpixelanalyse hier nur unwesentlich bessere Ergebnisse bringt auf gleichem Fehlerniveau.

Fehler	SPC	Supervised	SPC (Best.)
Fichte	20,15%	17,35%	18,12%
Buche	23,37%	23,28%	21,73%
Gesamt	21,76%	20,32%	19,92%

Abb.5 : Fehlervergleich aus gemischten Trainingsflächen

Die Signaturen aus gemischten Testflächen wurden, unabhängig zu den „reinen“ Signaturen, getestet auf identischen Flächen, die evaluiert sind durch die Forstbestandsdaten des Niedersächsischen Forstplanungsamtes in Wolfenbüttel. Der Testmenge beläuft sich somit ebenfalls auf 59 Gebiete in den Forstamtsbezirken Deister, Grohnde, Oldendorf und Saupark.

## 4.2 Bewertung

Auf den ersten Blick scheint die erwartete Verbesserung der multispektralen Klassifikation durch den Ansatz der Subpixelanalyse nicht zuzutreffen. Bei Betrachtung des erreichten Fehlerniveaus liegen sowohl der überwachte Ansatz, als auch der Ansatz der Subpixelanalyse auf gleichem Genauigkeitsniveau. Betrachtet man allerdings Ergebnisse der Subpixelanalyse, stellt man fest, dass Aufschlüsse über die Dichte der Verteilung der Bestände durchaus zulässig sind, die aus der überwachten Methode nicht abzuleiten sind. Die Ergebnisse entstammen dem Ansatz der flächenhaften Auswertung.

Bei näherer Betrachtung des Aufnahmezeitpunkts im September 1999 fällt auf, dass die jahreszeitlich bereits einsetzende Verfärbung der Blätter das Klassifikationsergebnis mindert. Hinzukommt, dass zum Aufnahmezeitpunkt im Jahr 1999 eine lang anhaltende trockene Wetterperiode herrschte, welche die Verfärbung der Blätter forciert hat. Die Verfärbung ist allerdings in ihrem Fortschritt regional unterschiedlich ausgeprägt und zudem abhängig vom Alter der beobachteten Bestände, so dass sie nicht als homogen über alle Testflächen zu erwarten ist. Einen weiteren limitierenden Faktor, der ohne Feldvergleich kaum grossräumig bestimmbar ist, stellt der gesundheitliche Zustand der Bestände dar. Die genaue Information über den Vitalitätszustand der Bestände zum Zeitpunkt der Aufnahme ist den Datenbanken über die Forstbestände nicht zu entnehmen. Hier hätte zum Erheben der Daten für die Trainingsgebiete eine Befliegung oder ein Feldvergleich stattfinden müssen, um genaue Erkenntnisse über den Zustand der Trainingsgebiete erlangen zu können.

Die Erkenntnisse des Feldvergleichs zeigen, dass gerade der Einfluss der Sekundärreflexionen Abweichungen des Klassifikationsergebnisses gegenüber den Forstbestandsdaten hervorbringt. Als Gesamtergebnis des Feldvergleichs ist festzuhalten, dass in erster Linie Verjüngungen des Bestandes und auch aufgelichtete Bestände innerhalb der Klassifikation zu Unsicherheiten führen, da diese Informationen nicht vollständig aus den Bestandsdaten ersichtlich sind. Gerade die Bewertung des empfangenen Bodensignals ist hier von hoher Bedeutung, da während der Signaturenableitung die einzustellende Material Part Fraction besser an die Realität innerhalb der Fläche angepasst werden kann. Auch ein Bestand, der mit 100 % in der Forstdatenbank nachgewiesen ist, kann bei einem hohen Anteil an im Satellitenbild sichtbarer Bodenvegetation als Trainingsfläche ausfallen. Ein Feldvergleich innerhalb der gewählten Trainingsflächen, der zeitgleich mit der Aufnahme der Satellitenbilddaten durchgeführt wird, hat durch die genaue Kenntnis der Realität eine unmittelbare Auswirkung auf die Qualität der abgeleiteten Signaturen. Das Durchführen von Feldvergleichen zur Sicherung der Qualität abgeleiteter Signaturen wird in der Literatur im Zusammenhang mit der Auswertung von Luftbildern bei der Subpixelanalyse empfohlen [HUGUENIN et al., 1997].

Nach Bearbeitung der LANDSAT – Daten wurde testweise, als Stichprobe zum Vergleich eine Unterscheidung von verschiedenartigen Baumarten an einem CIR-Orthofoto durchgeführt. Das verwendete Orthofoto fällt in den Bereich, der durch die Forstbestandsdaten der Landwirtschaftskammer Hannover nachgewiesen ist. Die Auflösung beträgt  $30 \times 30 \text{ cm}^2$  bei einem Umfang von  $9841 \times 10779$  Pixeln. Bei Übertragung der Ergebnisse der Subpixelanalyse aus Orthofotos in Satellitenbilder ist grundsätzlich eine höhere Qualität der Testgebiete zu erreichen. So können ausgedehnte zusammenhängende Bestände einer Baumart, die im Orthofoto mit einer hohen Material Part Fraction erkannt wurden, eine hohe Sicherheit für die zum Signaturentraining benötigten Testgebiete in Satellitendaten geben. Zu beachten ist an

dieser Stelle jedoch, dass die Aufnahmezeitpunkte von Orthofoto und Satellitenbild in zeitlichem Zusammenhang stehen müssen. Diese Forderung war in der vorliegenden Arbeit nicht erfüllt, so dass weitere Aussagen hinsichtlich der Übertragbarkeit nicht gemacht werden können.

## 5 Ausblick

Als Fortführung der Untersuchung sind Fragestellungen von Interesse, die im Zusammenspiel von Forstbestandsdatenbanken, Luftbildanalysen und Feldvergleichen Signaturen höchster Qualität liefern. Des weiteren ist in diesem Zusammenhang sicher die Qualität von übertragenen Signaturen zu untersuchen. Denkbar ist der Signaturentansfer sowohl vom Luftbild in ein Satellitenbild, als auch von Satellitenbildern zueinander. Von grosser Bedeutung ist hier jedoch der enge zeitliche Zusammenhang, der gerade für Vegetationsanalysen sicherzustellen ist, da die Spektraleigenschaften von Vegetation erheblichen jahreszeitlichen Veränderungen unterworfen ist. Die Möglichkeit eines Signaturentfers rechtfertigt in einer operationellen Anwendung die durch den Feldvergleich entstehenden Kosten, da eine Anwendung der Signatur in verschiedenen Szenen und geographischen Regionen zulässig ist. Auch ein temporärer Transfer ist denkbar unter Beachtung der identischen Vegetationsphase.

Ein großer Vorteil des SPC liegt darin, dass Beurteilungen der Bestandsdichte und der Verteilung des Bestandes über die untersuchte Fläche möglich werden und für die Anwendung des Forstmonitorings von großem Interesse sind. Die alleinige Verwendung von Forstdatenbanken reicht allerdings nicht aus, um das Potential des SubpixelClassifiers voll auszuschöpfen, da Informationen über den Kronenschlussgrad und die Bodenvegetation der Bestände fehlen. Die Ergebnisse der Untersuchungen am Orthofoto und insbesondere des Feldvergleichs zeigen jedoch, dass unter erweitertem Einsatz dieser Hilfsmittel ein günstigeres Fehlerniveau der Subpixelanalyse zu erwarten ist.

## 6 Literaturverzeichnis

AAI : [http:// www.discover-aai.com / subpixel.htm](http://www.discover-aai.com/subpixel.htm), Januar 2001

HUGUENIN, R., KARASKA, M., VAN BLARICOM, D., JENSEN, J. (1997) : Subpixel Classification of Bald Cypress and Tupelo Gum Trees in Thematic Mapper Imagery – Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol.63, No.6, 1997

RICHARDS, J.A., JIA, X. (1999) : Remote Sensing Digital Image Analysis – Springer, Heidelberg, 1999

SCHOWENGERDT, R. (1997) : Remote Sensing, Models and Methods for Image Interpretation – Academic Press, San Diego, USA, 1997

USGS : [http:// landsat7.usgs.gov / 17\\_processlevels.html](http://landsat7.usgs.gov/17_processlevels.html), Juni 2001

# LIDAR Höhenmodelle und digitale Orthobilderstellung

UWE LOHR<sup>1</sup>

## **Zusammenfassung**

Die Nachfrage nach Höhenmodellen, die mit Laserscanning (LIDAR) erzeugt wurden, hat in den letzten Jahren stark zugenommen. Das Spektrum der Anwendungen steigt stetig, was sich auch in der Anzahl der operationell eingesetzten LIDAR Systeme niederschlägt. Zu den Kunden zählen sowohl Industrie (Telekommunikation, Energieversorger,...) wie auch die Öffentliche Hand (Vermessungsämter, Gewässerdirektionen,...).

Zunehmend werden jetzt gleichzeitig mit den LIDAR Daten auch Daten anderer Sensoren (digitale Kamera, Zeilenscanner,...) aufgezeichnet. Dadurch werden neue Produkte bei kurzen Lieferzeiten möglich und die Attraktivität der LIDAR Technik weiterhin gesteigert.

## **1 Stand des Laserscannings**

Zur Erfassung digitaler Höhendaten ist Laserscanning (oft auch LIDAR) Technik heute ein etabliertes Verfahren. Flugzeuggetragenes Laserscanning ist besonders effizient, wenn es um die schnelle und kostengünstige Erfassung größerer Gebiete geht. Eines der über mehrere Jahre laufenden Großprojekte war die Erfassung der gesamten Niederlande, aber auch in Deutschland herrscht beständige Nachfrage über Tausende von km<sup>2</sup> Höhendaten pro Jahr.

Stärken des Laserscannings gegenüber anderen Verfahren zur Höhenmodellerzeugung sind:

- aktiver Sensor  
benötigt kein extrem schönes Wetter zur Datenerfassung,  
kann auch nachts geflogen werden
- teilweise Durchdringung des Blätterdachs  
daher kann trotz Vegetation ein Bodenmodell erstellt werden
- durchgängig digitale Datenerfassung und -verarbeitung  
damit kurze Lieferzeiten, auch für größere (> 100 km<sup>2</sup>) Gebiete

### **1.1 Systeme**

Der Bedarf an digitalen Höhenmodellen hat in den letzten Jahren rasant zugenommen. Dieser Trend spiegelt sich auch in der Anzahl der installierten Systeme wieder (Flood, 1999, 2001):

	neue Systeme (pro Jahr)	operationelle Systeme (kumuliert)
1998	9	20
1999	18	38
2000	17	55
2001	18	73

<sup>1</sup> Dr. Uwe Lohr, TopoSys GmbH, Wilhelm-Hauff-Str. 41, 88214 Ravensburg,  
Tel: 0751/3660512, Fax: 0751/3660531, email: [u.lohr@toposys.com](mailto:u.lohr@toposys.com)

Jedoch sind diese Systeme technisch nicht gleichartig – es gibt mehrere Hersteller und in der Regel sind die Systeme für bestimmte Anwendungen optimal einzusetzen. Dies macht es dem Anwender nicht leicht zu entscheiden, ob ein System für seine Anwendung das geeignetste ist.

Die Laserscannersysteme verschiedener Hersteller unterscheiden sich unter anderem durch:

- Wellenlänge (Vermessung der Erdoberfläche oder des Meeresbodens)
- Abtastmuster (Zick-zack, elliptisch, zeilenförmig)
- Messpunktdichte (unterschiedliche Detailabbildung)
- Streifenbreite (schmal, groß, überlappend)
- Befliegungshöhe (unterschiedliche Genauigkeiten durch INS)
- Laserenergie (maximale Befliegungshöhe, Augensicherheit)

Moderne Laserscanningsysteme bieten Möglichkeiten wie

- gleichzeitige „First-/Last-Pulse“ Aufzeichnung
- Aufzeichnung der Intensität des reflektierten Laserstrahls
- gleichzeitige Aufzeichnung von Daten anderer Sensoren (Video, Farbbilder, ...)

Einen umfassenden Überblick über Laserscannersysteme und deren Eigenschaften ist zu finden im ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing (1999).

Herstellerspezifisch ist auch die Software für die Verarbeitung der Laserrohdaten zu Höhenmodellen (Oberflächenmodelle DSM, Bodenmodelle DTM). Für die Nachbearbeitung vom DSM kommen verstärkt Softwarepakete auf den Markt, die in Konkurrenz zu denen der Systemhersteller stehen.

## 1.2 Produkte und Anwendungen

Generell können bei Laserscanning folgende Basisprodukte unterschieden werden:

- Digital Surface Model, DSM  
beschreibt die Geländeoberfläche (Oberkante der Vegetation, Dachhöhen der Häuser)
- Digital Terrain Model, DTM  
Bodenmodell, das teilautomatisch aus dem DSM abgeleitet wird

Aus DSM und/oder DTM können dann applikationsspezifische Produkte bzw. Informationen extrahiert werden, z. B. (Erzeugung von Höhenlinien, Bruchkanten, Gebäudemodellen in Vektorform, Vektorisierung von Hochspannungsleitungen,...). Im Umfeld eines GIS bilden DSM, DTM und abgeleitete Produkte Informationsschichten, die mit anderen georeferenzierten Informationen (Flurkarten, Luftbildern,...) thematische Auswertearbeiten unterstützen.

Häufige Anwendungsgebiete für Höhenmodelle aus Laserscanning sind:

- Nachführungsarbeiten für Höhenlinien
- 3D Stadtmodelle
- Überwachung der Küstenzone (Monitoring)
- Simulation von Hochwasser (hydraulische Simulationen)

- Überwachung von offenen Tagebauten und Deponien
- Befliegung von Hochspannungsleitungen (Basiserfassung, Vegetations-Monitoring)

## 2 Befliegung und Verarbeitung

### 2.1 Befliegung

Bei der Befliegung wird das Projektgebiet mit dem Laserscanner in einzelnen, parallelen Streifen vollständig abgedeckt, wobei alle für eine spätere Auswertung notwendigen Daten erfasst werden. Quer zur Flugrichtung überlappen sich die Scanstreifen. Damit die vorgeplanten Flugstreifen möglichst genau eingehalten werden, wird generell zur Flugführung eine Navigationseinrichtung mit dGPS Stützung eingesetzt.

Die Messdaten sämtlicher Sensoren (GPS, Inertial Navigation System (INS), Laserscanner, RGB-Scanner) werden synchron aufgezeichnet. Zusätzlich registriert mindestens eine Bodenstation GPS-Daten für die spätere dGPS Berechnung des Flugpfads.

### 2.2 Erfassen der Höhendaten

Je nach System, erzeugt der Laser unterschiedlich viele Messungen pro Sekunde. Der TopoSys Laserscanner führt 83.000 Entfernungsmessungen in der Sekunde aus. Bedingt durch den Systemaufbau, ist die Messpunktdichte konstant und hängt nur von der gewählten Flughöhe ab. Bei einer Flughöhe von 850 m mit einem Flächenflugzeug bei einer Fluggeschwindigkeit von 60...70 m/s ergibt sich eine mittlere Messpunktdichte von etwa fünf Messungen pro m<sup>2</sup>. Da der TopoSys Laserscanner parallele Scanzeilen erzeugt, sind die Messpunkte regelmäßig über die Erdoberfläche verteilt (siehe Abbildung 1).

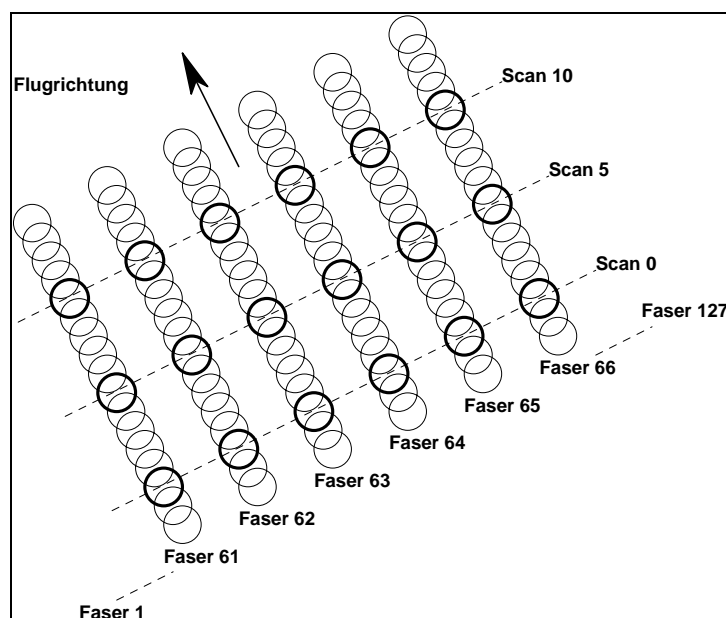
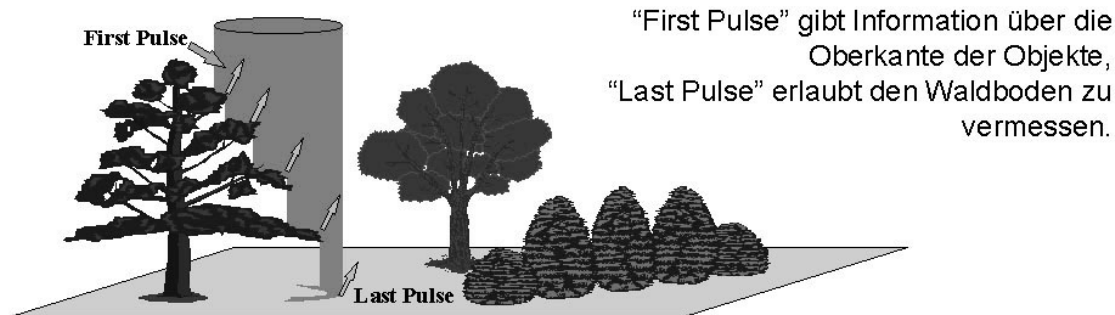


Abbildung 1: Messpunktverteilung (Scan pattern) eines Zeilenscanners



## 2.3 Berechnung des Oberflächenmodells DSM

Das Berechnungsverfahren muss zu den Eigenschaften des Laserscannerystems, den verwendeten Erfassungsparametern und eventuell auch dem zu berechnenden Endprodukt Rechnung tragen. Als Beispiel sei im folgenden die Methodik beschrieben, die bei TopoSys angewendet wird:



Bei grossen Scanwinkel bleiben mehr und mehr Laserpulse in den Kronen der Bäume hängen – immer weniger Messungen kommen vom Boden.

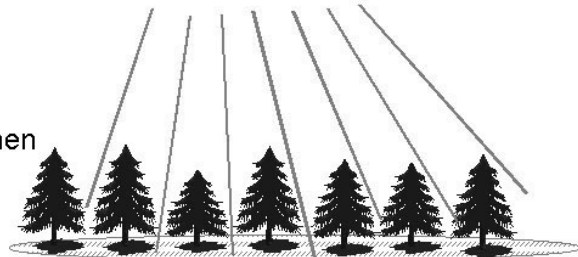


Abbildung 2: First- und Last-Pulse und Scanwinkelproblematik

Der erste Verarbeitungsschritt für TopoSys Scannerdaten ist die Synchronisation der Laserdaten und der Positionsdaten, die beide mit einer genauen GPS Zeit versehen wurden. Die generelle Entscheidung, ob zur Modellberechnung First- oder Last Pulse-Daten verwendet werden, hängt vom gewünschten Endprodukt ab: für ein Bodenmodell DTM werden Last-Pulse Daten, für ein Oberflächenmodell DSM werden dagegen die First-Pulse Daten gewählt. Bei der hohen Messrate des Laserscanners sind benachbarten Zeilen in Flugrichtung nur etwa 0,1 m entfernt. Zum Zweck der Datenreduktion wird am Anfang schon auf eventuelle Fehlmessungen untersucht und die Datenmenge durch Plausibilitätsprüfungen reduziert.

Sind auf diese Weise alle beflogenen Streifen eines Messgebietes in lokalen Koordinaten berechnet, werden die Höhenwerte in das endgültige Raster (meist 1m Gitter) einsortiert; hierbei wird gleichzeitig der beste Repräsentant für diese Gitterzelle bestimmt. Welches der beste ist, hängt von der Anwendung ab: Soll z.B. das Endprodukt ein DTM sein, werden nur die tiefsten Messwerte betrachtet, u.U. auch gemittelt.

Da in allen Arbeitsschritten wesentlich mehr Messwerte vorliegen als schlussendlich benötigt werden, kann auf eine Interpolation zwischen entfernten Werten verzichtet werden.

## 2.4 Filterung der Daten zum DTM (Bodenmodell)

Das Ergebnis der bisherigen Arbeitsschritte ist ein präzises Oberflächenmodell DSM im Zielkoordinatensystem und gewünschten Raster (üblicherweise im 1-m-Raster). In dichter

bewachsenen Bereichen enthält allerdings das DSM noch Restvegetation und Bebauung, die für ein Bodenmodell DTM beseitigt werden müssen.

Für die Beseitigung der restlichen Vegetation und Bebauung sind verschiedenste Verfahren entwickelt worden, die je nach lokalen Gegebenheiten verwendet werden. Generell muss allerdings festgehalten werden, dass niedrige Vegetation (Höhe kleiner 1,5 m) nur sehr schwer automatisch von natürlichen Oberflächeneffekten zu unterscheiden ist. Im allgemeinen können reine Filteralgorithmen ca. 80 % der Vegetation beseitigt werden, der Rest muss interaktiv nachbearbeitet werden.

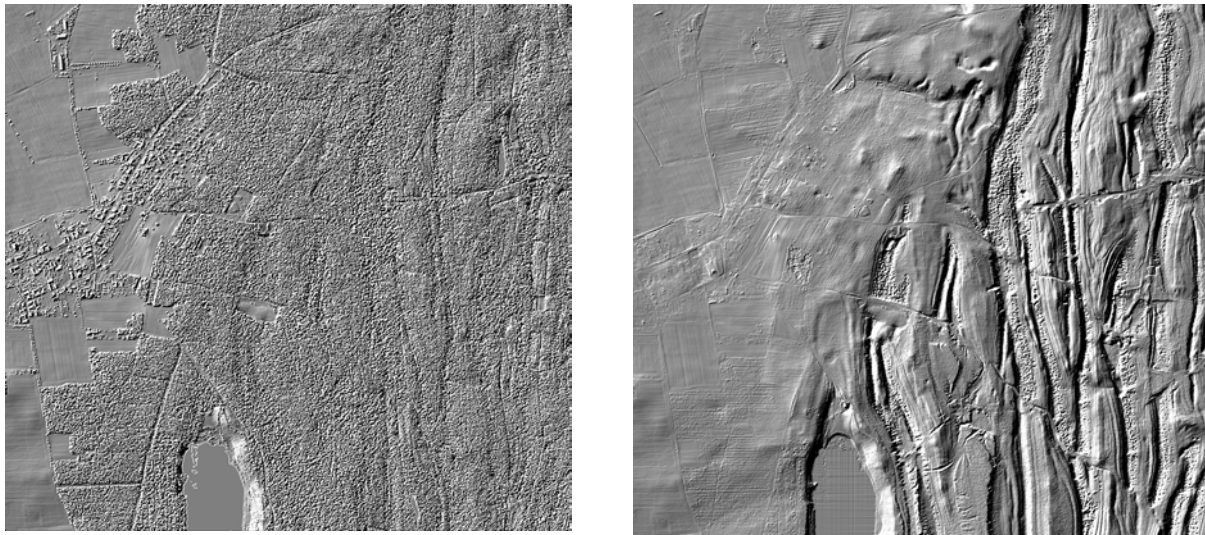


Abbildung 3: Sanierungsgebiet Döbern, Grube "Felix", 2 km \* 2 km, DSM und DTM

DSM und DTM können am Beispiel des Sanierungsgebiets Döbern illustriert werden. Das Gebiet wurde in der vegetationsarmen Zeit Ende April befliegen. Trotz des hohen Grades an Vegetation treffen bei dem gewählten Scanwinkel von +/- 7° eine Vielzahl von Lasermesspunkten auf den Erdboden. Nach Korrelation der Messpunkte sowie Filterung der Vegetationsbereiche ist in den Höhendaten (1m Raster) die durch den Umgang des Braunkohlentiefbaus erschaffene Bruchstruktur nicht nur darstellbar, sondern auch signifikant messtechnisch erfasst.

## 2.5 TopoSys Zeilenscanner

Seit Anfang 2001 ist das TopoSys LIDAR System um einen 4 Kanal Zeilenscanner erweitert worden. Zeitgleich mit den Laserdaten werden Bilddaten mit einer Bildpunktgröße von 0.5m (aus einer Befliegungshöhe von ca. 900 m) aufgezeichnet. Je nach Bedarf können entweder die Bildkanäle getrennt oder als Echtfarb- und/oder Farbinfrarot-Orthobilder (Format z.B. Geo-Tif) geliefert werden. Die folgende Tabelle gibt Eigenschaften des Scanners wieder:

TopoSys Zeilenscanner	
Auflösung	0.5 m
Bildpunktgröße	682
Spektralkanäle	(1) 440 - 490 nm
	(2) 500 - 580 nm
	(3) 580 - 660 nm
	(4) 770 - 890 nm



Abbildung 4: Bild des TopoSys Zeilenscanners



Abbildung 5: 3D Visualisierung des Höhenmodells um „Airbus Industries“, Finkenwerder

### 3 Beispiele aus Projekten

Die folgenden Abbildungen zeigen Höhenmodelle in einem 1m Raster. Um die Höhendaten plastischer erscheinen zu lassen, ist für die Abbildung manchmal eine Reliefdarstellung gewählt. Dieser Algorithmus erzeugt automatisch eine Schummerung der Daten – Schattenzone sind also keine Messlücken, sondern Resultat der Schummerung.

#### 3.1 Stadtmodelle

Auslegung von GSM-Netzwerken, Sichtbarkeitsanalysen für Richtfunkstrecken, städtische Planungsaufgaben, Simulation von Überschwemmungen und Lärmausbreitung sind Aufgaben, bei denen Höhenmodelle aus Laserdaten inzwischen eine wesentliche Datengrundlage bilden. Abbildung 5 zeigt einen Ausschnitt des Stadtmodells Hamburg als 3D Visualisierung. Als Beispiel für Bilddaten des TopoSys Zeilenscanners, die zusätzlich zu den Höhenmodellen geliefert werden können, zeigt Abbildung 4 einen Teil des Stadtgebiets Lindau.

#### 3.2 Küstenschutz

Auf Sylt betragen die Verlagerung der Landmasse ca. 1 Mio. m<sup>3</sup> pro Jahr. Die Gesamtkosten für den Küstenschutz der Insel Sylt betragen ca. 21 Mi. DM pro Jahr. Laserscanning mit gleichzeitigen Peilmessungen dient zur regelmäßigen Erfassung der Erosionen nach den Winterstürmen.

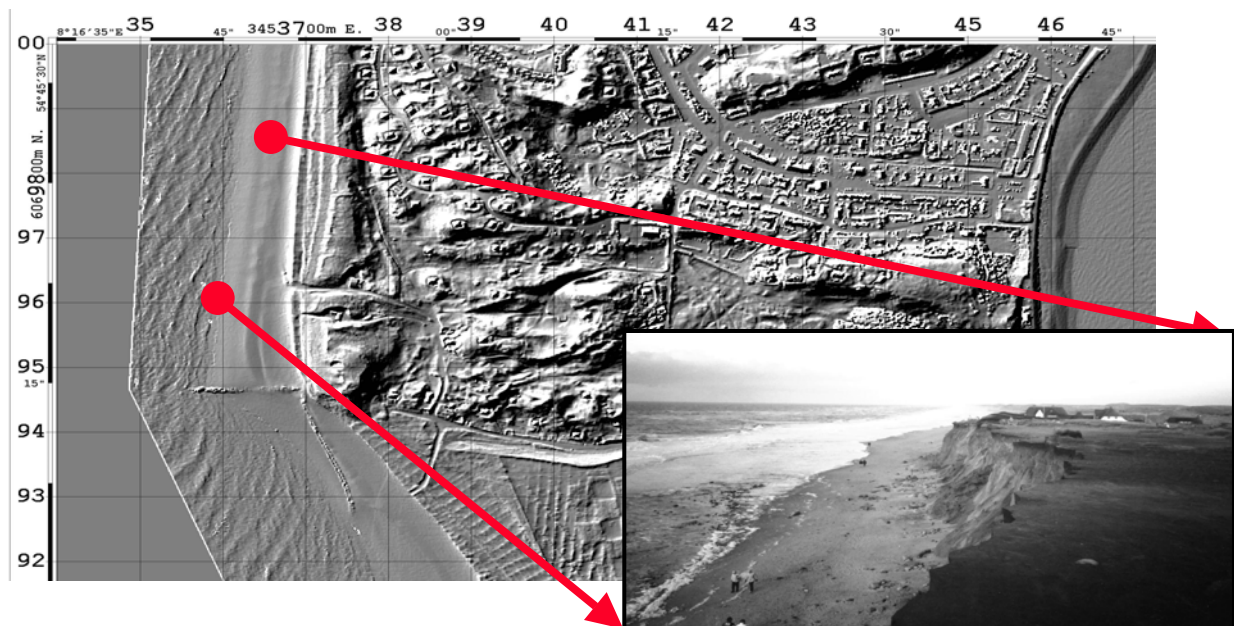


Abbildung 6: Teil des Sylter Kliffs

#### 3.3 Hochwasserschutz

TopoSys Höhenmodelle dienen sehr häufig als Basisdaten für hydraulische Simulationen. Zur Illustration des Detailreichtums, den 1 m Rasterhöhendaten vermitteln, zeigt Abbildung 7 einen Bereich der Oder in Frankfurt/Oder.



Abbildung 7: LIDAR Höhendaten für hydraulische Berechnung am Beispiel Frankfurt/Oder

### 3.4 Vermessen von Leitungskorridoren

Laserhöhendaten, unterstützt durch gleichzeitig aufgenommene Bilddaten (Video, Zeilen-scanner), bilden das Ausgangsmaterial für Bestimmung von Abständen zwischen Leitungen und Objekten (Bäume, Häuser,...), zur Bestimmung von Mastmittelpunkten, Aufhängepunkte der Leitungen usw.

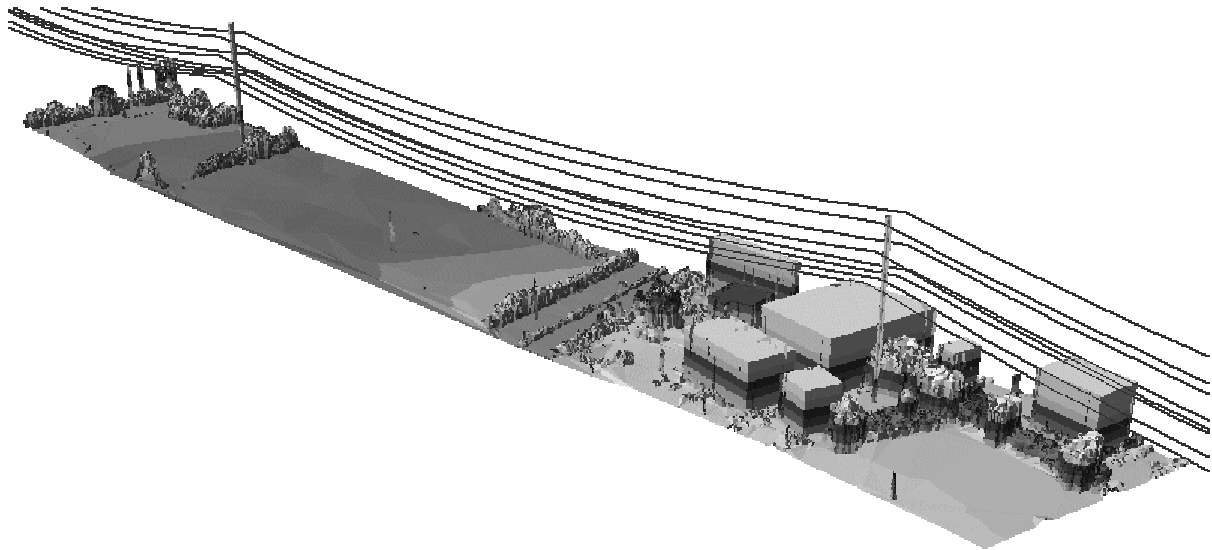


Abbildung 8: 3D-Darstellung von Gelände und Leitungen

## 4 Literaturverzeichnis

FLOOD, M., (1999), Vortrag: "Mapping Surface Structure and Topography by Airborne and Spaceborne Laser", La Jolla, Kalifornien, 9. - 11. November

ISPRS JOURNAL OF PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING, (1999), Volume 54 NOS. 2-3, July 1999, ISSN 0924-2716

# Estimation of Glacier Topography and Velocity Using Correlation Minimization

FRANZ MEYER<sup>1</sup>, OLAF HELLWICH<sup>2</sup>

*SAR interferometry observations are used to measure surface topography and velocity. Due to its high sensitivity to surface movements it is a powerful tool to study geophysical processes like earthquakes, land subsidence, volcanic activities, and glacier flow. Different INSAR and DINSAR techniques are available for these purposes. If a glaciated surface is observed, separation of topography- and displacement-related phase components is mostly performed on the assumption of steady glacial flow over all observation epochs. Unfortunately, the velocity of glaciers can vary significantly even during short time periods. These variations can cause errors of more than 100 m in the processed DEM. The approach presented in this paper improves the separation of topography- and displacement-related phase components. This is achieved by adding gradient and correlation computation to the traditional algorithms in order to estimate the correct ratio of the glacier velocities.*

## 1 Introduction

The ability of radar systems to observe the earth during darkness and through clouds is the reason for the benefits of SAR for the study of ice and snow covered areas, especially in polar regions. This is a considerable advantage of radar systems compared with optical sensors which are often hampered because of prevalence of clouds and fog over snow and ice cover. The unwrapped phase  $\Phi_{unw}$  of a SAR interferogram mainly consists of a topography-related term  $\Phi_{topo}$  and a displacement-related term  $\Phi_{disp}$ . The basic task of differential interferometric SAR (dINSAR) is the separation of topography- and displacement-related phase components  $\Phi_{topo}$  and  $\Phi_{disp}$  in order to derive DEMs or surface velocity maps. Different approaches for dINSAR processing are known whose potentials are tuned with respect to certain tasks. Most of these combine 3 or more SAR images to distinguish the mentioned phase terms or use external DEMs as additional data source.

This paper presents a dINSAR approach for arctic regions based on ERS1/2-SAR tandem data without using additional data sets. The main test site of these investigations is Franz-Josef-Land archipelago which is covered with glaciers to more than 80 %. Due to heavy changes of the physical properties of the surface shape, coherence of the interferometric phase decreases rapidly with time. Thus, interferometric processing of SAR data is impossible after a few days. Considering the repeat orbit frequency of the ERS satellites of 35 days shows that the combination of SAR data acquired from these orbits is not possible due to decorrelation effects. In addition, DEMs resulting from interferometrically processed tandem data are distorted because of glacial flow which reaches up to 40 cm per day. Therefore, computation of DEMs and estimation of surface velocities is not feasible using common processing techniques, unless additional data sets such as DEMs not available.

This paper characterizes a technique called correlation tracking. This approach used correlation information for the separation of topography- and displacement-related phase components.

---

<sup>1</sup> Franz Meyer, Chair for Photogrammetry and Remote Sensing, Technische Universität München, Arcisstr. 21, 80333 München

<sup>2</sup> Dr. Olaf Hellwich, Chair for Photogrammetry and Remote Sensing, Technische Universität München, Arcisstr. 21, 80333 München

The approach is demonstrated using an example located in the Russian high arctic region. This area represents all the obstacles that complicate dINSAR processing, such as high glacification, fast glacier velocities, varying climatic conditions resulting in heavy changes of the physical surface properties, and absence of additional data sources (e.g. available DEMs).

## 2 Correlation Minimizing Approach

Several obstacles in polar regions prevent the correct estimation of surface shape. Therefore, the computation of DEMs and the estimation of surface velocities is not feasible using common processing techniques. Thus, a new procedure for the separation of the mentioned phase components is necessary to solve the problem. Both interferograms used for dINSAR processing are influenced by surface movements. Therefore, separation of the components is not possible without additional information e.g. additional data sources. Due to the remoteness of the observed region we suppose that there are no up-to-date data sets, which are useful for our investigations. Consequently, we try to solve the equations by introducing additional parameters into our equation system.

The presented approach is tested using data showing the outlet glaciers on Hall Island, a center island of the Franz-Josef-Land archipelago.

### 3.1 Assumption of Variable Velocity

In some publications regarding the estimation of surface velocities and the derivation of topography, stable surface movement is assumed to solve the equation system. In this case, one is able to derive surface topography from the unwrapped interferometric phases of two interferograms  $I^1$  and  $I^2$  by solving two linearly independent equations. If  $B_{\parallel}^1 \neq B_{\parallel}^2$ , the equations are given by

$$\Phi_{topo}^1 = \frac{\Phi^2 - \Phi^1}{\frac{B_{\parallel}^1}{B_{\parallel}^2} - 1} \quad \Phi_{disp} = \Phi^1 - \Phi_{topo}^1 \quad (1)$$

Former investigations presented in MEYER & HELLWICH (2001) have shown that this assumption is not correct for the Franz-Josef-Land archipelago. Due to block motion of arctic glaciers, significant velocity variations occur in between the interferometric observations, which leads to errors in the calculated DEM up to the order of 100m. To overcome the uncertainties of the approach of stable glacier velocity a new assumption has to be found that is on the one hand in good agreement with the natural behavior of the observed surface and results on the other hand in an equation system which can still be solved. The introduction of a ratio parameter that describes the temporal variations of glacier flow meets both requirements. It is assumed that the glacier velocities for each observation period are related by a constant ratio. This assumption means that the velocity can vary in time, but the ratio of velocities is constant over the whole glacier surface. The basic relation is represented by:

$$\Phi_{disp}^2 = f \cdot \Phi_{disp}^1 \quad (2)$$

Based on this formula, the new linearly independent equations look as follows:



$$\Phi_{topo}^1 = \frac{\Phi^2 - \Phi^1 - (f-1) \cdot \Phi_{disp}^1}{\frac{B_{\parallel}^1}{B_{\parallel}^2} - 1} \quad \Phi_{disp}^1 = \frac{\frac{B_{\parallel}^1}{B_{\parallel}^2} \cdot \Phi^2 - \Phi^1}{\frac{B_{\parallel}^1}{B_{\parallel}^2} \cdot f - 1} \quad (3)$$

The assumption of a spatially constant ratio of velocities is not a critical assumption, as according to glacier models the flow rate is influenced by parameters like snow loading, temperature, etc. which are almost constant for the whole region. The remaining problem is how to determine the ratio parameter  $f$ . In MEYER & HELLWICH (2001) the correlation coefficient of the gradient images was found to be a good measure for the estimation of  $f$ . The absolute value of the gradient

$$|grad(\Phi)| = \sqrt{\left(\frac{\partial\Phi}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial\Phi}{\partial y}\right)^2} \quad (4)$$

is used for the calculations. Because of the high sensitivity of the interferometric signal to displacement activities of the surface, the gradient of the displacement phase  $\Phi_{disp}$  is much more detailed than that of the topographic phase  $\Phi_{topo}$ . If the separation of the phase components is not correctly conducted, the gradient information of both components is mixed in the gradient image of  $\Phi_{topo}$ . In addition, a differential interferogram without topographic information can be calculated by scaling one interferogram into the geometry of the other.

$$\Delta\Phi_{scaled}^{1,2} = \frac{B_{\parallel}^1}{B_{\parallel}^2} \cdot \Phi^2 - \Phi^1 = \frac{B_{\parallel}^1}{B_{\parallel}^2} \cdot \Phi_{disp}^2 - \Phi_{disp}^1 \quad (5)$$

These two gradient images,  $|grad(\Delta\Phi_{scaled}^{1,2})|$  including the isolated displacement phase and  $|grad(\Phi_{topo}^1)|$  consisting of both, topography as well as displacement related components, can now be compared in a correlation procedure. The images in *Figure 1* show the absolute gradient value of topography and displacement phase in a region where the observed glacier is fast. A visual comparison already shows high correlation; numerical evaluation results in a correlation coefficient greater than 0.85. This proves that the gradient  $|grad(\Phi_{topo}^1)|$  still contains displacement information.

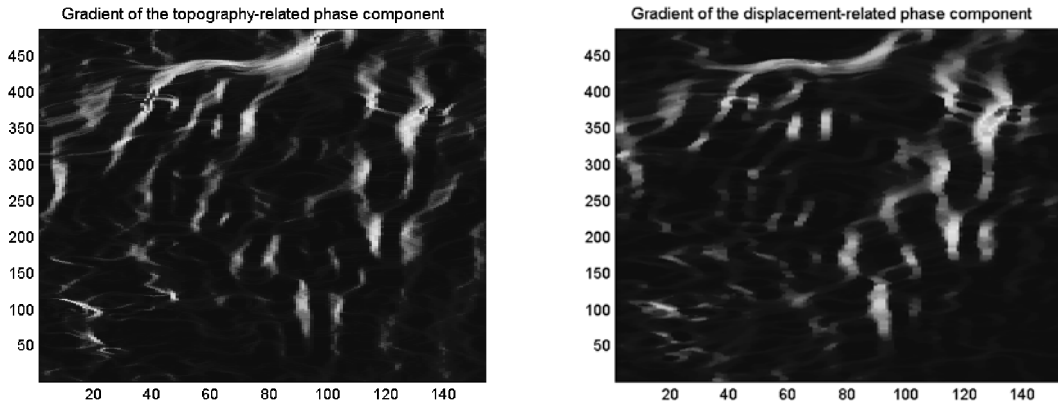


Figure 1: Absolute value of the gradient of topographic and displacement phase

For estimating the correct ratio parameter  $f$ , the correlation information of the gradient images is used. Variation of the ratio of the baselines changes the displacement signal included in the interferometric phase and is consequently linked to a change of the correlation coefficient. The best estimate of the ratio  $f$  should coincide with minimal correlation. This approach finds the real ratio by minimizing the correlation coefficient. To estimate the achievable accuracy all information included in the signal has to be considered.

If the interferometric phases of the interferograms  $I^1$  and  $I^2$  are processed in a differential manner and equation (2) is considered, the resulting interferogram consists of

$$\Delta\Phi^{1,2} = \Phi^2 - \Phi^1 = \Phi_{topo}^1 \cdot \left( \frac{B_{\parallel}^1}{B_{\parallel}^2} - 1 \right) + (1-f) \cdot \Phi_{disp}^2 = \Delta\Phi_{topo} + (1-f) \cdot \Phi_{disp}^2 \quad (6)$$

The gradient of this interferogram  $\Delta\Phi^{1,2}$  is represented by

$$|\text{grad}(\Delta\Phi^{1,2})| = \sqrt{\left( \frac{\partial\Delta\Phi_{topo}}{\partial x} + \frac{\partial(1-f) \cdot \Phi_{disp}^2}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial\Delta\Phi_{topo}}{\partial y} + \frac{\partial(1-f) \cdot \Phi_{disp}^2}{\partial y} \right)^2} \quad (7)$$

The calculated minimum of the correlation coefficient is thus influenced by both the gradient of the topographic phase and the gradient of the displacement phase. The topographic part has to be removed from the signal to get the correct results. Considering the topographic characteristics of glaciers, the components  $\partial\Delta\Phi_{topo}/\partial x$  and  $\partial\Delta\Phi_{topo}/\partial y$  are supposed to be very smooth and can be approximated by an offset and a slope in the gradient plain. The correction can be performed by fitting a tilted plane to the gradient image. The resulting parameters offset, slope and square slope are compared to the gradient image of glacier No. 12 for different values of  $f$  in *Figure 2*.

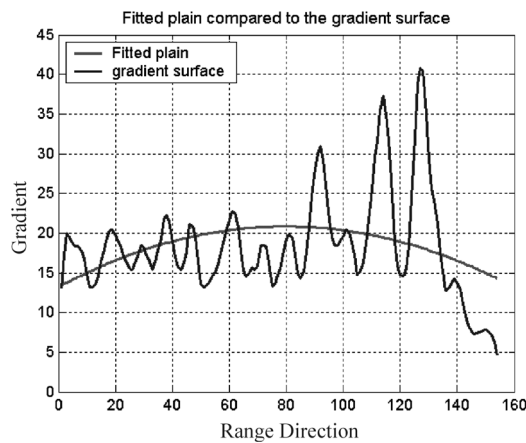


Figure 2: Cut through the gradient plain for each parameter  $f$ , combined with the fitted plain, consisting of an offset, a slope and a square factor

The gradient plain for each value  $f$  is corrected using the adjusted parameters of the plane. The same procedure is applied to the gradient image of the displacement phase such that the signature of the displacement activities is limited to a part of the area of interest.

$$|\text{grad}(\Phi)| \approx \sqrt{\left( \frac{\partial\Phi}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial\Phi}{\partial y} \right)^2} = \sqrt{\left( \frac{\partial(1-f) \cdot \Phi_{disp}^2}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial(1-f) \cdot \Phi_{disp}^2}{\partial y} \right)^2} \quad (8)$$

By changing parameter  $f$ , the pattern of the gradient image is changed, and the correlation procedure provides different results. The correlation equation is given by

$$\rho_{grad1grad2} = \frac{\sigma_{grad1grad2}}{\sqrt{\sigma_{grad1}^2 + \sigma_{grad2}^2}} = \frac{\sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y (grad_1(x, y) - \mu_1) \cdot (grad_2(x, y) - \mu_2)}{\sqrt{\left[ \sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y (grad_1(x, y) - \mu_1)^2 \right] \cdot \left[ \sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y (grad_2(x, y) - \mu_2)^2 \right]}} \quad (9)$$

The correlation coefficient as a function of the ratio parameter is presented in *Figure 3*. The graph shows a well-defined minimum.

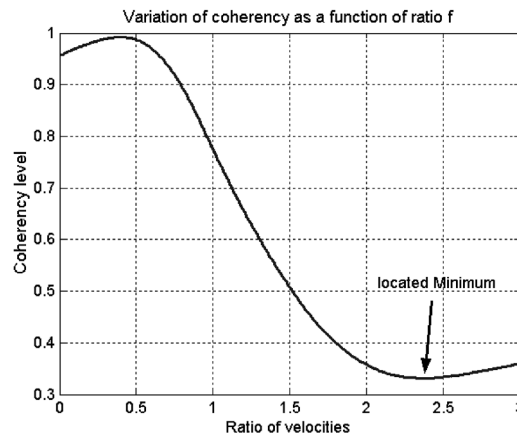


Figure 3: Trend of the correlation coefficient as a function of  $f$

The estimated ratio of the velocities is in this case approximately  $f = 2.35$ . This parameter is used to compute correct topography as well as displacement maps. *Figure 4* shows the calculated topography in relative heights using the new parameter (left side) and the differences between this result and the previous result originating from the approach of constant surface velocity (right side). The height differences reach up to about 100 m where the glacier is flowing fast. The topography in the lower part of the glacier is much smoother than in the map resulting from the first approach. The hill in the upper left part of the image disappeared.

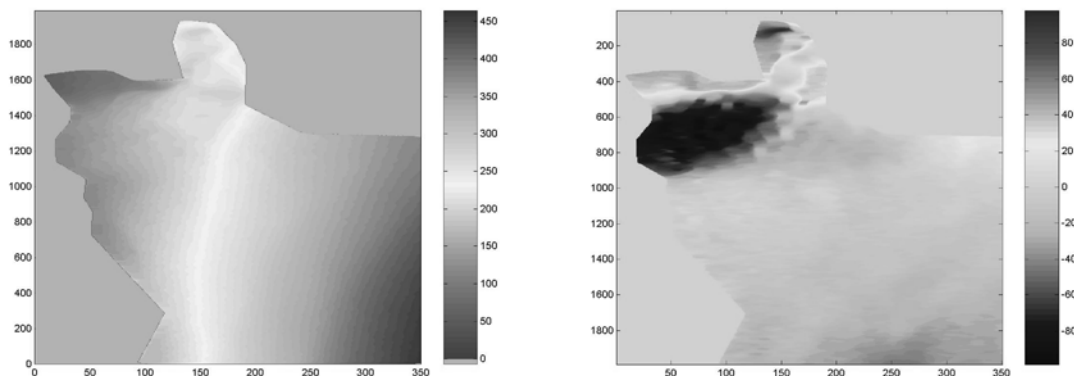


Figure 4: Relative Heights of glacier No. 12 assuming a constant ratio of the surface velocities and the changes in height compared with the previous results

Together with the topography maps displacement images are computed. Two images are generated according to the new approach. One image shows the velocity at observation time 1, the other at time 2. According to the approach the patterns of the images are identical, but the amplitudes are different.

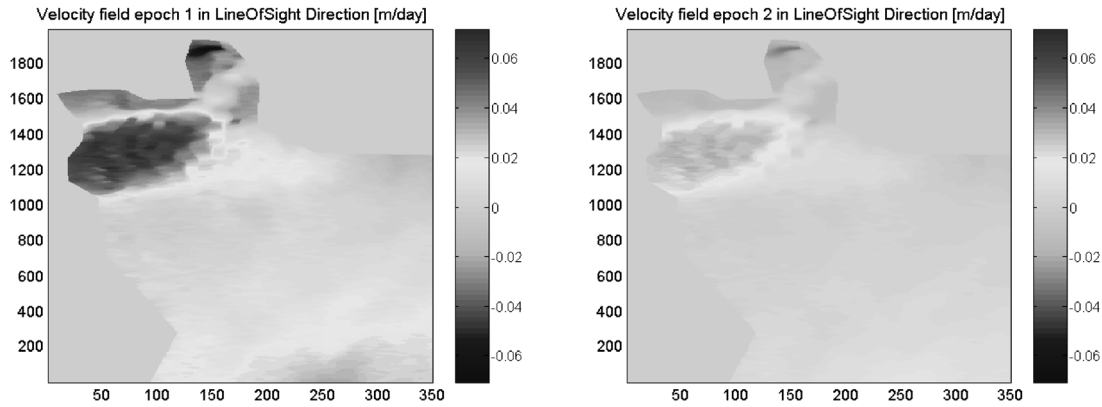


Figure 5: Velocity field at times 1 and 2.

### 3 Estimated Surface Velocities on Hall Island, Franz Josef Land

For a further test the presented technique is applied to several arctic outlet glaciers. Test area for our investigations is Hall Island, a highly glaciated island of the Franz-Josef-Land archipelago. The island is covered by the so called Moscow icecap, which moves mainly along several outlet glaciers. The largest outlet glaciers are clearly observable in a differential interferogram  $\Delta\Phi_{scaled}^{1,2}$  free of topographic influence which is derived by calculating equation

$$\Delta\Phi_{scaled}^{1,2} = \frac{B_{||}^1}{B_{||}^2} \cdot \Phi^2 - \Phi^1 = \frac{B_{||}^1}{B_{||}^2} \cdot \Phi_{disp}^2 - \Phi_{disp}^1 \quad (5)$$

The resulting interferogram is presented in *Figure 6*. The velocities and variation of the velocities of several outlet glaciers on Hall island, FLJ were calculated using the explained technique. This lead to seven independent test sites which raises the significance of statistical evaluations.

#### 2.1 Observed outlet glaciers

The fringe image presented in *Figure 6* shows the moving parts of Moscow icecap. The specific outlet glaciers were identified and labeled using the Russian Glacier Catalogue released by the Institute for Geography of the Russian Academy of Sciences, Volume 3, Part 1, Zemlja-Franza-Josifa.

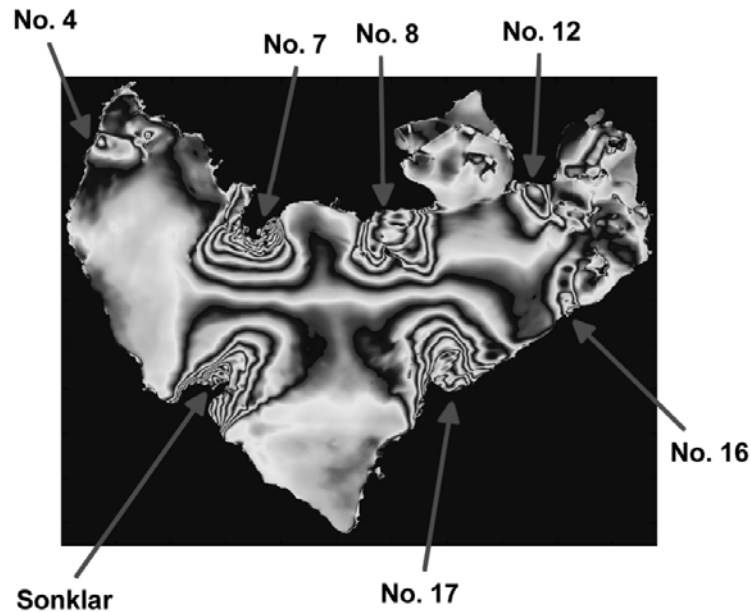


Figure 6: Differential Interferogram of Hall Island, Franz Josef Land, showing the moving outlet glaciers associated with their official names

## 2.2 Results

Two interferograms are involved for each computation. Thus, each velocity is generally derived twice. Unfortunately, the September and the December interferogram arise from very similar baseline constellations (49 m/37 m). The differential interferogram of these data sets contains too few information for the desired calculations. Thus, only the October velocities could be evaluated twice and could be used for accuracy estimation. The results of the process are listed in the following *Table 1* with cm/day as unit.

Glacier	Velocity Sept. 1995 [cm/d]	f	Velocity Oct. 1995 [cm/d]	Velocity Dec. 1995 [cm/d]	f	Velocity Dec. 1995 [cm/d] according to SHAROV et al. (2000)
Sonklar	34.5	0.95	33.2/34.1	29.6	0.83	30.2
No. 12	11.7	1.06	12.1/12.5	11.5	0.90	-
No. 17	23.3	1.06	24.0/24.8	21.0	0.81	18.9
No. 7	50.8	0.8	42.3/40.1	44.7	1.15	47.4
No. 16	7.4	0.82	6.8/7.4	6.7	0.82	-
No. 4	7.2	0.5	2.7/3.3	5.3	1.7	-

Table 1: Estimated glacier velocities of Hall Island outlet glaciers using the correlation tracking algorithm.

The results are very consistent and reveal climatic impact on glacier dynamic. Also good fit of the calculated velocities for Oct. 1995 and the agreement of velocities with the velocities estimated by SHAROV et al. (2000) is evidence for the high potential of the presented technique.

## 4 Conclusions

In the arctic and antarctic region where changing physical properties of the surface and glacier flow complicate the derivation of velocity and topography maps common processing techniques are not feasible to separate of different phase components. Approaches assuming

stable surface velocity are not useful, as the surface velocity can vary significantly in time. The error introduced by assuming stationary surface motion can be significant in regions where the glacier is fast. A better approach is based on the estimation of the ratio of velocities. In this case, the variation of velocity in time is modeled, whereas spatial variation of the ratio is not included. This approach reaches better results, because the assumption is less critical for flowing glaciers. The estimation of the ratio is performed using correlation minimizing for different ratios. The assumption is that the correct ratio  $f$  should minimize the correlation coefficient. The value is affected by the gradient of topography, which is approximated by a tilted plane. Comparisons of different results for one epoch and results from different techniques point out the reliability of the approach.

## 5 References

- CUMMING, J. G., & J. X. ZHANG(1996): “Estimating the Flow Rate of the Lowell Glacier Using ERS Tandem Mode Data”, Proceedings FRINGE96
- GABRIEL, A. K., GOLDSTEIN R. M. & ZEBKER H. A. (1989): „Mapping small elevation changes over large areas: differential radar interferometry”, *Journal of Geophysical Research*, 94(B7), 9183-9191
- HOOKE, R. LeB., CALLA, P., HOLLMUND, P., NILSSON, M. & STROEVEN, A. (1989): “A 3 Year Record of Seasonal Variations in Surface Velocity, Storglaciären, Sweden”, *Journal of Glaciology*, Vol. 35, No. 120
- Institute for Geography of the Russian Academy of Sciences, “Russian Glacier Catalogue”, Volume 3, Part 1, Zemlja-Franza-Josifa (1965)
- JOUGHIN, I. R., KWOK & FAHNESTOCK, M. (1996): “Estimation of ice-sheet motion using satellite radar interferometry: method and error analysis with application to the Humboldt Glacier, Greenland”, *Journal of Glaciology*, 42(142), 564-575
- MADSEN, S. N. & ZEBKER, H. A. (1998): “Imaging Radar Interferometry”, *Principles & Applications of Imaging Radar, Manual of Remote Sensing, Third Edition, Volume 2*, John Wiley and Sons, Inc.
- MEYER, F. & HELLWICH, O. (2001): “Experiments on the Optimization of traditional DINSAR approaches for the use in polar regions”, Fourth International Symposium “Turkish-German Joint Geodetic Days”, Berlin, 3-6 April 10 p. (in print).
- PATERSON, W. S. B. (1994): “The physics of glaciers. Third edition”, Oxford, etc., Elsevier
- RIGNOT, E., FORSTER R. & ISACKS, B. (1996): “Mapping of glacier motion and surface topography of Hielo Patagónico Norte, Chile, using satellite SAR L-band interferometry data, *Annals of Glaciology*, 23, 209-216
- RIGNOT, E. R. & MacAYEAL, D. R. (1998): “Ice-shelf dynamics near the front of the Filchner-Ronne Ice Shelf, Antarctica, revealed by SAR interferometry”, *Journal of Glaciology*, Vol. 44, No. 147
- SHAROV A. I., RAGGAM, H., SCHARDT, M. (2000): “Satellite Hydrographic Monitoring along the Russian Arctic Coast”, *International Archives of Photogrammetrie and Remote Sensing*, Vol. XXXIII, Part B4, Amsterdam
- SHAROV, A. I. & Gutjahr, K. H. (2001): “Some methodological enhancements to INSAR surveying of polar ice caps”, *Proc. of the 21<sup>st</sup> EARSeL Symposium, Paris*, 8 p. (in print)
- WEGMÜLLER, U. & STROZZI, T. (1998): “Characterization of Differential Interferometry Approaches”, *Proc. of EUSAR '98, 25-27 May 1998, Friedrichshafen, Germany*
- ZEBKER, H. A., WERNER, C. L., ROSEN, P. A. & HENSLEY, S. (1994): “Accuracy of topographic maps derived from ERS-1 interferometry”, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, GE-32(4), 823-836

# Bayes Ansatz zur Fusion multitemporaler Landsat 7 Daten innerhalb einer Landnutzungsklassifizierung

MARINA MÜLLER<sup>1</sup>, MICHAEL WINKLER<sup>1</sup> & KARL SEGL<sup>1</sup>

*Abstract: Land cover maps are essential basic information for a variety of applications, e.g. within the development of hydrological models for flood prediction. However, existing digital land cover data are either out of date, of a too low spatial resolution, or even partly incorrect. Already existing classification techniques proved that it is possible to derive up to date land cover information from Landsat scenes. Yet, automatic or semi-automatic approaches which are necessary for regular updates of land cover maps do not guarantee classification results with the desired degree of correctness due to spectrally similar surface cover types. In order to achieve higher accuracies, a new Bayesian multitemporal approach was developed within this project incorporating temporal information about surface cover types into the decision process of a multispectral Maximum Likelihood classification.*

## 1 Einleitung

Die hier vorgestellte Arbeit ist Teil eines Projekts innerhalb des DFNK (Deutsches Forschungsnetz Naturkatastrophen). Allgemeines Ziel des DFNK ist, die wissenschaftliche Grundlage für ein modernes Risikomanagement von Naturkatastrophen zu entwickeln und potentiellen Nutzern zur Verfügung zu stellen. Innerhalb des Projekts „Satellitengestützte Charakterisierung und Inventarisierung von katastrophenrelevanten Elementen der natürlichen und anthropogenen Landschaftsausstattung“ wird dabei speziell untersucht, inwieweit Fernerkundungsmethoden für die Analyse vor und nach einem Katastrophenereignis eingesetzt werden können. Eine Möglichkeit bietet sich dabei im Bereich der Hochwasservorhersage. Dort werden Landnutzungsdaten als Parameter für hydrologische Modelle eingesetzt. Karten mit diesen Informationen existieren für den deutschen Raum flächendeckend, werden allerdings weitestgehend manuell erstellt. Aufgrund des damit verbundenen Aufwands sind die zeitlichen Abstände bei der Aktualisierung der Daten sehr groß, d.h. es stehen meist nur veraltete Daten zur Verfügung, die je nach Anwendung oft auch nicht die gewünschte räumliche Auflösung besitzen. Zudem sind sie aufgrund von Fehlinterpretationen zusätzlich fehlerbehaftet. Satellitendaten liefern aktuelle Aufnahmen der Erdoberfläche in sehr regelmäßigen zeitlichen Intervallen. Diese können und werden bereits seit längerem zur Erfassung der aktuellen Landnutzung herangezogen (DeFries & Chan, 2000). In Absprache mit unseren Projektpartnern aus dem DFNK-Cluster *Hochwasser* soll nun eine aktuelle Landnutzungsklassifizierung mit Hilfe von Satellitendaten und einer weitestgehend automatischen Klassifizierungsmethode durchgeführt werden. Ein wesentliches Kriterium ist dabei die Qualität des Klassifizierungsergebnisses, was die Analyse existierender Techniken und Entwicklung optimierter Verfahren erforderlich macht.

---

<sup>1</sup> Dipl.-Inform. Marina Müller, Michael Winkler & Dr.-Ing. Karl Segl, GeoForschungsZentrum Potsdam, PB 1.5 Fernerkundung, AB Kinematik und Dynamik der Erde, Telegrafenberg, D-14473 Potsdam, Kontakt: Marina Müller, Tel: +49-(0)-331/288-1198, Fax: +49-(0)-331/288-1192, e-mail: marina@gfz-potsdam.de

## 2 Ansätze zur Landnutzungsklassifizierung

Gängigstes Verfahren zur automatischen Landnutzungsklassifizierung ist nach (Richards, 1993) und (Ediriwickrema & Khorram, 1997) die Maximum Likelihood (ML) Klassifizierung. Die Vorteile dieser Methode wurden bereits häufig beschrieben (Mather, 1985), (Maselli et al., 1995), (Ediriwickrema und Khorram, 1997), zum Beispiel eine Stabilität und statistische Robustheit, unkomplizierte Anwendbarkeit sowie einfache Interpretierbarkeit der Ergebnisse. Allerdings ist die Leistungsfähigkeit des Verfahrens, aber auch die anderer Klassifizierungsmethoden wie Entscheidungsbaum-Verfahren (Belward und Hoyos, 1987) oder Fuzzy-Techniken (Blonda et al. 1991) begrenzt, wenn die Merkmale, auf denen die Klassifizierungsentscheidung beruht, keine eindeutige Zuordnung erlauben. Als Beispiel seien Landnutzungsklassifizierungen genannt, bei denen als Klassifizierungsmerkmale nur die Bänder einer einzigen multispektralen Satellitenszene herangezogen werden. Dabei können sich sehr unterschiedliche Landnutzungsflächen spektral sehr ähneln und im Merkmalsraum nicht zu differenzieren sein, wie an dem Beispiel in Abbildung 1 deutlich wird. Die spektrale Ähnlichkeit hängt insbesondere vom Aufnahmezeitpunkt und der spektralen Auflösung des Sensors ab.

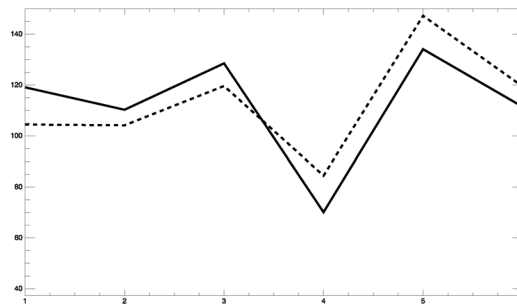


Abb. 1: Beispiel zweier Oberflächenspektren aus einer Landsat ETM Szene – unbedeckter Ackerboden (gestrichelte Linie) und Industriegebiet (durchgezogene Linie).

Falls die Oberflächenmaterialien prinzipiell spektrale Unterschiede erkennen lassen, wäre ein besseres Klassifizierungsergebnis mit Hilfe von hyperspektralen Daten denkbar. Jedoch ist gerade bei den in der Landnutzung gegebenen Klassen oft auch mit hyperspektralen Daten eines einzelnen Zeitpunkts keine eindeutige Entscheidung möglich. Wesentliche Klassen bei der Landnutzung sind zum Beispiel verschiedenste Feldfrüchte. Diese sind aber gekennzeichnet einzig durch ein Mischsignal zwischen Vegetation, d.h. einem Chlorophyllanteil, und dem Bodensignal. Oftmals besitzen unterschiedliche Feldfrüchte zum gleichen Zeitpunkt ein identisches bzw. sehr ähnliches Mischungsverhältnis an Vegetations- und Bodensignal. Damit sind sie spektral, auch mittels eines hyperspektralen Sensors, nicht unterscheidbar, so daß nur Aufnahmen von unterschiedlichen Zeitpunkten die Vegetationszyklen verschiedener Anbauarten offenbaren und damit eine Klassifizierungsentscheidung erst möglich machen. Dies spricht für die Nutzung multitemporaler Information.

Gerade hinsichtlich einer Verwendung der Landnutzungsinformation im Rahmen eines hydrologischen Modells zur Hochwasservorhersage ist ein multitemporaler Ansatz von entscheidender Bedeutung. In der Landwirtschaft werden oft verschiedene Feldfrüchte in unterschiedlichen mehrjährigen Zyklen angebaut. Diese Anbauzyklen werden innerhalb hydrologischer Modelle berücksichtigt. Landnutzungsklassifizierungen, die mittels einer Satellitenszene eines einzigen Zeitpunkts ermittelt wurden, geben jedoch nur die Feldnutzung zu einem bestimmten Zeitpunkt wieder. Eine Aussage über die Anbausituation über mehrere Jahre hin-



weg ist auf Basis dieser Datengrundlage nur schwer möglich. Daher würde eine so berechnete Klassifizierung für ein hydrologisches Modell nur unzureichende Informationen liefern. Satellitenszenen von zwei bis drei Jahren erlauben allerdings, neben einer zuverlässigeren Aussage über die tatsächlich in einem Zeitraum angebaute Pflanze, zusätzliche Aussagen über die Anbauzyklen auf den jeweiligen landwirtschaftlichen Flächen.

Es gibt bereits Verfahren, die zur Erhöhung der Differenzierbarkeit multitemporale Information in der ML Klassifizierung nutzen (Belward und Hoyos, 1987), (Mauser, 1989). Allerdings werden dort beispielsweise alle spektralen Kanäle als Eingangsparameter für die ML Klassifizierung gewählt, was zwar die Differenzierbarkeit zwischen den Klassen verbessert, jedoch ebenfalls die Variabilität innerhalb jeder einzelnen Klassen erhöht. Damit kann wiederum die Vorbedingung für eine ML Klassifizierung - die Normalverteilung aller Klassen im Merkmalsraum – nicht hinreichend erfüllt sein. Dem müßte entgegengewirkt werden, zum Beispiel durch geeignete Bildung von Subklassen. Mauser (1989) begegnet diesem Problem, in dem er nur die vier ersten Komponenten einer Hauptkomponentenanalyse aus den multitemporalen Spektralkanälen als Eingangsparameter für die ML Klassifizierung auswählt. Jedoch ist bei dieser Selektion der Merkmale letztendlich nicht direkt nachvollziehbar, welche spektralen und multitemporalen Parameter für die einzelne Klassenentscheidung ausschlaggebend sind.

Eine andere Variante, die Differenzierbarkeit der Klassen zu erhöhen, aber gleichzeitig den Entscheidungsprozeß transparent zu halten, ist die Nutzung von Vorinformation (a priori Wissen) im Klassifizierungsprozeß (Strahler, 1980). Diese kann in der ML Klassifizierung sehr elegant einbezogen werden, wenn man sich auf die ursprüngliche Formel besinnt, die sich aus der Bayes-Formel ergibt. Allgemein ist die Entscheidungsregel des ML Klassifizierers wie folgt: ein Pixel mit Merkmalsvektor  $x$  wird der Klasse  $\omega_k$  ( $k \in [1, K]$ ,  $K$ : Anzahl Klassen) zugewiesen, falls für  $k$  die Funktion  $g_k(x)$  minimal wird:

$$g_k(x) = \ln|Cov_k| + (x - m_k)' Cov_k^{-1} (x - m_k) - 2 \ln P(\omega_k) \quad (1)$$

dabei sind  $Cov_k$  und  $m_k$  die Kovarianzmatrix bzw. der Mittelwertvektor der Klasse  $\omega_k$  und  $P(\omega_k)$  die a priori Wahrscheinlichkeit der Klasse  $\omega_k$ .

Üblicherweise wird aufgrund fehlender Vorinformation eine Gleichverteilung der Klassen im Bild angenommen und der Term  $-2 \ln P(\omega_k)$  in der Gleichung (1) ignoriert. Jedoch kann diese Vorinformation entweder durch Expertenwissen, aber auch durch weitere Informationsquellen wie zum Beispiel Bodenkarten oder Höheninformationen vorliegen und mittels dieses speziellen Terms bei der Klassifizierungsentscheidung einfließen (Ediriwickrema und Khorram, 1997), (Maselli et al., 1995), (Mather, 1985), (Mesev et al., 2001). Die a priori Information ist dabei als Gewichtung anzusehen: die Klassenzuordnung geschieht im wesentlichen aufgrund der zuvor gewählten – in dieser Arbeit spektralen - Merkmale der ML Klassifizierung, jedoch wird Klassen mit höheren a priori Wahrscheinlichkeiten ein höheres Gewicht gegeben. Damit ist das Vorwissen der ausschlaggebende Faktor, wenn allein aufgrund der gewählten Merkmalsparameter keine eindeutige Entscheidung möglich wäre.

Strahler (1980) ist der einzige, der bisher auch multitemporale Information als Vorinformation herangezogen hat. Allerdings berechnet er die a priori Wahrscheinlichkeit mit einer Gültigkeit für das Gesamtbild. Mesev et al. (2001) erwähnen explizit, daß die Berechnung einer a priori Wahrscheinlichkeit individuell für jeden Pixel nicht sinnvoll sei, da dann bereits durch die a priori Information feststünde, welcher Klasse der Pixel zugeordnet werden sollte. Dies

trifft jedoch nicht zu: wie bereits erwähnt, sollen die a priori Wahrscheinlichkeiten nur als Gewichtungsfaktor dienen, die bei ungewissen Entscheidungen des ML Klassifizierers einen zusätzlichen Hinweis für die korrekte Klassenzuordnung geben. Die a priori Information selbst ist i.allg. kein eindeutiges Entscheidungskriterium für eine Landnutzungsklasse.

Aufgrund der Vorteile multitemporaler Information bzgl. der in dieser Arbeit verwendeten Landnutzungsklassen und der Vorteile eines a priori Ansatzes, ergibt sich der von uns in diesem Projekt propagierte Ansatz.

### 3 Methodik

Die generelle Vorgehensweise ist in Abbildung 2 dargestellt. Es muß zunächst eine sogenannte *Masterszene* aus den gegebenen multitemporalen Szenen bestimmt werden, die klassifiziert werden soll. Alle anderen Szenen dienen nur zur Berechnung der a priori Wahrscheinlichkeit der Klassen, welche sich aus deren zeitlicher Variabilität ergibt. Insgesamt ist der Ansatz in drei größere Prozessierungsschritte unterteilt:

1. eine Vorverarbeitung,
2. die Berechnung der a priori Wahrscheinlichkeiten,
3. die eigentliche Klassifizierung der Masterszene.

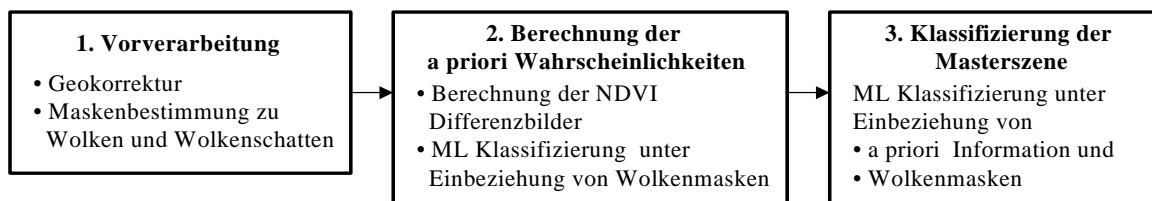


Abb. 2: Prozessierungsschema des Klassifizierungsansatzes

Bevor die einzelnen Schritte gleich etwas detaillierter beschrieben werden, soll zunächst ein weiterer Vorteil des multitemporalen Ansatzes erwähnt werden. Im allgemeinen ist man in der optischen Fernerkundung auf wolkenfreie Szenen angewiesen. Bei einem multitemporalen Ansatz lassen sich Szenen mit teilweiser Wolkenbedeckung trotzdem nutzen, da durch gezielte Auswahl wolkenfreier Information aus anderen Bildszenen diese Informationsdefizite kompensiert bzw. selbst Wolkengebiete in der Masterszene teilweise sinnvoll klassifiziert werden können. Dieser Vorteil wird in dem vorliegenden Ansatz ebenfalls genutzt.

#### 3.1 Vorverarbeitung

Um multitemporale Klassifizierungen durchführen zu können, ist zunächst eine präzise Geokorrektur der Szenen notwendig. In dem hier vorgestellten Projekt dienen z.B. TK 25 der betreffenden Gegend zur Identifizierung geeigneter Paßpunkte, die bei einer Geokorrektur innerhalb einer Standardbildverarbeitungssoftware herangezogen werden. Eine Atmosphärenkorrektur der Daten wird nicht benötigt, da bei der Bestimmung der temporalen Vorinformation die relativen Beziehungen der Daten von unterschiedlichen Zeitpunkten ausreichend sind, wie im folgenden Kapitel ersichtlich wird. Ein weiterer wichtiger Teil der Vorverarbeitung ist allerdings unter Umständen die Bestimmung von Wolken- bzw. Wolken-schattengebieten in den Bildern. Dies erfolgt derzeit noch durch manuelles Maskieren. Jedoch ist ein weiteres Ziel des laufenden Projekts die Entwicklung geeigneter Verfahren zur automatischen Extraktion von Wolken und deren Schattenbereichen.

## 3.2 Bestimmung der a priori Wahrscheinlichkeiten

Ein Parameter, der eine gute Aussagekraft über die zeitliche Variabilität von Landnutzungsflächen besitzt, ist die Vegetation. Das Vorhandensein von Vegetation und der relative Anteil an Vegetation innerhalb eines Pixels läßt sich recht einfach durch Vegetationsindizes bestimmen. Es gibt eine Vielzahl an Indizes, wobei der NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) für nicht aride Gebiete zu dem am häufigsten genutzten zählt (Schowengerdt, 1997):

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{rot}}{\rho_{NIR} + \rho_{rot}} \quad (2)$$

Dabei ist  $\rho_{NIR}$  der Reflektionswert im Nahen Infrarotbereich und  $\rho_{rot}$  der entsprechende Wert im roten Spektralbereich. Da für den hier verfolgten Ansatz nicht der absolute Vegetationsanteil in den Pixeln bekannt sein muß sondern nur relative Vergleiche gezogen werden, ist auch keine Berechnung der absoluten Reflektionswerte und somit auch keine vorherige Atmosphärenkorrektur der Bilder notwendig. Um die a priori Wahrscheinlichkeiten zu berechnen, werden zunächst für jede der vorhandenen n Szenen ein Bild mit den Vegetationsindizes der Pixel berechnet. Um die zeitliche Änderung zu erfassen, werden anschließend alle kombinatorisch sinnvollen Differenzbilder der n Vegetationsindexbilder berechnet und in einem entsprechenden Differenzgesamtbild mit  $d = \sum_{i=1}^{n-1} i$  Kanälen zusammengefaßt. Dieses Gesamt-

bild wird mittels des ML Verfahrens klassifiziert und die erzielten Dichtewerte der Normalverteilungsfunktionen in einem Ergebnisbild mit K Kanälen abgelegt. K entspricht dabei wieder der Anzahl der Klassen. Jeder Kanal repräsentiert dementsprechend die a priori Wahrscheinlichkeit einer der K Klassen, wobei sich dieses Vorwissen allein aus der zeitlichen Variabilität der Klassen ergibt.

Da die ML Klassifizierung eine überwachte Klassifizierungsmethode ist, müssen zuvor Trainingsgebiete für die unterschiedlichen Klassen ausgewiesen werden. Dabei ist gegenüber den üblichen Kriterien bei der Auswahl der Trainingsgebiete - möglichst reine Klassenpixel, wenn nötig Verifikation durch Feldeinsatz vor Ort - noch speziell die zeitliche Komponente zu beachten. Die Testgebiete dürfen ihre Klasse in dem Zeitraum nicht geändert haben, außer die Klassen wurden bereits dynamisch definiert, zum Beispiel als Fruchtfolgen. Damit liegt der Klassifizierung der Szenen generell die Annahme zugrunde, daß die Klassen über dem betrachteten Zeitraum gleich geblieben sind und eine zeitliche Variation nur eine charakteristische Eigenschaft der gewählten Klassen ist. Dies steht im Gegensatz zu Klassifizierungen, wie sie z.B. für Monitoringzwecke eingesetzt werden, die die Klassenänderungen von Pixeln und Regionen über einen größeren Zeitraum analysieren (*change detection*).

Während der ML Klassifizierung werden zusätzlich zuvor berechnete Wolken- und Schattenmasken berücksichtigt. Wie dies im einzelnen geschieht, würde an dieser Stelle zu weit führen und soll in einem späteren Artikel abgehandelt werden.

## 3.3 Klassifizierung der Masterszene

Nachdem nun die a priori Wahrscheinlichkeiten bekannt sind, wird die Masterszene unter Berücksichtigung dieses Vorwissens und gegebenenfalls wieder mit Hilfe der Wolken- und Schattenmasken mittels des komplexeren ML Verfahrens (Gleichung (1)) klassifiziert. Als

Trainingsgebiete können wieder die gleichen Flächen herangezogen werden, wie sie auch schon bei der Klassifizierung des Gesamtdifferenzbildes zuvor angewendet wurden.

## **4 Ergebnis**

### **4.1 Testgebiet**

Untersuchungsgebiet im DFNK-Cluster Hochwasser ist das gesamte Einzugsgebiet des deutschen Rheins. Da dieses Gebiet für eine detaillierte Erstellung einer Landnutzungskartierung bei einer von den Projektpartnern gewünschten Rasterauflösung von 100 m oder besser mittels Satellitendaten den zeitlichen wie auch finanziellen Rahmen des Projekts sprengt, wurde als Testgebiet das Leineinzugsgebiet in Baden Württemberg ausgewählt, das wiederum selbst zum Einzugsgebiet des Rheins gehört. Eine kürzlich durchgeführte Feldkampagne ergab bereits, daß die landwirtschaftlichen Felder in dem Gebiet oft sehr klein strukturiert sind.

Die landwirtschaftlich genutzte Fläche in dem Gebiet unterteilt sich zu ca. 77% in Ackerland, 11% Grünland, etwa 10% Rebland, sowie fast 2 % Obstanlagen. An typischer Ackernutzung in dem Gebiet sind bei Getreide im wesentlichen Winterweizen, Wintergerste bzw. Sommergerste und Mais zu nennen. Bei den Hackfrüchten findet man vor allen Dingen Zuckerrüben und Kartoffeln. Wie bereits in Kapitel 2 erwähnt, werden die Flächen oft in einem mehrjährigen Zyklus bestellt in Abhängigkeit z.B. von aktuellen Subventionsprogrammen. Es gibt eine Vielzahl unterschiedlicher Anbauzyklen, die stichprobenhaft während der Feldkampagne, insbesondere für die ausgewählten Trainingsgebiete, erfaßt wurden. Nicht alle Anbauzyklen werden in der Klassifizierung erfaßbar sein. Jedoch konnten bereits bei den Feldarbeiten einige typische Fruchtwechsel, z.B. zwischen Halmfrüchten, wie Winterweizen, und großblättrigen Pflanzen (Zuckerrüben, Mais), identifiziert werden. Diese Fruchtfolgen sind in den Bilddaten ebenfalls relativ gut zu beobachten und sollten bei einer Klassifizierung auch als eigenständige Klasse berücksichtigt werden.

### **4.2 Datenmaterial**

Ausgangsmaterial für die Klassifizierung bilden derzeit drei LANDSAT ETM Szenen vom 11.9.1999, 30.11.1999 und 12.8.2000. Um die zeitliche Variabilität der Klassen noch besser zu erfassen, wäre zusätzlich noch eine Frühjahrsszene wünschenswert (Mauser, 1989). Allerdings sind die bisher im Archiv des LANDSAT ETM vorhandenen Frühlingsszenen leider relativ stark mit Wolken bedeckt, so daß aufgrund des Kosten-Nutzungsverhältnisses auf die Beschaffung noch verzichtet wurde, obwohl prinzipiell durch den Algorithmus eine Möglichkeit der Nutzung von bewölkten Szenen gegeben ist.

### **4.3 Erste Ergebnisse**

Da die notwendige Feldkampagne gerade erst durchgeführt wurde, können noch keine abschließenden Ergebnisse präsentiert werden. Jedoch sollen an einem kleinen Ausschnitt bereits die Vorteile des multitemporalen Ansatzes gegenüber einer Standard-ML Klassifizierung demonstriert werden. Abbildung 3 zeigt, wie das Klassifizierungsergebnis durch die temporale Information homogenisiert wird, womit sich die tatsächlich im Bild vorliegenden kleinen Feldparzellen deutlich abgrenzen lassen.

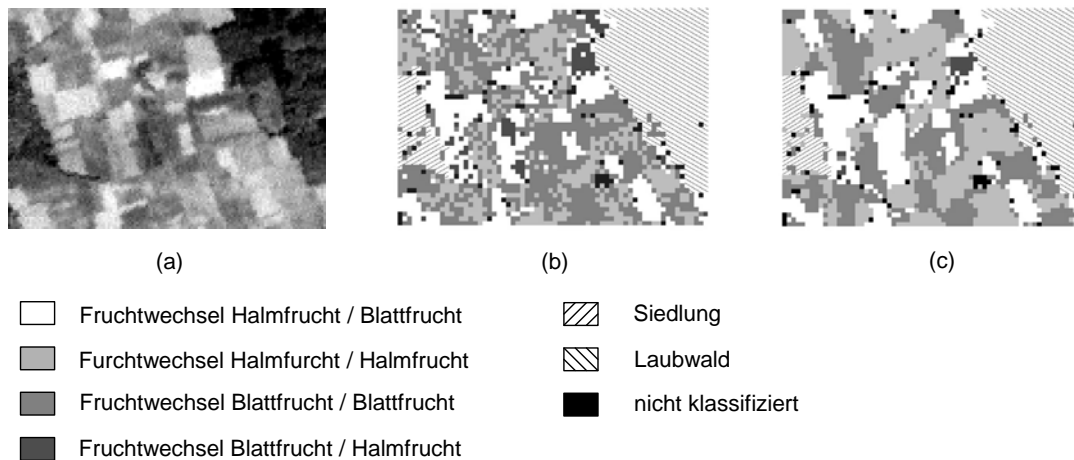


Abb. 3: (a) Panchromatischer Ausschnitt einer Landsat ETM Szene, (b) Standard ML Klassifizierung, (c) ML Klassifizierung mit zusätzlicher multitemporaler Information.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Ziel der Arbeiten in dem vorgestellten Projekt ist die zuverlässige Erstellung einer aktuellen Landnutzungsklassifizierung aus LANDSAT ETM Daten. Um alle Klassen eindeutig voneinander differenzieren zu können, ist die Einbeziehung von multitemporaler Information notwendig. Dies wird in diesem neuen Ansatz dadurch realisiert, daß zuvor aus NDVI Differenzbildern berechnete a priori Wahrscheinlichkeiten im ML Klassifizierungsprozeß berücksichtigt werden. Es konnten leider zunächst nur vorläufige Ergebnisse präsentiert werden, da notwendige Feldkampagnen erst zu diesem Zeitpunkt durchgeführt werden konnten und die Ergebnisse dieser Untersuchungen erst noch in die Arbeit einfließen müssen.

Im weiteren Verlauf des Projekts soll das vorgestellte Verfahren noch stärker verfeinert werden, wobei Zusatzinformation durch eine Frühjahrsszene sowie Höhen- und Bodenkarten wünschenswert wären. Desweiteren werden Vergleiche mit bereits existierenden Verfahren durchgeführt. Das Hauptkriterium bei der Bewertung wird dabei die Genauigkeit der Ergebnisse sein. Schließlich besitzt der LANDSAT ETM zusätzlich zu den multispektralen Bändern auch ein panchromatisches Band mit einer zweimal höheren räumlichen Auflösung. Diese Information wurde in der Klassifizierung bisher nicht genutzt und könnte wertvoll sein hinsichtlich einer Optimierung bisheriger Ergebnisse insbesondere bei einer Postklassifizierung zur Homogenisierung der Landnutzungsflächen.

## 6 Danksagung

Die Arbeit von Marina Müller innerhalb des DFNK-Projekts wird finanziert aus dem Vernetzungsfonds des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF), Projekt Nr. 01SF9969/5.

## 7 Literaturverzeichnis

- BELWARD, A.S. & DE HOYOS, A. (1987): A comparison of supervised maximum likelihood and decision tree classification for crop cover estimation from multitemporal LANDSAT MSS data. - *International Journal of Remote Sensing*, **8**, 2, p. 229 - 235.
- Blonda, P.N., Pasquariello, G., Losito, S., Mori, A., Posa, F. & Ragno, D. (1991): An experiment for the interpretation of multitemporal remotely sensed images based on a fuzzy logic approach. - *International Journal of Remote Sensing*, **12**, 3, p. 463 - 476.
- DeFries, R.S. & Chan, J.C.-W. (2000): Multiple criteria for evaluating machine learning algorithms for land cover classification from satellite data. – *Remote Sensing of Environment*, **74**, p. 503-515.
- Ediriwickrema, J. & Khorram, S. (1997): Hierarchical Maximum-Likelihood Classification for improved accuracies. - *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, **35**, 4, p. 810 - 816.
- Maselli, F., Conese, C., De Filippis, T. & Romani, M. (1995): Integration of ancillary data into a maximum-likelihood classifier with nonparametric priors. - *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, **50**, 2, p. 2 - 11.
- Mather, P.M. (1985): A computationally-efficient maximum-likelihood classifier employing prior probabilities for remotely-sensed data. - *International Journal of Remote Sensing*, **6**, 2, p. 369 - 376.
- Mausser, W. (1989): Agricultural land-use classification in the upper rhine valley using multitemporal TM data. - *Proceedings of the Workshop "Earthnet Pilot Project on Landsat Thematic Mapper Applications"*, ESA SP-1102, p. 191 - 198.
- Mesev, V., Gorte, B. & Longley, P.A. (2001): Modified Maximum-Likelihood Classification algorithms and their application to urban remote sensing. - *Remote Sensing and Urban Analysis*, Kap. 5, Hrsg.: Donnay, J.-P., Barnsley, M.J. & Longley, P.A., Serie: GISDATA 9, Hrsg. der Serie: Masser, I. & Salge, F., London (Taylor & Francis)
- Richards, J.A. (1993): *Remote Sensing Digital Image Analysis – An Introduction*, 2. Aufl., Berlin (Springer).
- Schowengerdt, R.A. (1997): *Remote sensing – models and methods for image processing* - 2. Aufl., San Diego (Academic Press)
- Strahler, A.H. (1980): The use of prior probabilities in Maximum Likelihood Classification of remotely sensed data. - *Remote Sensing of Environment*, **10**, p. 135 - 163.

**Konstanz, 6. September 2001**

Gemeinsame Tagung der DGPF, DLR, ÖVG und SGPBF

**Thema:**

**Einsatz eines GIS im  
Immobilien-Konzern**

**Referent:**

**Verm.-Ass. Dipl.-Ing. M. Petersen**

# Agenda:

**I. Vorstellung der Viterra AG**

**II. GIS- Anwendungsbereiche**

**III. GIS- Projekt**

**IV. Integration GIS und SAP R/3 RE**

**V. Anwendungsbeispiele:**

**V.1. Falk-Plan (Navigationslösung)**

**V.2. Fachschale Flurstücke**

**V.3. Fachschale Gebäude**

**V.4. Fachschale p+e - Flächen**

**V.5. Fachschale Wohnumfeld**



## Immobilien. Service. Beides.



## Wir ...

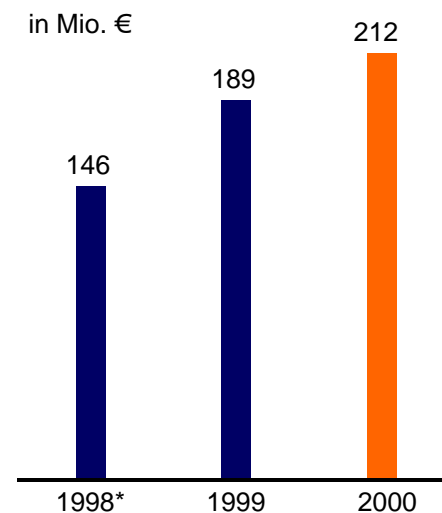
- sind einer der größten private Wohnungsanbieter in Deutschland
- entwickeln Wohn- und Gewerbeimmobilien und bieten *wesentliche immobilienbezogenen Dienstleistungen*
- sind in dieser zukunftsweisenden Kombination Marktführer in Deutschland
- richten unseren Blick nach Europa



## Kennzahlen 2000

- Umsatz: rund 1,3 Mrd. €
- Ergebnis: 212 Mio. €
- Investitionen: 484 Mio. €
- Rund 5.500 Mitarbeiter
- In 27 Ländern vertreten
- Wohnungsbestand:
  - 120.000 eigene
  - 50.000 über Beteiligungen
- Jährlich ca. 1.500 neu erstellte Wohnungen/  
Eigenheime
- 125 Gewerbeimmobilien im Bestand
- Betreut 6,9 Mio. WE allein über  
Viterra Energy Services (Heizkostenabrechnung)

### Ergebnis

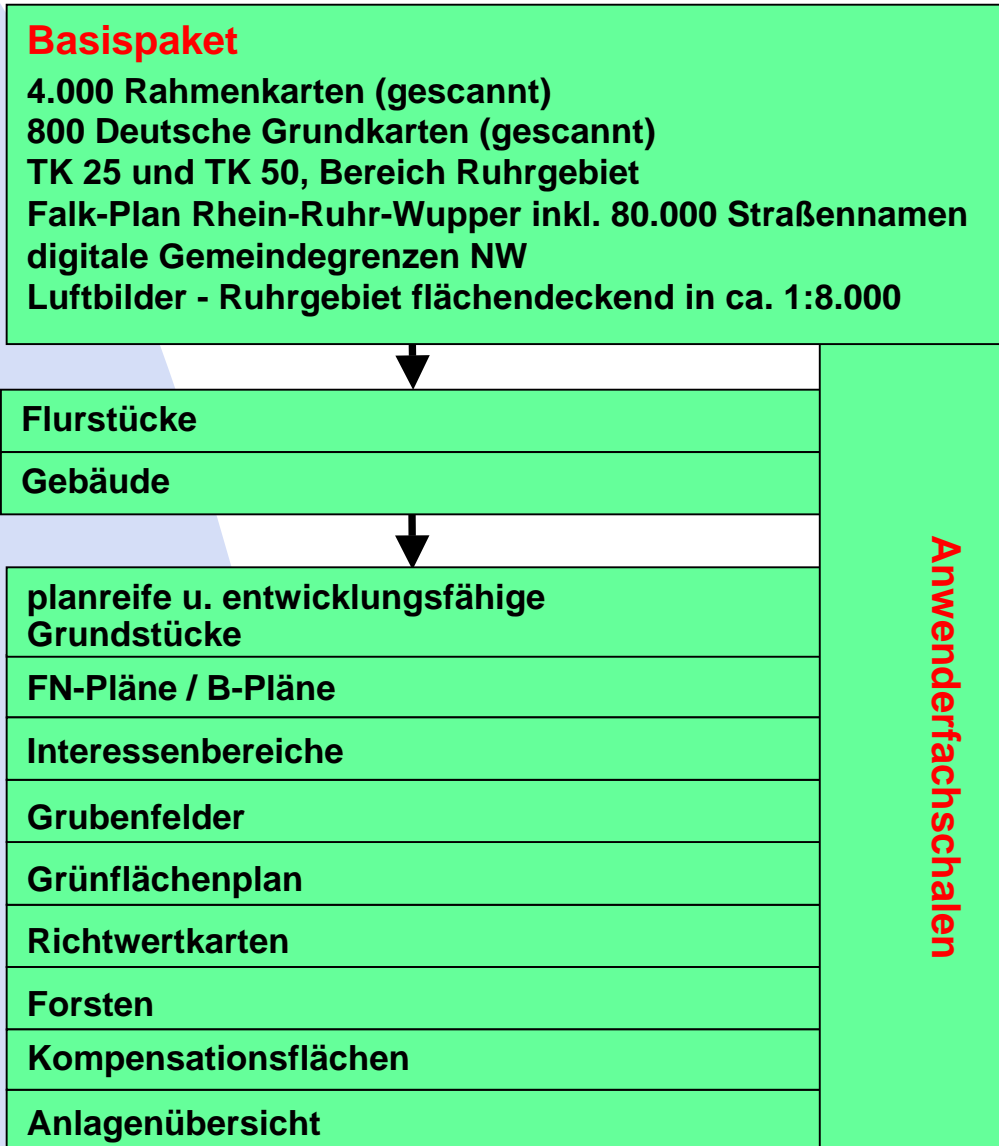


\* gemäß Überleitungsrechnung auf US-GAAP, ohne veräußerte Geschäftsaktivitäten entsprechend der Konzernstruktur per 31.12.1999

# GIS ermöglicht unsere Geschäftsprozesse

- **Objektauswahl der Verkaufssteuerung / -vorbereitung**
- **Verkehrswertermittlung**
- **Grundstücksentwicklung**
- **Abrechnung der Kosten für Landschaftsbaupflege**
- **Zuordnung der Buchwerte**

# GIS



<p><b>Bearbeitungsstand:</b></p>
<p>1996 / 1997 abgeschlossen</p>
<p>1997 / 1998 abgeschlossen</p>
<p>1998 / 1999 abgeschlossen</p>
<p>Datenerfassung seit 2000</p>
<p>1998 abgeschlossen</p>
<p>1998 abgeschlossen</p>
<p>Datenerfassung seit 1999</p>
<p>2000 abgeschlossen</p>
<p>Datenerfassung seit 2001</p>
<p>Datenerfassung seit 2001</p>
<p>Datenerfassung seit 2001</p>

## ***Hard- und Software, Netzwerk***

***Server 110 GB***

***4 Produktionslizenzen***

***20 Server-Auskunftslizenzen***

***ca. 110 Auskunftsarbeitsplätze***

***Fast Ethernet-Netz; 100 MB***

***z.Zt. Roll-out im Intranet, dadurch Zugriff  
für mehr als 100 Mitarbeiter möglich***

# SAP R/3 RE

## Immobilien- verwaltung

### Stammdaten

- Vermietung
- **Liegenschaften**

Mietebuchhaltung  
Mietanpassung  
Betriebs- und Heiz-  
kostenabrechnung  
Wirtschaftlichkeits-  
berechnung

# GIS

und

# SAP R/3 RE

**Basispaket**

- Rahmenkarten (gescannt)
- Deutsche Grundkarten (gescannt)
- Falk-Plan Rhein-Ruhr-Wupper
- digitale Gemeindegrenzen NW
- Luftbilder

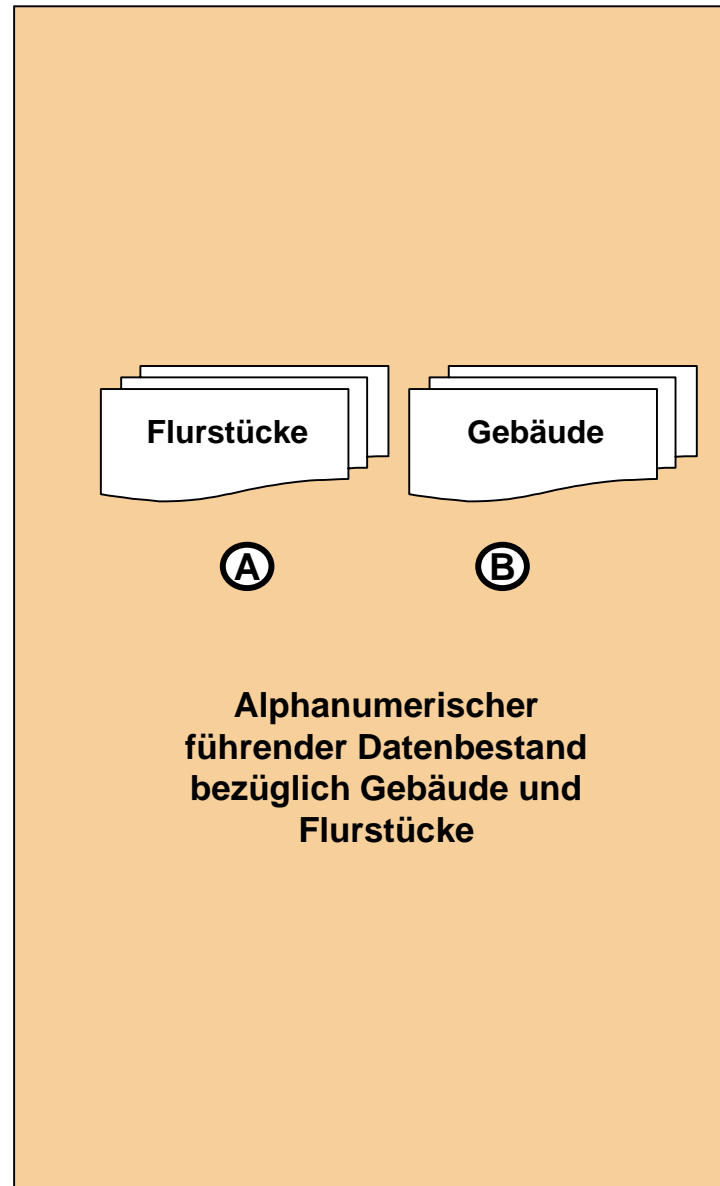
**Anwenderfachschalen**

- Flurstücke
- Gebäude
- planreife u. entwicklungsfähige Grundstücke
- FN-Pläne / B-Pläne
- Interessenbereiche
- Grubenfelder
- Grünflächenplan
- Richtwertkarten
- Forsten
- Kompensationsflächen
- Anlagenübersicht

GIS-connect  
(Online-Schnittstelle)

Ⓐ

Ⓑ





# Falk-Plan Rhein-Ruhr-Wupper

zur Navigation

80.000 Straßennamen

Grafikfenster

**Stadtplan Übersicht**

Es wurden 8 Datensätze gefunden.

Straße:  Nr:  Ort:  PLZ:

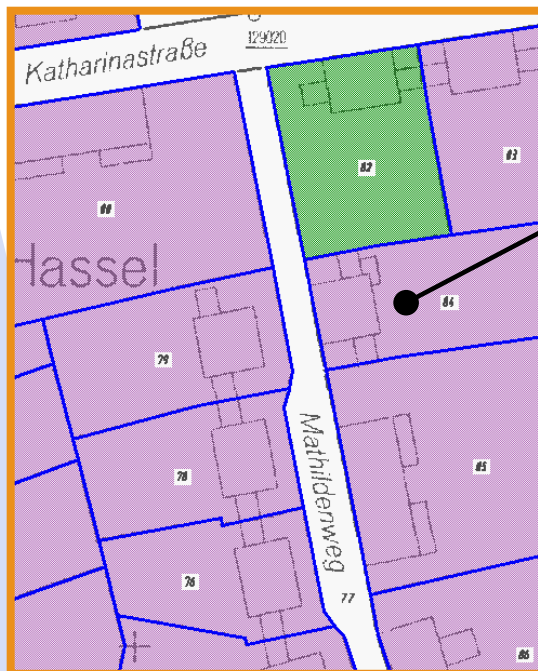
Suchen Anhalten Weitersuchen Abbrechen Säubern Ende

Heinestr.	Bochum	44805
Heinrich-Gustav-Str.	Bochum	44894
Heinrich-Kämpchen-Str.	Bochum	44879
Heinrich-König-Str.	Bochum	44795
Heinrich-König-Str.	Bochum	44797
Heinrichstr.	Bochum	44805
Heintzmansheide	Bochum	44797
Heintzmannstr.	Bochum	44801

Darstellen  Suchquadrate anzeigen

# Digitalisierte Flurstücke

23.000 Flurstücke



[Gis] Flurstück

Ok

Bundesland ? : NRW

Regierungsbezirk ? : Arnsberg

Kreis / kreisfreie Stadt ? : Bochum

Gemeinde ? : Bochum

Gemarkung ? : Wiemelhausen

Flur : 36

Flurstücksnummer : 785

Fläche [m²] : 5608.00

Eigentümer: Raab Karcher AG Veba In

Erbbaurechtnnehmer: [ ]

Wi.-Best. 5608.00 [m²]

Status: -

Miteigentum ?  Erbbaurecht ?

GIS-Mitteilung: [ ]

Fläche: [ ] Setzen Säubern

Nummer: [ ]

Abgangsflächen: [ ] Setzen Säubern

Zugangsflächen: [ ] Setzen Säubern

Eigentümer | Erbbaurecht | Miteigentum | Objekt Info

Einfügen | Ändern | Löschen

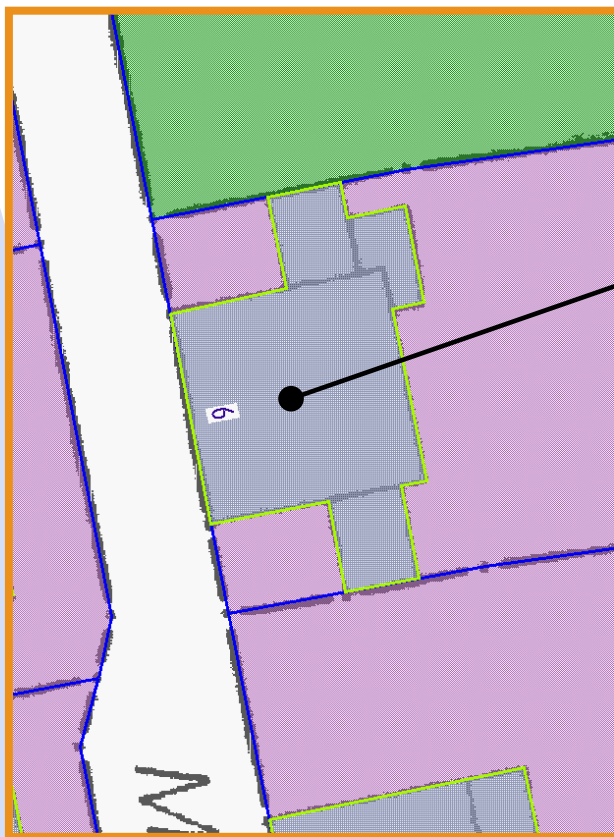
Holen | Säubern | Standards

Vorheriger | Nächster | Liste

Darstellung | Abfrage... | Hilfe | Ende

# Digitalisierte Gebäude

32.000 Gebäude



[Gis] Hauptgebäude

Ok

Häuserkonto

Gemeinde  ?

Straße  ? ▶

Hausnr.

Gesellschaftname  ?

Baujahr

Wohneinheiten

Wohnfläche (ges.)  ger. :

Garagen  Ga.-Fl.

Gewerbe  Ge.-Fl.

Bemerkung

Fläche

Symbol

Nummer

Gebäude Info

Zentriert

Darstellung ▶

Abhängiges Objekt ▶

# 1.600 planreife und entwicklungsfähige Flächen



# Luftbild georeferenziert



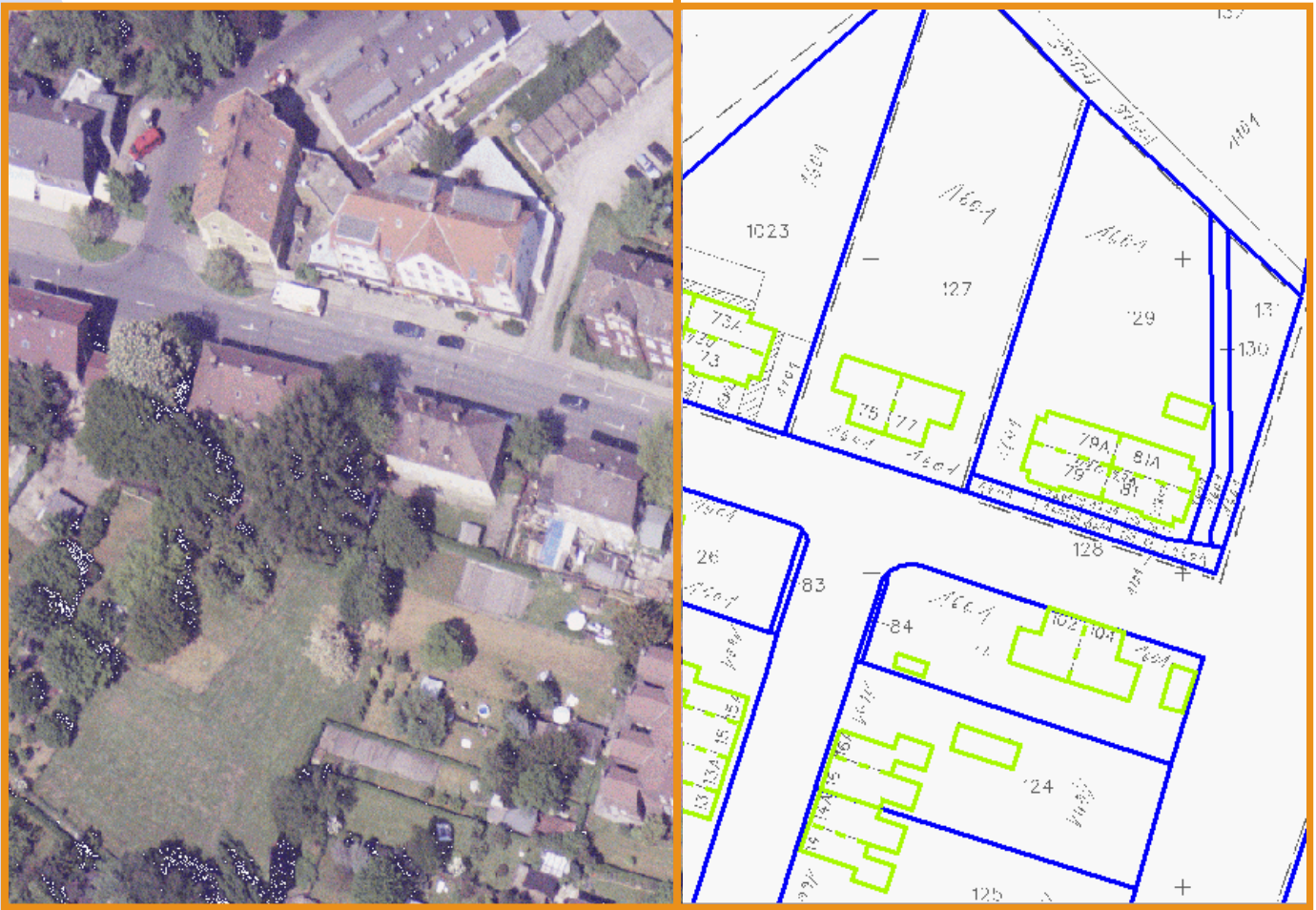
**1.000 ha  
Grundstücks-  
fläche in Pflege**

**1,5 Mio € Aufwand**

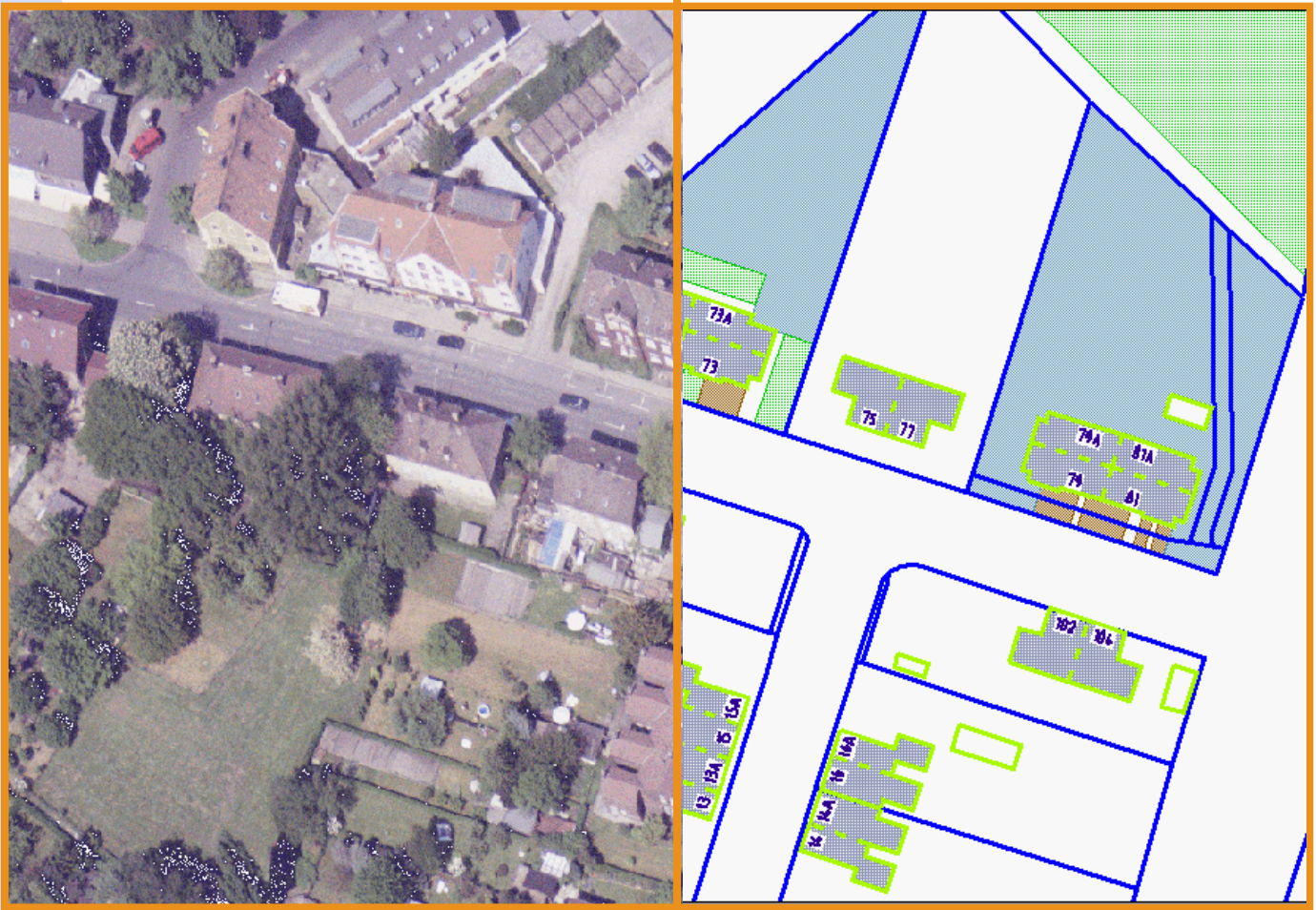
**drei Befliegungs-  
kampagnen**

**von 1998 bis 2000**

# Luftbild Auswerteplan Wohnumfeld



# Luftbild Fachschule Wohnumfeld



Wir erledigen unsere  
**Haus-Aufgaben**  
mit GIS





# ***Ansprechpartner***

***Verm.-Ass. Dipl.-Ing. M. Petersen  
c/o Viterra Wohnen AG  
Philippstraße 3  
44803 Bochum***

***Tel.: 0234 / 314-2268  
Fax: 0234 / 314-2841***

***mail: michael.petersen@viterra.com***

***Dipl.-Ing. B. Niedermowwe  
c/o Viterra Wohnen AG  
Philippstraße 3  
44803 Bochum***

***Tel. 0234 / 314-1285  
Fax: 0234 / 314-2826***

***mail: burkhard.niedermowwe@viterra.com***

# Digitale Geländemodelle im Stadtgebiet aus Laser-Scanner-Daten<sup>1</sup>

CHRISTIAN BRIESE<sup>2</sup>, PETER BELADA<sup>3</sup> & NORBERT PFEIFER<sup>2</sup>

*Kurzfassung: Laser-Scanning ist eine Aufnahmetechnik zur Erfassung topographischer Daten und ist für viele Anwendungsbereiche interessant. In diesem Artikel wird neben einer kurzen Beschreibung der Distanzmessung auf die Filterung und Klassifizierung von Laser-Daten zur Erstellung eines digitalen Geländemodells (DGMs) im Stadtgebiet eingegangen. Die hierfür entwickelte Methode – die hierarchische iterative robuste lineare Prädiktion mit schiefer Fehlerverteilung – wird vorgestellt. Dieser vom Groben ins Feine arbeitende Algorithmus bewirkt neben einer Verringerung der Rechenzeit eine Stärkung in der Robustheit der Auswertung. Anhand eines Projekts im Stadtgebiet von Wien wird auf die Genauigkeit des mit dieser Methode berechneten DGMs eingegangen.*

## 1 Einleitung

Laser-Scanning ist eine Messmethode zur Bestimmung von 3-dimensionalen Punkten auf einer Oberfläche. Die Definition der Punkte erfolgt über eine getaktete Verspeicherung der Messwerte eines aktiven Multisensorsystems. Die flächenmäßige Erfassung wird durch die Bewegung der Sensorplattform entlang eines Flugweges erreicht. Quer dazu werden Distanzen zur Erdoberfläche gemessen. Diese Methode zur Erfassung topographischer Daten hat sich zur Berechnung hochgenauer digitaler Geländemodelle (DGM) in der Praxis etabliert (KRAUS, 2000).

Das Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung der TU Wien (I.P.F.) hat sich bereits in den letzten Jahren intensiv mit der Aufnahmemethode und der Auswertung von Laser-Scanner-Daten vor allem in bewaldeten Gebieten befasst. Anhand einer von der Wiener Magistratsabteilung 41 (MA 41, Stadtvermessung) in Auftrag gegebenen Testbefliegung im Stadtgebiet von Wien (3. Bezirk) wurden die Einsatzmöglichkeiten von Laser-Scannern im dicht verbauten Gebiet untersucht. Die Erstellung eines Gebäudemodells wurde nach BRENNER & HAALA (1999) durch die Universität Stuttgart getestet. Im Folgenden werden einige Ergebnisse dieser Arbeit vorgestellt, wobei der Schwerpunkt neben einer genaueren Betrachtung der Distanzmesseinrichtung auf eine hierarchisch arbeitende Methode zur Erstellung eines DGMs im Stadtgebiet gelegt wird.

## 2 Distanzmessung des aktiven Laser-Scanner

Das Prinzip des Laser-Scannings wird z.B. in (WEHR & LOHR, 1999) beschrieben. Wir wollen hier nur etwas näher auf die Entfernungsmessung eingehen. Die Distanzmessung wird von einem aktiven Lasersensorsystem durchgeführt. Dieses System sendet einen Laserstrahl aus und beleuchtet somit die Oberfläche. Dort wird der Laserstrahl in der Folge je nach Oberflächenbeschaffenheit teilweise reflektiert und teilweise absorbiert, und der Receiver

---

<sup>1</sup> Der vorliegende Artikel basiert auf BRIESE ET AL (2001).

<sup>2</sup> Christian Briese, Norbert Pfeifer: Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, TU Wien, Gußhausstr. 27-29, A-1040 Wien, email: [cbriese\\_np@ipf.tuwien.ac.at](mailto:cbriese_np@ipf.tuwien.ac.at)

<sup>3</sup> Peter Belada: Magistratsabteilung 41, Muthgasse 62, A-1190 Wien, email: [bel@m41.magwien.gv.at](mailto:bel@m41.magwien.gv.at)

empfängt letztendlich ein zeitversetztes Echo (rückgestrahlter Teil des ausgesendeten Laserstrahles).

Für die Distanzmessung wird vorwiegend die Laserimpulsmessung eingesetzt. Die Methode der Phasendifferenzmessung spielt im Moment eine untergeordnetere Rolle. Daher wird in den folgenden Absätzen nur auf die Methode der Laserimpulsmessung eingegangen. Als tatsächliche Messwerte fallen zunächst bei beiden Methoden Zeitdifferenzen an, die mit der Lichtgeschwindigkeit  $c$  in Entfernungen umgerechnet werden können. Die Distanzmessung selber ist mit einer Genauigkeit von wenigen cm möglich, aber der Fehler des Einzelpunktes hängt natürlich noch von Orientierungsungenauigkeiten (GPS, IMU) der Plattform (etc.) ab.

## 2.1 Distanzmessung mittels eines Laserimpulses und seines Echos

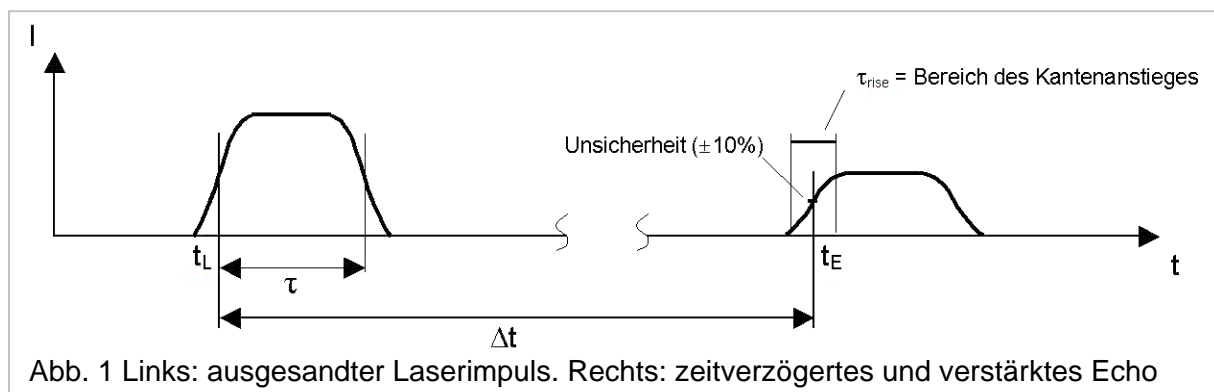
In der Praxis treten keine „idealen“ Rechtecks-Laserimpulse und Echos auf (Abb. 1). Ein Laserimpuls muss als Lichtpaket angesehen werden, das durch Divergenz, Pulslänge bzw. Pulsdauer und Intensität (=Amplitude) gekennzeichnet ist. Die Divergenz ( $\sim 0.3$  bis  $2\text{mrad}$  (WEHR & LOHR, 1999)) bedingt einen mit der Entfernung zunehmenden Strahldurchmesser. Die Dauer des Impulses ist  $\tau$ , ein typischer Wert für die Pulsdauer ist z.B.  $\tau = 5\text{ns}$ , was einer Pulslänge von  $1.5\text{m}$  entspricht. Beobachtet werden die Referenzzeitpunkte  $t_L$  bzw.  $t_E$  (aufsteigende Intensitätsflanken) für die Laufzeitmessung ( $\Delta t$ ).

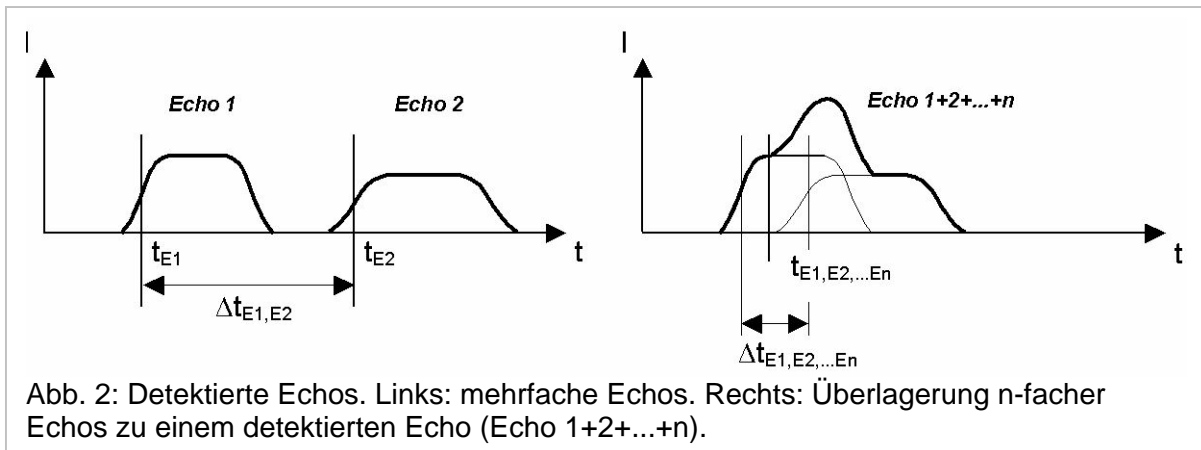
Das im Lasersensor empfangene Echo ist wegen atmosphärischer Einflüsse und der Reflexionseigenschaft der Oberfläche im Vergleich zum Ausgangssignal verändert. Aufgrund dieser Einflüsse muss das im Lasersensor empfangene Signal verstärkt werden.

## 2.2 Ein Laserimpuls – mehrfache Echos

Ein einziger vom Lasersensor ausgesandter Laserimpuls kann mehrere Echos hervorrufen. Diese Mehrfachreflexion kann auftreten, wenn reflektierende Objekte in unterschiedlichen Distanzen  $d_{O_i}$  (entlang des Laserstrahls) vorhanden sind und die Divergenz des Laserstrahles ausreicht diese Objekte teilweise zu beleuchten. Im Receiver treten dann mehrere, zeitlich kurz versetzte Echos auf (Abb. 2, links) oder es überlagern sich mehrere Echos zu einem einzigen detektierten Echo (Abb. 2, rechts).

Eine Trennung zweier Echos ist nur dann möglich, wenn ihr zeitlicher Abstand  $\Delta t_{E1,E2}$  größer als die Pulslänge  $\tau_{E1}$  ist. Die Distanz  $\Delta d_{O1,O2}$  zwischen den beleuchteten Oberflächen  $O1$  und  $O2$ , die vom Laserstrahl zweimal zurückgelegt werden muss, darf demnach nicht geringer sein als die halbe Pulslänge  $\tau$ . Außerdem benötigt die Elektronik bis zur Detektierung des nächsten Echos eine bestimmte Zeit (recovery time). Für eine Pulsdauer von  $5\text{ns}$  liegt somit die minimale Distanz, die zwischen zwei Objekten liegen muss um die Echos getrennt

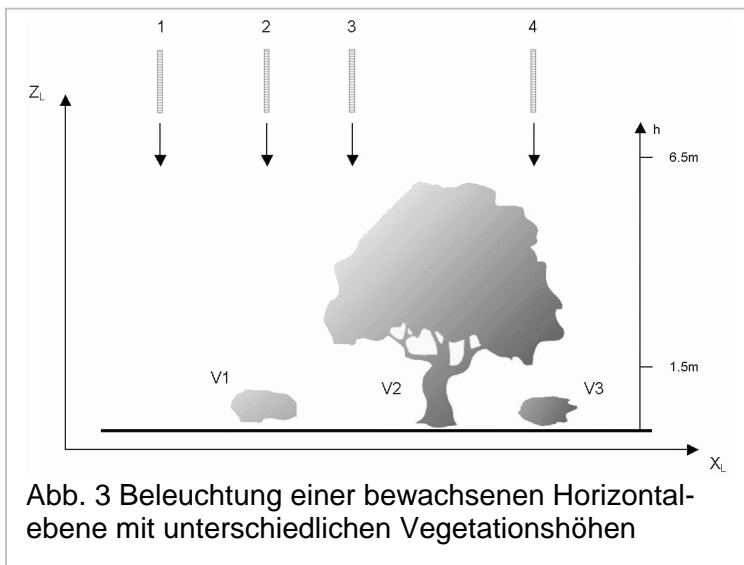




detektieren zu können, im Bereich von über 1.5m. Im Fall der Überlagerung der Einzel-Echos ist die gemessene Strecke keinem konkreten Teil-Echo bestimmter Reflexionsflächen zuordenbar, da es aus der Sichtweise des Detektors nur ein zu detektierendes Echo gibt.

### 2.3 Beleuchtung natürlicher Oberflächen

Die Problematik der Mehrfachreflexionen soll nun anhand der Beleuchtung einer mit Horizontalebene mit Bewuchs unterschiedlicher Vegetationsarten und -höhen (Abb. 3) demonstriert werden. Im *ersten* Fall wird die Horizontalebene senkrecht beleuchtet. Die ansteigende Flanke  $\tau_{\text{rise}}$  des reflektierten Echos bleibt unbeeinflusst. Mit der gemessenen Laufzeit  $\Delta t$  kann die Entfernung zwischen Lasersensor und der Horizontalebene bestimmt werden.



Das *zweite* Lichtpaket beleuchtet zunächst die niedrige Vegetation V1 und trifft erst dann, falls es die Vegetationsdichte zulässt, auf den Boden. Es entstehen zeitlich versetzte Mehrfachreflexionen (multiple Echos). Da die Differenz zwischen Vegetationsecho und Bodenecho kleiner als die Pulslänge ist, detektiert der Lasersensor ein Echo, das sich durch Überlagerung mehrerer Teilechos im Detektor zusammensetzt (rechter Teil der Abb. 2). Die Position der aufsteigenden Kante ist keinem konkreten Teilecho zuordenbar und bezieht sich auf eine fiktive Reflektoroberfläche.

Beim *dritten* Laserstrahl erfolgt die erste Reflexion in der Baumkrone. Es entstehen aufgrund der späteren Bodenreflexion ebenfalls mehrfache Echos. Im Gegensatz zum vorherigen Beispiel ist der Abstand der beiden Reflexionsflächen deutlich größer und es kommt somit zu keiner Überlagerung der Teil-Echos im Detektor (Abb. 2, links). Je nach Interessenslage kann das erste und/oder letzte Echo zur Punktbestimmung herangezogen werden.

Das *vierte* Beispiel stellt eine Kombination des zweiten und dritten Falles dar und soll zeigen, wie vielschichtig der vom Lichtpaket zurückgelegte Weg sein kann.

### **3 Erstellung eines DGMs aus Laser-Scanner-Daten in bebauten Gebieten**

Das Echo eines Laserstrahls, das im Detektor empfangen wird, stammt von den unterschiedlichsten reflektierenden Oberflächen. Für die Erstellung eines DGMs ist es daher notwendig die Nicht-Bodenpunkte zu eliminieren oder ihren Einfluss auf die Modellbildung möglichst zu reduzieren. Die großen Datenmengen machen eine mehr oder weniger automatisch arbeitende Auswertung notwendig.

Im Rahmen der ersten Projekte wurde am I.P.F. ein Algorithmus zur Berechnung eines DGMs aus Laser-Scanner-Daten entwickelt (PFEIFER ET AL, 1999). Dieser im Programmpaket SCOP (2001) implementierte Algorithmus und die für die Erstellung eines DGMs im Stadtgebiet notwendigen Erweiterungen (hierarchischer Ansatz) sollen im Folgenden kurz vorgestellt werden.

#### **3.1 Algorithmus zur Filterung und Klassifizierung von Laser-Daten**

Der Algorithmus – die *iterative robuste Interpolation mit schiefer Fehlerverteilung* – beruht auf einer statistischen Analyse der Verbesserungen der gemessenen Laserpunkte in Bezug auf eine Fläche, die alle Punkte approximiert. Je nach Größe und Vorzeichen der Verbesserung bekommt der Punkt für die nächste Interpolation ein neues Gewicht. Durch eine geeignete Wahl der Gewichtsfunktion (stochastisches Modell), die einerseits Bodenpunkten, also Punkten, die in Bezug zur Referenzfläche tief liegen, ein hohes Gewicht (nahe bei 1) und Nicht-Bodenpunkten, das sind jene Punkte, die über der Referenzoberfläche liegen, ein geringes Gewicht (nahe bei 0) zuordnet, gelingt es schrittweise ein DGM aus Laser-Scanner-Daten abzuleiten.

Die Steuerung der Gewichtsfunktion erfolgt mit wenigen Parametern. Da die Berechnung innerhalb von SCOP patch-weise erfolgt, passt sich diese Vorgangsweise adaptiv dem Gelände an. Toleranzwerte werden zur Klassifizierung der Daten (in Boden- und Nicht-Bodenpunkte) genutzt. Diese Methode hat sich bereits in einer Vielzahl von Projekten in bewaldeten Gebieten bewährt.

#### **3.2 Hierarchischer Ansatz**

Um ein DGM im Stadtgebiet aus Laser-Scanner-Daten möglichst automatisch und ohne zusätzliche Datenquellen ableiten zu können, war eine Erweiterung der Auswertemethode notwendig. Unter einem Gebäude ist das Gelände eine fiktive Fläche, die auf Basis der benachbarten Bodenpunkte berechnet wird.

Im Stadtgebiet, wie auch in Gebieten mit einer geschlossenen Vegetationsdecke, ist die „Sicht“ zum Boden nicht gegeben, wodurch eine Vielzahl von Nicht-Bodenpunkten in räumlich relativ groß ausgedehnten Gebieten gemessen wird. Die iterative Annäherung an die Geländeoberfläche schlägt in diesen Gebieten mit dem bereits vorgestellten Algorithmus fehl. Der hierarchische Ansatz arbeitet mit Datenpyramiden, wie sie aus der digitalen Bildverarbeitung bekannt sind. Die verschiedenen Niveaus der Pyramide stellen die Daten in verschiedenen Auflösungsstufen (Generalisierungs-Stufen) dar. Diese höheren Niveaus können mit verschiedenen Methoden aus den niedrigeren gebildet werden. Beispielsweise

kann innerhalb eines kleinen, quadratischen Gebiets (Rasterzelle) immer der Schwerpunkt oder der tiefste Punkt selektiert werden. Dadurch wird eine Modellbildung vom Groben ins Feine ermöglicht. Der Ablauf dieser Methode ist durch folgende Schritte gegeben:

1. Berechnung der Datenpyramiden
2. Filterung, Klassifizierung und DGM-Berechnung
3. Vergleich des DGMs mit den Daten der nächsthöheren Auflösung und Auswahl der Punkte innerhalb eines Toleranzbandes

Die Schritte 2 und 3 werden so lange wiederholt, bis nach dem 2. Schritt das DGM mit der endgültigen Auflösung vorliegt. Dieser hierarchische Ansatz ermöglicht neben einer Reduktion der Rechenzeit eine stärkere Robustheit der Methode und ein Überbrücken von Bereichen ohne Bodeninformation. Mit Hilfe dieser Methode, die mittlerweile in einigen weiteren Projekten zum Einsatz gekommen ist (vom Ingenieurbüro Peter Schmid, Wien und für die Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG), Koblenz) konnte für das gesamte Projektgebiet ein DGM mit geringen manuellen Aufwand berechnet werden.

## 4 Projektbeschreibung

### 4.1 Daten

Als Testgebiet wurde in Wien ein  $2,5 \times 1,0 \text{ km}^2$  großes Gebiet im 3. Bezirk von Wien gewählt. Der bei dieser Befliegung eingesetzte Laser-Scanner TopoSys I arbeitet nach dem Prinzip der Laserimpulsmessung und führt pro Sekunde 83000 Distanzmessungen durch. Die Scanfrequenz (Anzahl der gemessenen Laser-Zeilen pro Sekunde) beträgt bei diesem System mit einem Scanwinkel von  $\pm 7^\circ$  630Hz. Als Genauigkeit für die Distanzmessung wird seitens der Fa. TopoSys ein Wert  $< 0,2 \text{ m}$  angegeben. Die Auflösung der Distanzmessung beträgt  $0,06 \text{ m}$ .

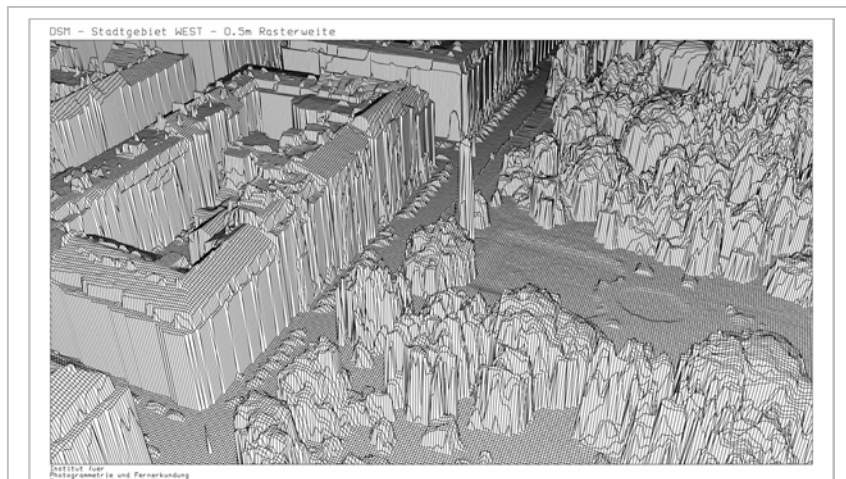


Abb. 4 Perspektivansicht des digitalen Oberflächenmodells (Ausschnitt) aus den Originalrasterdaten (0.5m-Raster).

Die mittlere geplante Flughöhe betrug  $500 \text{ m}$ , wodurch 19 Flugstreifen benötigt wurden um das Gebiet zu erfassen. Aufgrund der Flug- und Systemparameter ergeben sich folgende charakteristische Werte für das Projekt im Stadtgebiet:

Streifenbreite:	123m
Anzahl der Punkte pro Scan:	127
Punktabstand in Flugrichtung:	0.10m
Punktabstand quer zur Flugrichtung:	0.97m
Ø Beleuchtete Fläche ( <i>Laser Footprint</i> ):	0.25m

Für die Transformation ins Landeskoordinatensystem verwendete die Fa. TopoSys Standardparameter und eine GPS-Referenzstation auf der Gloriette (Schloß Schönbrunn, Wien). Mit Hilfe von der Stadt Wien bereitgestellter Referenzdaten (z.B. Gebäudeumrissen) wurde die Transformation der Laser-Scanner-Daten überprüft (TOPOSYS, 1999).

Zur Auswertung der Laser-Scanner-Messungen standen einerseits die „Rohdaten“, d.h. die gemessene Punktwolke im Landeskoordinatensystem und andererseits ein aus den Rohdaten abgeleitetes Oberflächenmodell, das durch ein quadratisches 0.5m-Raster (sehr geringer Speicherbedarf im Vergleich zu den Rohdaten) repräsentiert wird, zur Verfügung (Abb. 4).

Die Verfahren zur Rasterung der Originaldaten laufen anwendungsorientiert ab. Je nach Anwendung wird entweder versucht den Einfluss der Nicht-Bodenpunkte durch Höhergewichtung der niedrigeren Punkte zu reduzieren, oder aber es werden die Nicht-Bodenpunkte (Gebäuden, Dämme, etc.) hervorgehoben. Für das Projektgebiet in der Stadt Wien wurden seitens der Fa. TopoSys vor allem tief liegende Punkte hoch gewichtet, was einerseits eine Reduzierung der Vegetation bedingt, aber andererseits ein Verkleinern der Dimension anderer Objekte (Häuser, ...) hervorruft.

Löcher im Datensatz ergaben sich durch Signalstörungen der DGPS gestützten Navigation.

## 4.2 Berechnung des DGM

Den Ausgangspunkt zur Erstellung des DGMs im Stadtgebiet bilden die 0.5m-Rasterdaten der Fa. TopoSys, die in der Abb. 4 perspektivisch dargestellt sind. Im rechten Teil der Abbildung ist dichte Vegetation im Botanischen Garten der Universität Wien sichtbar. Im linken Teil des Bildes ist die Oberfläche einer Straße (inklusive parkender Autos) und eines Häuserblockes dargestellt.

Die Filterung ist wie in Abschnitt 3 beschrieben durchgeführt worden. Insgesamt wurden die Daten in 3 Auflösungs-Niveaus bearbeitet (5m Raster, 2m Raster, 0.5m Raster (Originaldaten)). Zur Ausdünnung wurde immer der Mittelpunkt einer Rasterzelle genommen. Die Kontrolle der Ergebnisse einschließlich geringer manuelle Nachbearbeitung hat 2 Stunden in Anspruch genommen. Die einzelnen Schritte der Datenverarbeitung sind:

1. Überprüfung der Daten (gesamte Punktzahl 10mio)
2. Erstellung des ausgedünnten Datensatzes auf 5m-Niveau

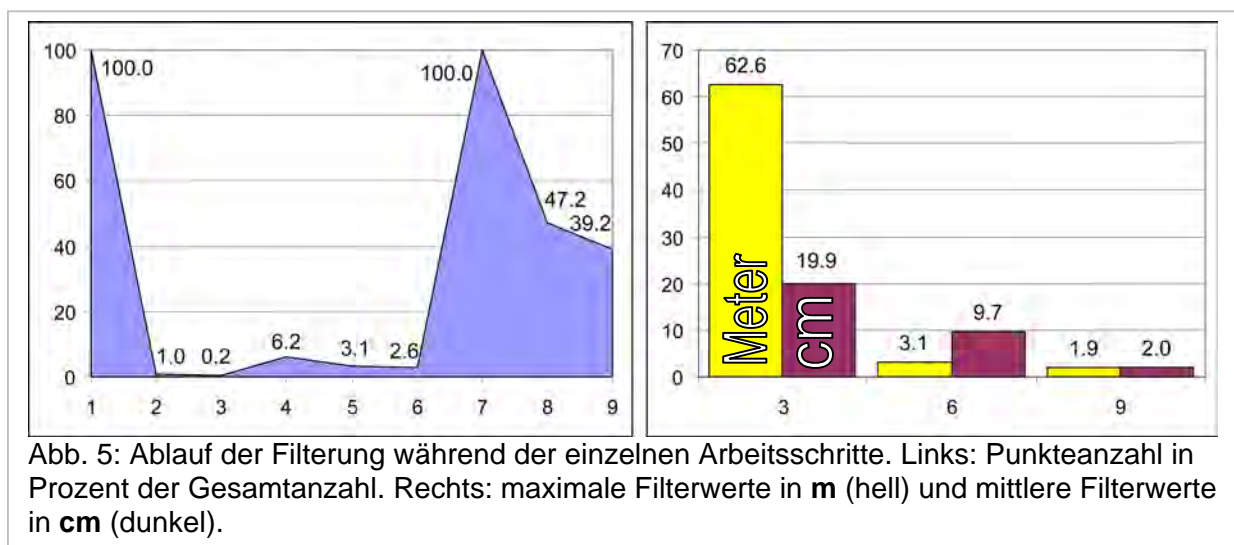


Abb. 5: Ablauf der Filterung während der einzelnen Arbeitsschritte. Links: Punktezahlin Prozent der Gesamtzahl. Rechts: maximale Filterwerte in m (hell) und mittlere Filterwerte in cm (dunkel).

3. Filterung des 5m-Niveaus (*maximaler* Filterwert 63m)
4. Erstellung des ausgedünnten Datensatzes auf 2m-Niveau
5. Aussortierung des Datensatzes auf 2m-Niveau, Auswahl aller Punkte mit einem absoluten Abstand vom 5m-DGM kleiner als 3m.
6. Filterung des 2m-Niveaus (*maximaler* Filterwert 3m)
7. gesamter Datensatz (0.5m-Niveau)
8. Aussortierung des Datensatzes auf 0.5m-Niveau auf Basis des 2m-DGM ( $\pm 3m$ )
9. Filterung des 0.5m-Niveaus (*mittlerer* Filterwert 2cm)

Der Ablauf der DGM-Bestimmung (speziell die Punktzahl und die Filterwerte) sind in den Diagrammen in Abb. 5 dargestellt. Die Nummern auf der Abszisse in den Diagrammen verweisen auf den jeweiligen Arbeitsschritt.

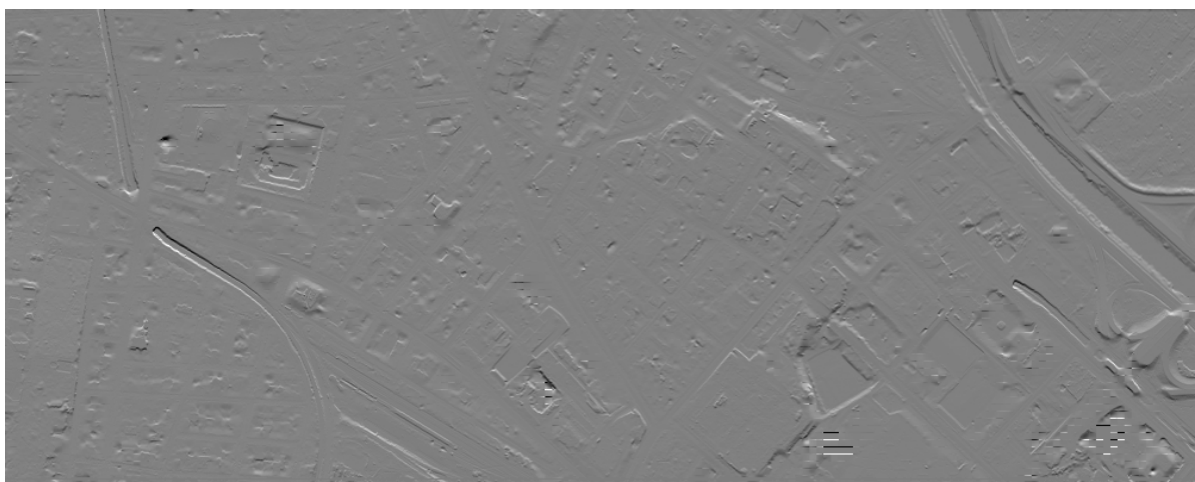


Abb. 6 Schummerung (Beleuchtung aus Norden) des DGMs des gesamten Projektgebiets

Abb. 6 zeigt das endgültige DGM (Bodenmodell) in einer Schummerung für das ganze Projektgebiet. Häuser, Autos, Bäume, Straßenlampen und andere städtische Einrichtungen wurden komplett eliminiert. Ein solches Höhenmodell ist die Basis für weitere Produkte, wie z.B. Stadtmodelle.

### 4.3 Kontrolle des DGM

Die Kontrolle des DGMs erfolgte durch 816 terrestrisch bestimmte Punkte, die in unterschiedlichen Bereichen im südwestlichen Teil des Projektgebietes liegen. Diese Punkte wurden von der MA 41 bestimmt. Die Ergebnisse dieser Genauigkeitsuntersuchung sind in der folgenden Tabelle zusammengefasst, wobei die Abweichungen vom DGM zum terrestrischen Kontrollpunkt (Höhendifferenz) untersucht worden sind. In der zweiten Spalte ist der RMS angegeben, also die Abweichungen quadratisch aufsummiert, in der dritten Spalte ist die Standardabweichung  $\sigma$ , die frei vom systematischen Anteil ist, angegeben.

Region	RMS	$\sigma$
Gesamtgebiet	$\pm 10.5\text{cm}$	$\pm 7.1\text{cm}$
Park, dichter Baumbestand	$\pm 14.5\text{cm}$	$\pm 11.1\text{cm}$
Park, geringe Vegetation	$\pm 11.4\text{cm}$	$\pm 7.8\text{cm}$
Park, offenes Gelände	$\pm 8.6\text{cm}$	$\pm 4.5\text{cm}$
Straße, mit parkenden Autos	$\pm 9.2\text{cm}$	$\pm 3.7\text{cm}$
Straße, ohne Autos	$\pm 2.4\text{cm}$	$\pm 1.0\text{cm}$



Diese Ergebnisse zeigen eine deutliche Abhängigkeit der Genauigkeit von der Oberflächenbeschaffenheit. Der sehr geringe Wert für die Abweichungen im offenen Straßengebiet ist aufgrund der Einzelpunktgenauigkeit, die schlechter als 10cm ist, überraschend. Die Methode der linearen Prädiktion ermöglicht jedoch für gut definierte, leicht gekrümmte Oberflächen und der zudem auftretenden hohen Punktdichte die Bestimmung eines Oberflächenmodells, dessen Genauigkeit deutlich höher ist als die Genauigkeit der einzelnen Stützpunkte (KRAUS, 2000).

## 5 Zusammenfassung

Die bisher vorgestellte Methode zur Erstellung eines DGM im Stadtgebiet hat nur die von der Messmethode zur Verfügung gestellten unstrukturierten Massenpunkte verwendet. Sowohl zur Verbesserung der Modellierung, als auch zur Unterstützung des hierarchischen Ansatzes, wäre es jedoch wünschenswert Bruchkanteninformation einzubeziehen. Diese zusätzliche Vektorinformation kann aus bereits vorhandenen Datenbeständen (z.B. eine photogrammetrische Auswertung) übernommen, manuell in einer Visualisierung der Laser-Daten digitalisiert, oder aber auch automatisch aus den Laserdaten ermittelt werden. Diese automatische oder semi-automatische Bestimmung der Geländekanten aus Laser-Scanner-Daten ist zur Zeit Gegenstand vieler Forschungsprojekte.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Aufnahmetechnik des Laser-Scannings interessante Anwendungsmöglichkeiten bietet. In vielen Bereichen stehen die Auswertemethoden jedoch noch am Beginn der Entwicklung und viele in den Laser-Scanner-Daten enthaltene Details können mit den heute zur Verfügung stehenden Methoden (noch) nicht modelliert werden.

## Danksagung

Diese Forschung wird durch den FWF (Österr. Fonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung), Projekt-Nr. P14083-MAT, unterstützt. Dank geht weiters an die MA 41, Stadtvermessung der Stadt Wien, die dieses Projekt in vielerlei Hinsicht unterstützt hat.

## Literatur

- BRIESE, C., BELADA, P., PFEIFER, N., 2001: Digitale Geländemodelle im Stadtgebiet aus Laser-Scanner-Daten. Österreichische Zeitschrift für Vermessung & Geoinformation 2/01.
- BRENNER, K., HAALA, N., 1999: Rapid Production of Virtual Reality City Models. Geoinformationssysteme 2/99, S. 22 - 28.
- KRAUS, K., 2000: Photogrammetrie - Topographische Informationssysteme, Band 3, 1. Auflage, Dümmler Verlag, Bonn.
- PFEIFER, N., KRAUS, K., KÖSTLI, A., 1999. Restitution of Airborne Laser Scanner Data in Wooded Areas. Geoinformationssysteme 2/99, S. 18 - 21.
- SCOP, 2001: Programmpaket für Digitale Geländemodelle, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, Produktinformation, <http://www.ipf.tuwien.ac.at/produkte/produkte.html>.
- TOPOSYS, 1999: Protokoll der Auswertung der Höhendaten "Wien".
- WEHR, A., LOHR, U., 1999. Airborne laser scanning - an introduction and overview. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 54, S. 68 - 82.

# Desktop-Photogrammetry and its Link to Web Publishing

GÜNTER POMASKA<sup>1</sup>

*Abstract: Dimensional analysis from images seems to be a field for experts involved with special knowledge and equipped with high performance tools. Since softcopy workstations replaced the analytical plotters it is not the case further on. Photogrammetry has moved to the desktop and is incorporated into CAD or image processing software. Recording is provided amongst others with digital cameras of the shelf. Requirements to recording and documentation of archaeological sites, architecture or forensic investigations have reached a high standard. Results have to be published not only to researchers or experts. It is important to reach a wide community for generating interest in the particular topic. The Internet provides this platform. Photogrammetry can be an efficient tool for on site recording as well as for exciting documentation. This contribution focuses to some aspects of digital photogrammetry particular camera handling, recording and evaluation methods and the products one can receive from photogrammetry.*

*Einleitung: Anwendungen der Nahbereichsphotogrammetrie in Denkmalpflege, Architektur und Bauwesen dienen der Dokumentation, Bauforschung, Bereitstellung von Unterlagen für Angebot und Ausschreibung oder der Planung für „Bauen im Bestand“. Ergebnisse des „Aufmaßes“ werden als Bildpläne, hierarchische Polygonmodelle, CAD Datenformate oder als komplette 3D-Szenenbeschreibung geliefert. Die Modellierung ist neben der Geometriebeschreibung auch bildbasierend. Der Kommunikationsprozeß der Projektbeteiligten wird durch das Internet sowie der Art und Weise der Präsentation erheblich beeinflusst. Der Praxisbezug wird hergestellt mit Verweis auf die Aufgabenstellung des ACS-Preises 2000, ausgeschrieben von der Architektenkammer Hessen, „Die Kommunikation mit dem Laien – Projektpräsentation im Internet“. Das gewählte Thema unterstreicht die Bedeutung und Notwendigkeit der Auseinandersetzung mit den neuen Techniken. Nachfolgend werden einige Aspekte der Internetpräsentation von Geometrie und Bilddaten anhand von Beispielen erläutert.*

## 1 Photogrammetric Image Acquisition

Photogrammetry is defined as recording, measurement and interpretation of 3D-objects from images with non-contact recording systems. The major application of photogrammetry is mapping from aerial photos. Non-topographic photogrammetry or close-range photogrammetry covers applications in archaeology, architecture, forensic science and industrial metrology. To produce true scale drawings from images the exposure arrangement has to be reconstructed first. Photo positions and camera parameters must be known before a detailed evaluation can be performed. Accuracy results beside other conditions from image scale and image measurement accuracy. The former analogue and analytical plotters are replaced by „softcopy workstations“ today. Close-Range applications benefit from utilizing standard cameras for metric applications. A sensor supplies from a surface of 2/3 of an inch millions of pixel including colour information. The Workstation can be a notebook compute

---

<sup>1</sup> Prof. Dr.-Ing. Günter Pomaska, FH Bielefeld, University of Applied Sciences, FB Architektur und Bauingenieurwesen, Artilleriestr. 9, D32427 Minden  
[gp@imagefact.de](mailto:gp@imagefact.de), [www.imagefact.de](http://www.imagefact.de)

Figure 1 displays a „Meydenbauer camera“ from 1890 designed for terrestrial applications. The image format of this camera is 30cm x 30cm, carrier for the film emulsion was glass. Another example for photogrammetric equipment is given in figure 2. The Stereoplanigraph C8 from Zeiss Germany produced 1967, connected directly to a drawing table. Driving the floating mark in the photogrammetric model was recorded directly in true scale line drawings. Today the results are presented as 3D-CAD models, orthophotos, hierarchical polygon models, high-density point clouds or models in Web-formats.

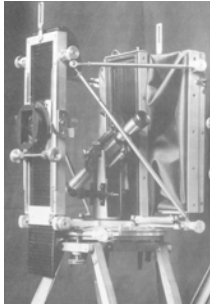


Figure 1: Meydenbauer camera built 1890 for terrestrial photogrammetry, image format 30 cm x 30 cm

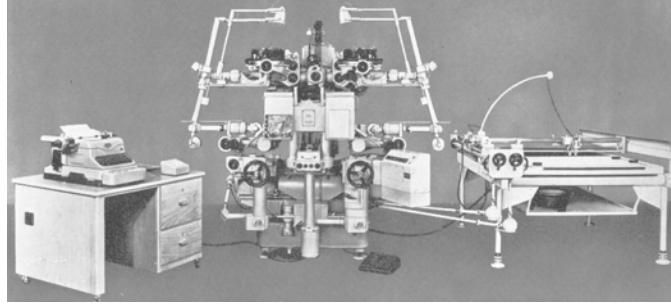


Figure 2: Stereoplanigraph C8 from Zeiss Germany, built 1967

## 1.1 Image Refinement

Many photogrammetric evaluation methods are based upon a central projection model. A point is projected by a straight line through the projection centre (camera lens) onto the image plane. Deviations from this model can be parameterised. Without covering the details some remarks about co-ordinate systems, camera calibration and image refinement are necessary here. The location of a 3D-object is referenced in an object co-ordinate system. Image measurements, which supply after some computations the object point, are taken in an image co-ordinate system. A reference to the image co-ordinate system is given by the camera's format frame (not good), by fiducial marks (better) or by réseau (best) that is a grid plate in front of the film surface. Digital cameras include the reference in the pixel positions. The difference between the origin of the image co-ordinate system and the reference system is given by the principle point position.

Image deformations result from insufficient film flatness and radial and tangential lens distortion, which cause from variations in angular magnification and misalignment of lens components. Film flatness can be controlled and numerically corrected using a réseau-camera. Camera calibration by means of bundle adjustment provides the model correction parameters. Particular if wide-angle lenses are used a transformation to the principle point and radial lens distortion correction is necessary. The process is known as image refinement. Radial lens distortion can be simply detected by observing straight lines of the object shown as curves in the image. A stereoscopic image pair of a plane surface gives an example. Without image refinement, the plane is presented as a curved surface. Image processing programs enable subtraction of two images. The difference between a distorted image and the according refined image illustrates the influence of distortion as well.

Strategies for camera calibrations should not discuss here. Figure 3 is an image of a plain calibration field, taken with a 2-megapixel camera. The radial lens distortion curve of this camera is shown in figure 4. The amount of distortion in the image corner is about 40 microns. Please note that this value in object space increases with the factor of the image scale.

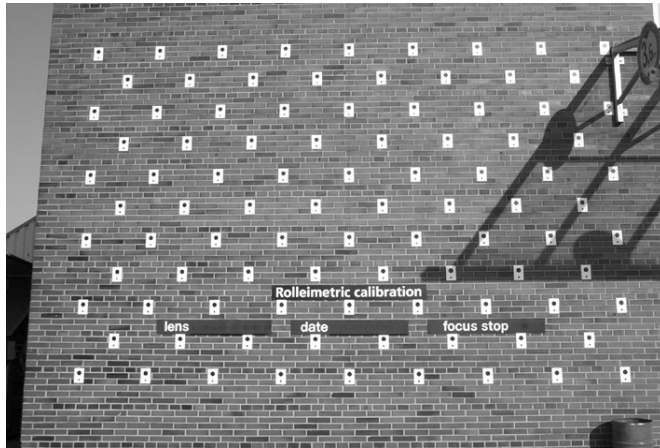


Figure 3: Calibration wall for camera field calibration, Rolleimetric calibration, Braunschweig

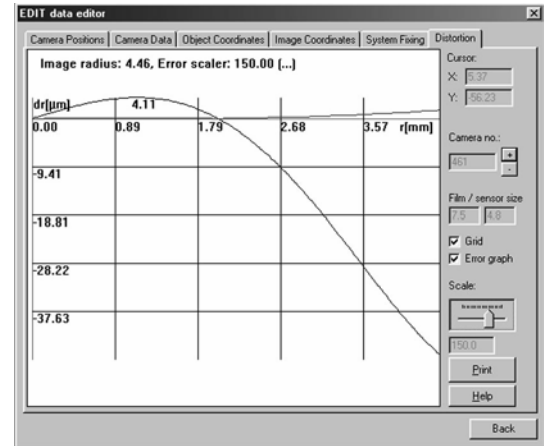


Figure 4: Lens distortion of a CCD camera with an 8 mm lens.

One mega pixel camera, which corresponds to the metric requirements, is the Rollei d7 metric, see [2]. The calibration parameters are stored in the digital image. The original image data is protected in the raw data format that cannot be manipulated. Image refinement is processed in advance of the photogrammetric evaluation.

## 1.1 Object Resolution

The discussion of image resolution using digital cameras and in case of film scanning as well should be directed to object resolution. What object area should be covered by one pixel? The image scale is given by comparison of object size with the according image size. Full format photographing an object of 50-metre extension with a medium format camera supplies an image scale of 1:830. For a 35mm camera this would be 1:1400, a 2/3 inch CCD displays the object with a scale of 1:2950.

Here is an example from the point of view of accuracy calculated only by the thumb rule that the object accuracy is derived from the image measurement accuracy multiplied by image scale. Measurements from images should deliver an object accuracy of 1 cm. The sensor used is sized 2/3 of an inch with a resolution of 1800 pixel. Pixel size is approx. 10 microns, equal to the estimated measurement accuracy. Image scale should be 1:1000 that means an object size of approx. 16 metres could be imaged. But do not forget the scanning theorem that the scanning frequency has to be at least twice as the local frequency. Desktop Scanners with film adapter units are equipped with optical resolutions of 1200 ppi and therefore usable for formats from 35 mm to medium format and larger. 35mm film scanner supply resolutions up to 2700 ppi optical.

To summarize: A medium format camera in combination with a desktop scanner supplies the same image resolution as a digital camera of the shelf. A disadvantage of the digital camera is the small format. To fulfil high accuracy requirements, a réseau camera provides best results. Every photogrammetric evaluation software package needs a camera description file including, focal length of lens, principle point position, lens distortion parameters, image format width and height, shape and position of reference for image co-ordinate system.

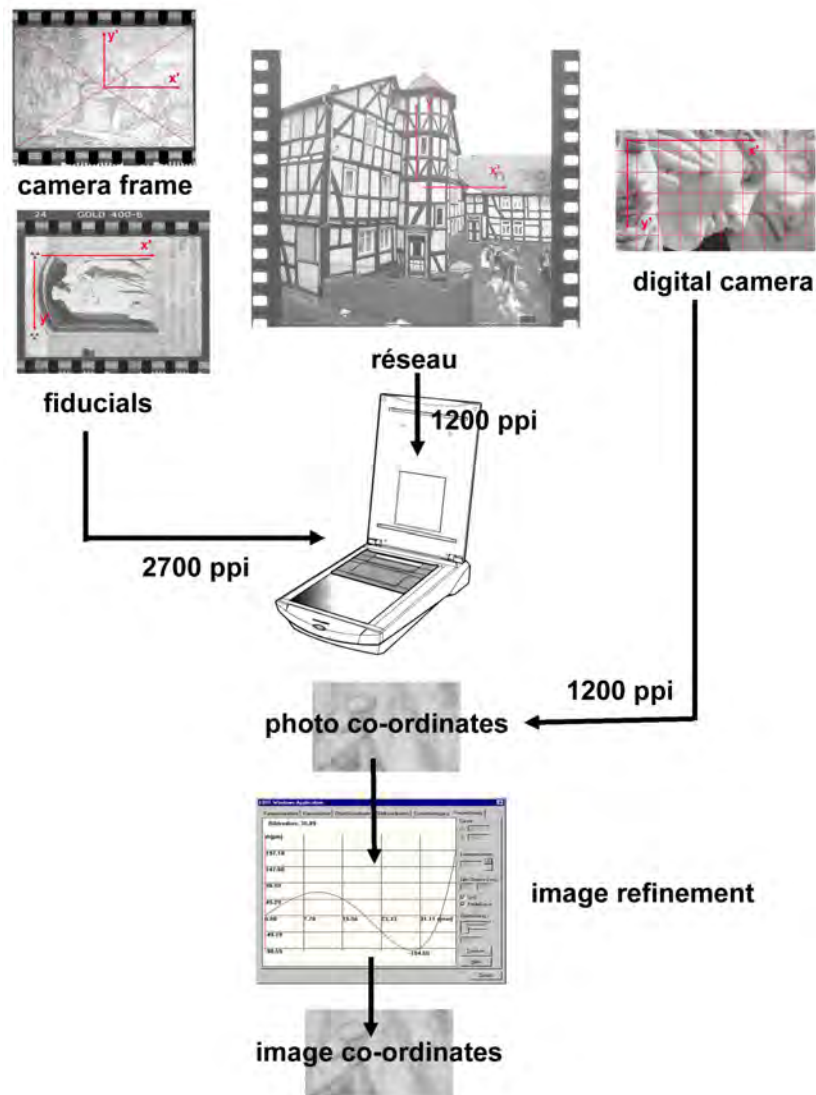


Figure 5: References to the image co-ordinate system. Format frame, fiducials as recommended by EOS Systems, réseau image and digital image.

## 2 Photogrammetric Recording and evaluation strategies

The number of photos taken and the method used for object reconstruction can classify photogrammetric methods. Single image methods require some object information. Two photos taken as a stereo pair represent a model for evaluation based on parallax measurements. Several models are combined by adjustment. Multiple images enable point computation by intersection and over determination.

## 2.1 Single image rectification

Single image methods need additional information about the object shape. If the object shape is a plane surface, using the relationship between object plane and image plane can perform rectification. The perspective projection parameters can be calculated by four given control points in the object plane. Relative positions of these points in the image must be measured. Architectural applications can benefit from parallel lines in the object. Two orthogonal located pairs of parallel lines have to be marked in the image. The geometric condition will be restituted after rectification. Results of image rectifications are high-resolution image maps. Image rectification in this way works without metric camera modifications and unknown focal length.

## 2.2 Stereoscopic Photogrammetry

A stereoscopic image pair corresponds to the human viewing system. Reconstruction of the object is given via disparity or parallax measurements. Using a stereoscopic viewing systems enables visual evaluation by driving a floating mark in the stereoscopic model. Automatic object reconstruction is possible by means of correlation. In this case monoscopic viewing is sufficient, systems are called “one-eye stereo systems” and represent a major advantage of digital photogrammetry.

### 2.2 Orthophotos

Particular the digital orthophoto is an example for automatic image evaluation. A digital surface model is calculated automatically. Photos are resampled from perspective view to orthogonal projection taking into consideration of the predefined surface.

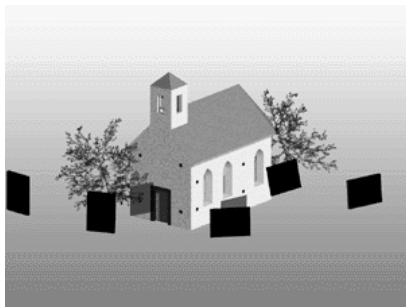


Figure 6: Exposure arrangement for multi image photogrammetry.



Figure 7: Stereoscopic recording simultaneously with two cameras, (available as a 3D-image)

Numerous software packages for PC-workstations like RolleiMetric CDW, RolleiMetric MSR, Elcovision 10, Photomodeler, Photo3D and others are available for object reconstruction from photos. Conventional photogrammetric products are line drawings, CAD-Models, point-clouds, image maps and orthophotos. With the ongoing development of Web technologies the demand to new products like image objects, panoramas, digital 3D-models for interactive navigation increases. Hierarchical polygon models replace model descriptions by contour lines. Texture mapping became more popular. In the following chapter some methods of image based documentation and the according Web publishing techniques are introduced.

### 3 Web Publishing

#### 3.1 3D-models and texture mapping

With the definition of VRML virtual modeling language a standard for interactive inspection of 3D worlds is designed. For increasing the reality imagination, the geometric model is covered with texture. A texture is a 2D bitmap. Every 3D corner point of a surface of the geometric model is connected with a 2D point in one of the texture files. Current photogrammetric software packages include geometric modeling and texture extraction from photos. Since not all applications require the high accuracy low end products like Photo3D provide solutions to get a VRML model from standard 35 mm photos or digital cameras. Figure 8 displays a sample. On the left is the original photo, in the middle a scaled image map of the facades. On the right a screenshot of a VRML view.

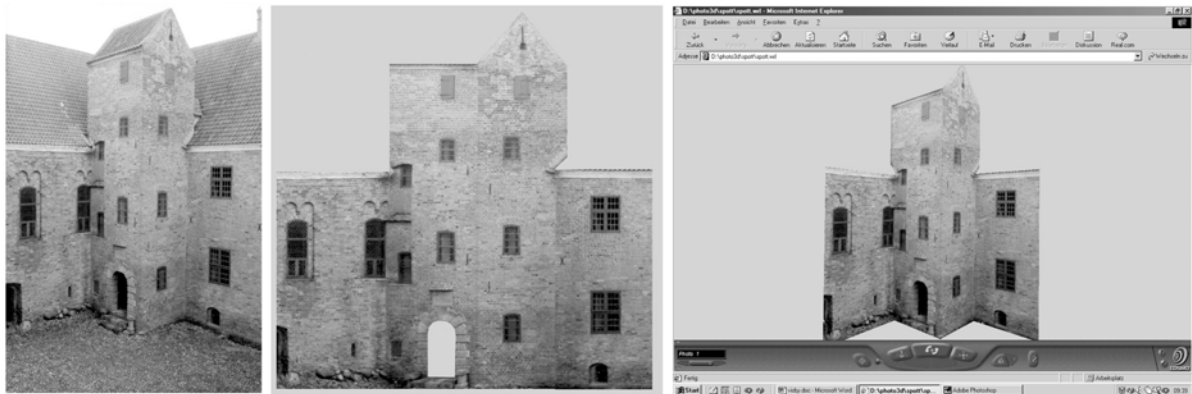


Figure 8: From a single 35mm photo, to a scaled rectified facade map and a VRML-model with PHOTO3D software for the PC.

#### 3.2 Orthophoto and DTM

Monoplotting from stereo pairs by means of correlation seems to be one of the major advantages of digital photogrammetry. Under this circumstance a digital orthophoto is the appropriate solution for automated mapping. The geometric shape of the object surface is automatically detected. The orthophoto in plane view provides a true scale image map. An example is given in figure 9. A DTM and the orthophoto mosaic resulted from a low altitude image flight. Some buildings of particular interest are presented in a 3D structure. All the data was converted in a VRML format. The buildings are connected by a link to other URLs. Detailed Information will display after a mouse click.



Figure 9: Orthophoto, DTM and buildings of particular interest in a VRML-File with links to detailed description.

### 3.3 Panoramas

There are several methods existing to shot a panorama. The conventional method crops the image to a long format. When the negative is printed it looks like a long narrow panorama but the field of view is still unchanged. The APS cameras today provide such an imagination.

Field of views up to 180 degree can be photographed with a swing-lens camera. The lens is mounted in a rotating cylinder while the film plane is curved. During exposure the lens rotates and paints the image through a slit onto the film.

The rotational method needs a camera that can rotate about 360 degree while the film turns synchronously opposite to the camera rotation. This technique is still very popular. An advantage is, that moving objects can be recorded without any problems. While taking street scenes with the segmented method, people or cars can occur several times in different positions.

A series of images taken with a rotating exposure direction and displaying the photos next to another is the oldest method to show a wide field of view. The advantage of digital image technology makes the segmented method very popular today. Taking the photos with a digital camera enables an automated process to display scenes for interactive viewing. Stitching software processes the single pictures to a cylinder, sphere or cube. The most precise panorama consists of evenly spaced photos using a tripod. A special panoramic head assures that the camera rotates on a level plane around the centre of the lens. A number of 12 photos using a wide-angle lens of 35 mm in portrait format can be sufficient for outdoor scenes.



Figure 10: Panorama of the inner court of the Convento Sao Francisco in Recife / Brazil. The curved lines will be straightened while viewing in a Web browser using a plug-in or applet. This panorama was taken free hand. Therefore it is not so precise as it should be.

Full spherical panoramas can be computed from two images taken with 8mm fisheye lenses. The exposure direction must differ exactly about 180 degree. Software packages are available for warping the two images into one rectangular bitmap with an aspect ratio of 2:1. Displayed with a panoramic viewer, the user can navigate in a whole sphere. Figure 11 shows a 35 mm SLR camera with an 8-mm fisheye lens, mounted on a panoramic head. The screenshot displays the interface of „Panoweaver“, a software running under Windows Systems.



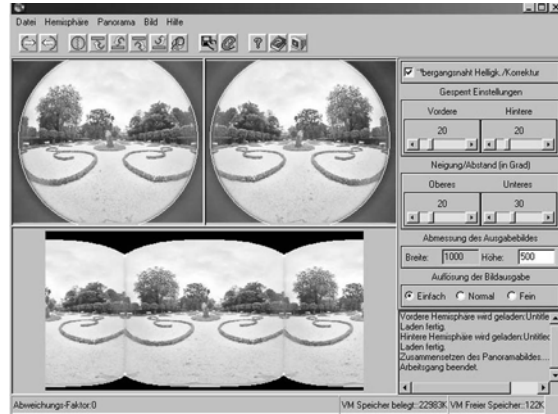


Figure 11: recording of panoramas with a fisheye lens.

### 3.3 Image objects

Taking a series of images from a fixed camera position while the object is rotating on a turntable provides photos for an image object. An image object can interactively inspected by selecting the rotation and the distance to the object. Processing those images can be done with QuickTime or MGI Picture Object Modeler. The software enables image selection, image adjustment and storage in different data formats like .avi or \*.fpx. The latter is a hierarchical image format, designed for distribution of high-resolution images. The Web server must be equipped with the according software to support the format. Figure 12 demonstrates the production of spin photo objects, here in stereo mode. Two digital cameras are computer controlled. Photos are taken in a time interval; the object rotates on the turntable in steps of 15 degrees for example. The software mentioned above supports masking as well, so that the environment can be corrected digital.



Figure 11: Computer controlled recording of image objects. Here a stereo arrangement with the object on a turntable.

### 3.3 Stereoscopic images

The usage of stereoscopic images covers a wide range of applications of computer visualization. Those can be entertainment, medical and forensic applications, topographic mapping or architecture. In all cases stereoscopic displayed data is far more effective for visualization than a flat presentation. Monoplotting from stereo pairs by means of correlation seems to be one of the major advantages of digital photogrammetry. Displaying the results in stereo with standard equipment on a PC-Workstation is one step more for a better acceptance of photogrammetry. Image separation is realized by spatial separation (cyber head), temporal separation (shutter glasses) or filtering (red/green anaglyphs).

Stereoscopic image pairs can be stored in one image file. Side by side is the basic arrangement of a stereo pair according to the position of the human eyes. From the two free viewing modes parallel and cross-eyed, parallel is limited to very small images. Therefore cross-eyed is the default mode of a JPS stereo pair. JPS is in fact a JPEG format, which allows specific stereo software to handle those images. For example a Web browser plug-in from Vrex Corp. interprets that format and converts it to the viewing mode available.

According to BMP or PNG (portable network graphics) the stereo formats BMS and PNS exist. While BMS has no direct form of compression, PNS is a no-loss form of compression. Using the JPS format, a moderate amount of compression is recommended, since a major loss of stereo quality will occur while reducing image information.

Figure 12 demonstrates the use of the Java applet stereoscope. The stereo image will be calculated upon request client sided. The server provides the left and right image. Alternatives for image separation can be selected from the applet menu.

Image pairs can be photographed by using a stereo bar as shown in figure 11. For artefacts a desktop scanner provides high quality images. Computer models must be rendered from different viewpoints.

#### **Conclusion:**

In addition to the conventional photogrammetric products like line drawings or contour line plotting new techniques and data formats for recording and documentation of 3d objects from images are developed. Image objects, VRML-models and hierarchical polygon models with texture mapping are distributed via the Internet. New data formats and plug-ins for Web browsers are introduced for sufficient transfer speed, image quality and interactive presentations.

Remark: The text presented here was a contribution to CAA 2001 Computer Applications in Archaeology, International Symposium, Gotland University, Visby, SE. Some modifications are added. Please refer to [www.imagefact.de](http://www.imagefact.de), images and examples are given there in colour and with the above-mentioned interactive facilities.

## References:

Pomaska, Günter

Stereoscopic Images for Visualization of Cultural Heritage,  
Contribution to ISPRS International Workshop "Photogrammetric Measurement, Object Modelling and Documentation in Architecture and Industry", Thessalonica, Greece, 1999

Pomaska, Günter

First Experiences with the new Digital Camera Rollei d7 metric  
Contribution to XVII CIPA International Symposium, Recife, Brazil,  
October 3-6, 1999

Pomaska, Günter

Documentation and Internet Presentation of Cultural Heritage Using Panoramic Image Technology  
Contribution to XVII CIPA International Symposium, Recife, Brazil,  
October 3-6, 1999

Pomaska, Günter

Präsentation von Architekturdaten im Internet  
Deutsche Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung e.V., 20. Wissenschaftliche Jahrestagung im Rahmen der InterGEO 2000 Berlin, 11. -13. Oktober, AK Nahbereichsphotogrammetrie

# Anwendungsbeispiele der differentiellen SAR-Interferometrie

BERNHARD T. RABUS<sup>1</sup>, OLIVER LANG<sup>1</sup>

*Die differentielle SAR-Interferometrie (DINSAR) ermöglicht die Messung von Verschiebungen der Erdoberfläche im cm-Bereich. Im Vortrag werden DINSAR-Anwendungsprojekte des DFD in den Bereichen Gletscherdynamik und Hangrutsch-Monitoring vorgestellt. Die Ableitung des Oberflächengeschwindigkeitsfeldes von Gletschern wird am Beispiel von Eisströmen in der Antarktis, sowie Talgletschersystemen in Zentralasien demonstriert. Die Messung der Gletscherbewegung in drei Dimensionen erfolgt dabei durch mehrfache Kombination von Interferogrammen der ERS-1/2 Tandem Mission (Wiederholrate der Satellitenbahn 1 Tag). Die Interferogramme haben unterschiedliche Basislinien und Sensorblickrichtung. Die Satellitendaten stammen von den DFD-Empfangsstationen O'Higgins, Antarktische Halbinsel, bzw. Kitab, Uzbekistan. Weiterer Input, außer den aus den Interferogrammen abgeleiteten Geschwindigkeiten in Sensor-Blickrichtung, sind eine ebenfalls interferometrisch bestimmte Geländeneigungskarte, sowie eine durch Digitalisierung von Morainen-Strukturen erzeugte Karte horizontaler Fließrichtung. Im Gegensatz zur Gletscherbewegung (Beobachtungsintervall 1 Tag) erfordert das Monitoring langsamer Hangbewegungen (zur Früherkennung sich anbahnender katastrophaler Hangrutsche) oder Bodenabsenkungen in der Regel längere Beobachtungsintervalle (Vielfache von 35 Tagen für ERS1/2 oder ENVISAT). Dies lässt in nicht-ariden Gebieten im allgemeinen keine flächige Kohärenz zu. Ein weiteres Problem bei kleinen Bewegungsraten sind atmosphärische Störungen. Bekannte Lösungsansätze zur Erstellung von Bewegungskarten aus isolierten kohärenten Bereichen, sind Kohärenzmasken, sowie die "Permanent-scatterer" Technik. Erste Erfahrungen mit diesen Techniken am DFD werden vorgestellt.*

## 1 Einleitung

In den vergangenen zehn Jahren etablierte sich mit der Synthetischen Apertur Radar (SAR) Interferometrie eine neuartige Disziplin der Satellitenfernerkundung, welche es erlaubt kleinste Verschiebungen auf der Erdoberfläche sichtbar zu machen. Der überwiegende Teil der Datengrundlage für die interferometrische Beobachtung stammt von den europäischen Umweltsatelliten ERS-1 (im Einsatz 1991-2000) und ERS-2 (seit 1995). Vor allem die Szenen der sogenannten Tandemmissionen, während denen beide Satelliten 24 Stunden zeitversetzt das selbe Gebiet überfliegen, erlauben neue Anwendungsmöglichkeiten.

Ein Interferogramm ist eine Phasendifferenzmessung zweier komplexer SAR Aufnahmen desselben Gebietes (Abb. 1). Bildregionen mit gleicher interferometrischer Phase erhalten anschließend denselben Grauton oder Farbwert. Linien gleichen Phasenwertes nennt man Fringes. Abb. 1a macht deutlich, dass die Weglängendifferenz und damit die interferometrische Phase  $\Phi$  von der topographischen Höhe  $H$  des Objektpunktes abhängen. Näherungsweise gilt folgende Proportionalitätsbeziehung für die Topographie abhängige Phasendifferenz:  $\Phi_{\text{topo}} \sim B \cdot H$ . Bei genauer Kenntnis der Aufnahmegeometrie lässt sich über diesen Zusammenhang die Geländehöhe rekonstruieren (Zebker und Goldstein, 1986). Das DFD

---

<sup>1</sup> Dr. Bernhard T. Rabus, Deutsches Fernerkundungsdatenzentrum, Oberpfaffenhofen, 82234 Wessling

erstellt mit dieser Technik hoch genaue digitale Geländemodelle aus ERS-Tandem- und Space Shuttle- (SRTM) Daten.

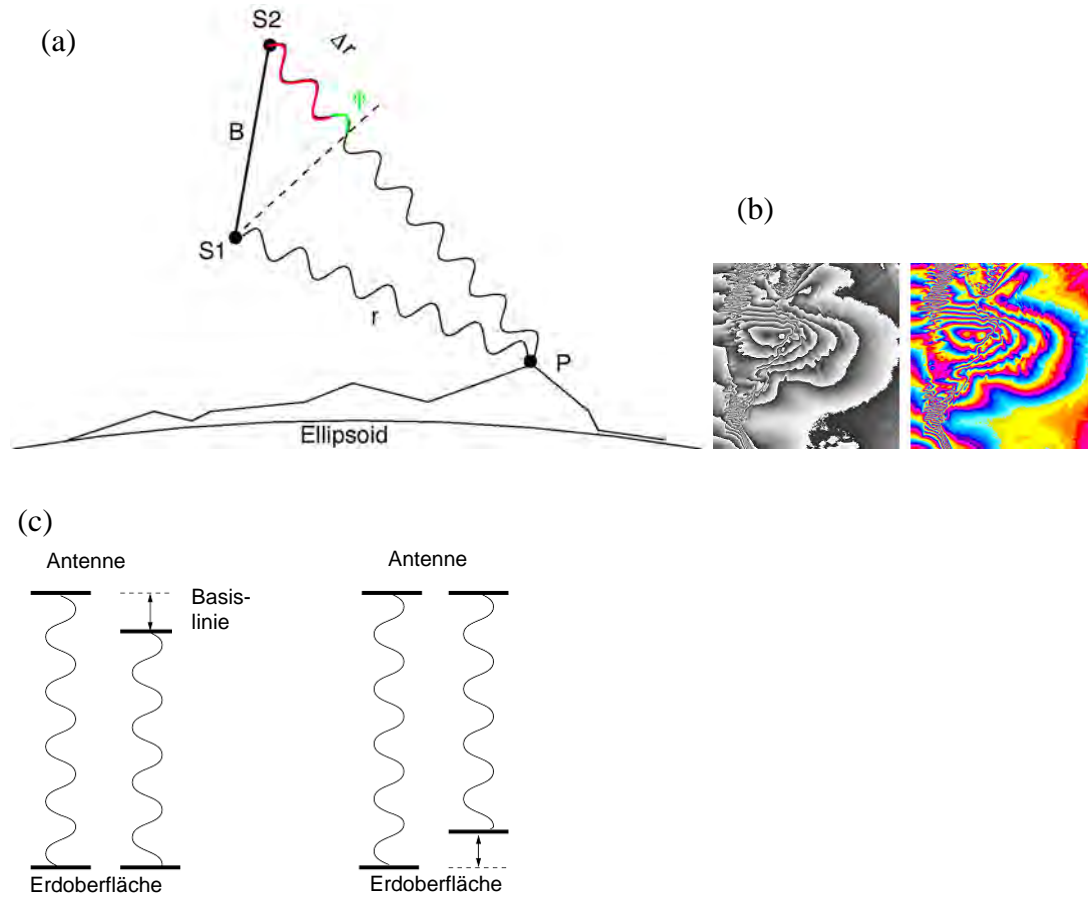


Abbildung: Interferometrisches Aufnahmeprinzip. (a) Aufnahmegeometrie: Grün: gemessene Phasendifferenz, rot: komplett durchlaufene Wellenzyklen. S1 und S2 bezeichnen die Satellitenpositionen. (b) Interferogramm. Beide Darstellungen eines Interferogramms sind äquivalent. Der Wertebereich von 0 bis  $2\pi$  wird entweder von weiß nach schwarz oder als Regenbogenfarben durchlaufen. (c) Vereinfachte interferometrische Aufnahmegeometrie zur Erzeugung von Geländemodellen (links) bzw. zur Ableitung von Oberflächenverschiebungen (rechts). Eine identische Phasenverschiebung zwischen zwei Aufnahmen kann unterschiedliche Ursachen haben.

Eine Phasenverschiebung  $\Phi_{\text{mot}}$  zwischen den beiden Radaraufnahmen kann allerdings auch durch eine Verschiebung der Erdoberfläche  $\Delta s$  in Sensorblickrichtung anstatt durch eine Weglängendifferenz verursacht werden (Abb. 1b). Man erhält für diesen Fall folgenden Zusammenhang:  $\Phi_{\text{mot}} \sim \Delta s$ . Im allgemeinen sind in einem Interferogramm sowohl die Phasenanteile der Topographie als auch der Oberflächenbewegung enthalten. Es gilt also  $\Phi = \Phi_{\text{topo}} + \Phi_{\text{mot}}$ . Beide Komponenten sind a priori nicht voneinander zu unterscheiden. Die Trennung beider Anteile erfolgt durch Hinzunahme eines weiteren Interferogramms derselben Region. Der topographische Phasenanteil  $\Phi_{\text{topo}}$  skaliert mit der Basislinie  $B$  und variiert daher in verschiedenen Interferogrammen. Der Bewegungsanteil  $\Phi_{\text{mot}}$  dagegen erscheint bei konstanter Bewegung der Erdoberfläche stets identisch. Aufgrund dieses Verhaltens kann durch

Differenzierung zweier Interferogramme ein reines Topographie- bzw. Bewegungsinterferogramm erzeugt werden. Diese Vorgehensweise wird als differenzielle Interferometrie bezeichnet, die Endprodukte sind differenzielle Interferogramme. Die differenzielle Interferometrie ermöglicht es, großräumige Verschiebungen sehr genau zu vermessen. Die Genauigkeit der Messungen liegt bei etwa  $1/5$  Wellenlänge pro Aufnahmezeitraum (Goldstein et al. 1993). Bei ERS-Tandemdaten kann man daher Bewegungen bis minimal 1 cm/Tag in Sensorblickrichtung detektieren. Die wichtigste Einschränkung für den Einsatz der Radarinterferometrie ist der Verlust der Kohärenz zwischen beiden Einzelaufnahmen. Die Kohärenz ist ein Maß für die Veränderungen zwischen beiden Datensätzen. Große räumliche und zeitliche Trennung beider Aufnahmen und die Veränderung von Streuern an der Erdoberfläche, beispielsweise durch Wind oder Niederschlag, führen zur Dekorrelation der Phasenwerte und damit zum Verschwinden der Fringemuster. Eine Einschränkung der Genauigkeit der Bewegungsmessung entsteht des Weiteren durch Phasen-Artefakte welche durch optischen Weglängenunterschiede bei unterschiedlicher atmosphärischer Wasserdampfverteilung an den zwei Aufnahmezeitpunkten des Interferograms entstehen. Trotz dieser Einschränkungen lassen sich mit der sogenannten "Permanent Scatterer"-Methode (Ferretti et al., 2000) unter bestimmten Bedingungen dennoch auch für nichtaride Gebiete sich über viele Jahre erstreckende Bewegungszeitreihen ohne atmosphärische Kontamination ableiten. Voraussetzungen sind zum einen ein ganzer Stapel ( $> 20$ ) deckungsgleicher interferometriefähiger Szenen, sowie zum anderen das möglichst zahlreiche Vorhandensein stabiler Punktstreuer. Solche stabilen Streuer, welche die Phase eines Pixels dominieren und über beliebig lange Zeit kohärent bleiben, kommen in Form von Felsblöcken natürlich vor. Wesentlich höhere Dichten treten aber in Städten in Form künstlicher Streuelemente an Hausfassaden etc. auf. Die Identifizierung der entsprechenden kohärenten Bildpixel sowie die Trennung von Topographie-, Bewegungs- und Atmosphärenanteil des räumlich-zeitlichen Datensatzes mit aufwendigen statistischen Methoden bilden das Kernstück der Methode. Mit der "Permanent Scatterer"-Methode lassen sich noch Absenkungen und Verschiebungen der Erdoberfläche in der Größenordnung Millimeter pro Jahr in ihrem zeitlichen Verlauf genau vermessen.

## 2 Massenbewegungen

Zur Beobachtung von Massenbewegungen mit SAR-Interferometrie eignen sich vor allem kriechende Rutschungen mit Bewegungsraten von mehreren Zentimetern bis Metern im Jahr. Plötzlich abgehende Massen dagegen können dagegen mit dieser Technik nur sehr eingeschränkt quantitativ gemessen werden, da die hohen Bewegungsraten und die Umgestaltung der Oberfläche das Phasensignal dekorellieren lassen. Die Massenbewegung von La Valette (Abbildung 2) befindet sich bei Barcelonnette in den französischen Westalpen. An der Kontaktfläche quartärer Moränenablagerungen und wasserundurchlässigen Schichten der Terres Noires, aus schwarzen Mergeln bestehende Bereiche der helvetischen Decken, löste sich 1982 auf einer Fläche von 26 ha Moränenmaterial ab. Mittlerweile gilt die Massenbewegung von La Valette mit fast 60 ha als eine der größten Frankreichs. Sie ist etwa 2 km lang und 150 bis 500 m breit.

Abbildung 5a zeigt ein Interferogramm der Massenbewegung und ihrer Umgebung. Es entstand aus zwei ERS-Aufnahmen, deren Überflüge 24 Stunden getrennt waren (10. und 11. März 1996). Weiß bedeutet ein Phasenwert von  $2\pi$ , schwarz von 0. Der Talboden erscheint relativ homogen, während die Rutschung sich nur unscheinbar von den Fringes der Bergregion darüber abhebt. Die Variationen der Phase auf der Massenbewegung entsprechen den Bewegungsraten während 24 Stunden in Blickrichtung der Radarantenne. Das restliche Phasenmuster ist ausschließlich auf den Einfluss der Topographie zurückzuführen. Mit der oben beschriebenen Methode wurden beide Anteile voneinander getrennt. Aus dem

so gewonnen Bewegungsinterferogramm konnte ein detailliertes Geschwindigkeitsfeld der Bewegung abgeleitet werden (Abbildung 2b). Der Vergleich mit Bodenmessungen (R.T.M. 1996) ist in Tabelle 1 dargestellt. Die Standardabweichung der interferometrischen Werte gegenüber den Bodenmessungen beträgt 0,6 cm/Tag. Berücksichtigt werden muss hierbei, dass die Satellitendaten die Geschwindigkeiten während eines Tages, die Bodenmessungen dagegen Mittelwerte über 36 bzw. 117 Tagen darstellen. Ein offensichtlicher Vorteil der Satellitenmessung gegenüber punktuellen Geländemessungen ist die flächenhafte Abbildung. Der Abgrenzung von bewegenden und ruhendem Untergrund ist offensichtlich. Auch quantitative Aussagen hinsichtlich der Größe des Erdrutsches und verschiedener Mobilitätszonen sind leicht möglich.

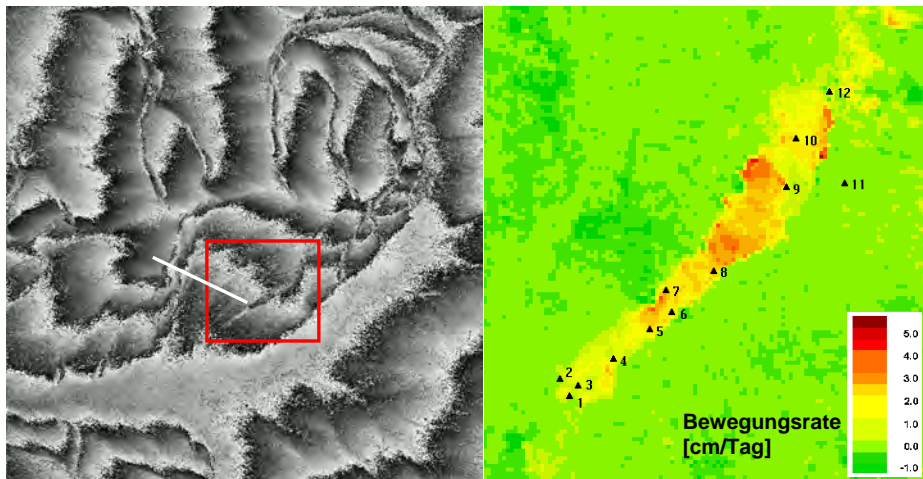


Abbildung 2 a) Interferogramm der Massenbewegung von La Valette (10./11. März 1996), der markierte Bereich ist in b) dargestellt. b) Daraus abgeleitetes Geschwindigkeitsfeld der Rutschung. Nummerierte Markierungen bezeichnen Orte der Bodenmessungen.

Messpunkt	R.T.M. März 1996 [cm/Tag]	Interferogramm [cm/Tag]
1	0,1	0,5
2	0,26	0,5
3	0,01	0
4	1,4	1,0
5	keine Daten	2,0
6	3,3	2,0
7	3,3	2,0
8	4,0	2,5
9	1,6	1,5
10	2,0	1,5
11	0,01	0
12	2,17	1,0

Tabelle 1: Vergleich der im Gelände gemessenen Bewegungsraten (R.T.M.) mit den interferometrisch gemessenen. Messzeitraum der R.T.M. Daten: 36 bzw 117 Tage. Die Numerierung der Messpunkte bezieht sich auf Abb. 2b.

Die systemtypische Schrägsichtgeometrie und die Zuordnung von Pixeln im Bild über Laufzeitmessungen des Radarechos lassen Sensor zugewandte Hänge verkürzt und abgewandte Hänge länger als in Realität erscheinen. Bei der Auswahl der Szenen muss daher auf

eine Satellitenblickrichtung in Hangneigungsrichtung geachtet werden. Zudem darf die Massenbewegung nicht senkrecht zur Blickrichtung, orientiert sein, da hierdurch die messbare Bewegungskomponente in Richtung Antenne minimal ist.

Weitere Forschungsarbeiten über interferometrisch beobachtete Massenbewegungen beschreiben Fruneau et al. (1997) und Rott (1999). Letztere Arbeit zeigt, dass oberhalb der Baumgrenze zu schneefreien Zeitpunkten die Phasenkohärenz über ein Jahr erhalten bleiben kann. In diesem Fall können durch Kombination zeitlich lang getrennter Radarbilder noch Bewegungsraten von wenigen Zentimetern pro Jahr gemessen werden. Ein operationeller Einsatzbereich der Interferometrie liegt in der kontinuierlichen Überwachung größerer bekannter Rutschungsgebiete und in der Detektion neuer Massenbewegungen in schlecht zugänglichem Gelände. Der Einsatz von Flugzeug getragenen differenziellen Interferometrie Systemen wird in Zukunft die Möglichkeiten erheblich erweitern. Eine deutlich verbesserte räumliche Auflösung und frei wählbare Überflughäufigkeiten und -richtungen eliminieren Einschränkungen Orbit-basierter Systeme.

### 3 Gletscherbewegung

Ein wichtiger Einsatzbereich der differenziellen SAR-Interferometrie ist die Messung von Gletscherbewegungen in polaren Regionen. Die folgenden zwei Anwendungen demonstrieren die Stärken der SAR-Interferometrie: die großflächige Messung sehr kleiner Bewegungen.

Im Oktober 1996 kam es unter der größten Eiskappe Europas, dem Vatnajökull in Island, zu einem folgenschweren Vulkanausbruch. Der Hauptteil des Schmelzwassers sammelte sich in einer nahe der Ausbruchsstelle gelegenen subglazialen Caldera, der Grimsvötn. Der umgebende Druck des Eisschildes schloss das Wasser im Krater ein (Björnsson, 1988). Etwa 3 Wochen nach Ende der Eruption überschritt die angesammelte Wassermenge einen kritischen Wert: innerhalb von drei Tagen flossen etwa  $4 \text{ km}^3$  Schmelzwasser aus. Die folgende verheerende Flutwelle zerstörte Leitungen, Brücken und Teile der isländischen Ringstraße. Solche Fluten, genannt Jökullhlaups, sind ein häufiges Phänomen in Gletscherregionen mit geothermaler Aktivität. Die Interferogramme 3a und 3b bilden den selben Ausschnitt des Vatnajökull zu zwei verschiedenen Zeitpunkten ab. Das zugehörige Intensitätsbild 6c zeigt die Ausbruchsregion und die schneebedeckte Oberfläche des Kraters. Die Phasenvariationen im Bereich der Grimsvötn sind als Hebungen interpretierbar. Ein Phasenzyklus von rot nach blau entspricht einer Verschiebung an der Erdoberfläche von einer halben Wellenlänge ( $2,8 \text{ cm}$ ) in Satellitenrichtung. Aus dem Interferogramm 3a ermittelt man daher eine Vertikalbewegung des  $250 \text{ m}$  mächtigen Eisschildes um  $7 \text{ cm/Tag}$ , verursacht durch in die Caldera einströmendes Wasser. Das Interferogramm 3b entstand zwischen Vulkanausbruch und Jökullhlaup. Die Hebungsraten sind mit  $70 \text{ cm/Tag}$  ungleich höher. Das Interferogramm gibt Auskunft über die Fläche des subglazialen Sees ( $47 \text{ km}^2$ ) und die Zulaufsraten. Bei Kenntnis der Bodentopographie kann somit der Zeitpunkt des Jökullhlaups und die zu erwartende Wassermenge abgeschätzt werden. Unmittelbar nach Beginn der Eruption waren nur Radarbilder der Ausbruchsregion verfügbar, da dichte Bewölkung und Wasserdampf eine Beobachtung mit optischen Methoden bzw. Befliegungen verhinderten.



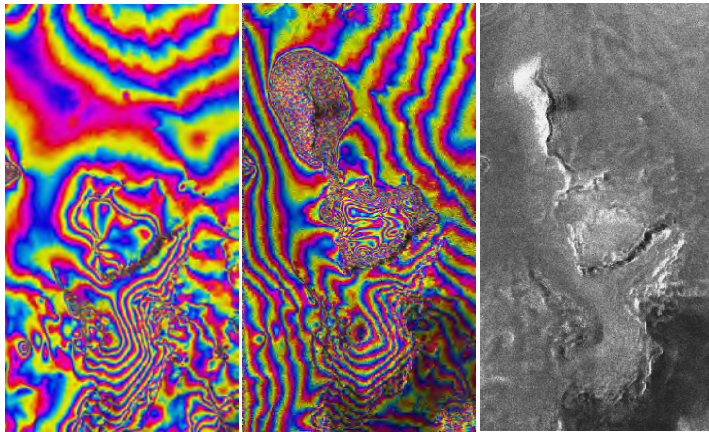


Abbildung 3: a) Interferogrammausschnitt des Vatnajökull vor Ausbruch, Datum 30./31.12..95, b) nach Ausbruch, Datum: 21./22.10..96, c) Intensitätsbild zu b). Deutlich sichtbar ist die durch die Eruption erzeugte Spalte im Gletschereis

Auch für die Analyse langfristiger Änderungen im Zusammenhang mit dem globalen Klimawandel kann die SAR Interferometrie wichtige Beiträge liefern. In einem aktuellen Forschungsprojekt des DFD werden Veränderungen von westantarktischen Küstengletschern während der vergangenen Dekade analysiert. Insbesondere sind Zeitreihen der Fließgeschwindigkeiten und der Position der Aufsetzlinie als dem Übergang von Festlandeis zu schwimmendem Eis, interessant. Landwärtiger Rückzug der Aufsetzlinie kann als Verdünnung des Gletschers infolge sich erwärmenden Meerwassers gedeutet werden. Ein langanhaltender Rückzug sowie eine Zunahme des Eisflusses wären Indizien für eine mögliche Instabilität dieses Teils des westantarktischen Eisschildes. Ein völliger Kollaps des weitgehend unter dem Meer aufsitzenden westantarktischen Eisschildes (Hughes, 1977), würde zu einem globalen Meeresspiegelanstieg von 6 bis 7 m führen (Bentley, 1998). Die differenzielle Interferometrie ist die einzige Technik, mit der man, zeitlich und räumlich ausgedehnt, eine exakte Positionsbestimmung der glaziologisch wichtigen Aufsetzlinie ermitteln kann.

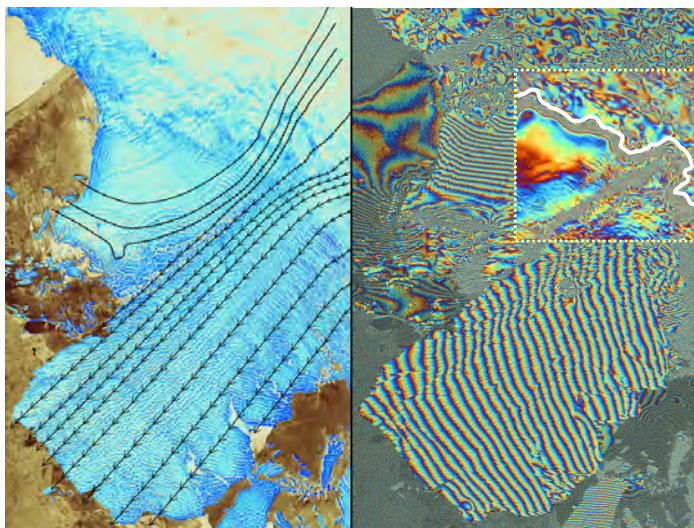


Abbildung 4: a) künstlich eingefärbtes Intensitätsbild mit interferometrisch abgeleiteten Flusslinien. Die Länge der einzelnen Pfeile ist proportional zur Fließgeschwindigkeit des Gletschers. b) zugehöriges Interferogramm. Der umrahmte Bereich ist durch ein elles Interferogramm ersetzt. Die Aufsetzlinie ist weiss markiert.

Das Intensitätsbild 4a zeigt einen Küstenabschnitt der Westantarktis nahe des Thwaites Gletschers. Die Linien deuten Eisflusslinien an, die aus einem interferometrisch erzeugten Geschwindigkeitsfeld ermittelt wurden. Gegenübergestellt das zugehörige Interferogramm (4b). Der gelb umrahmte Bereich wurde durch ein differenzielles Interferogramm ersetzt. Die Differenzenbildung zweier Interferogramme eliminiert stetige Bewegungsanteile. Sichtbar bleiben die Topographie und nicht-konstante Veränderungen. Unterschiedliche Tidenstände zu den Aufnahmezeitpunkten führen zur Flexur des schwimmenden Gletscherteils in einer Zone entlang der Küste und erzeugt den im differenziellen Interferogramm sichtbaren Fringegürtel. Die landwärts gerichtete Begrenzung der Flexur markiert die Position der Aufsetzlinie.

## 4 Erdbeben

Nach dem heutigen Kenntnisstand seismischer Forschung ist eine *kurzfristige* Vorhersage von Erdbeben prinzipiell nicht möglich. Daher verlagert sich der Schwerpunkt seismologischer Risiko-Forschung derzeit auf die Vorhersage der Bodenbewegung für realistische Erdbebenszenarien mittels numerischer Simulationen. In diesem Zusammenhang kann die SAR-Interferometrie für die mittel- bzw. langfristige seismische Risikoabschätzung eine wichtige Rolle spielen. Massonnet et al. (1993) beobachteten erstmals das plattentektonische Verschiebungsfeld, das während eines Bebens in Kalifornien auftrat. Ein weiteres Beispiel zeigt Abbildung 5a. Das differenzielle Interferogramm bildet die Bewegung der Erdoberfläche des verheerenden Bebens von Izmit, Türkei, am 17.8.99 ab. Die verwendeten Aufnahmen stammen vom 12.8. und 16.9.99. Ein Farbverlauf von rot nach blau ist als gegenseitige Verschiebung von 2,8 cm in Blickrichtung, das sind etwa 7 cm horizontal entlang der Bruchzone zu deuten. Der Verlauf der Fringes markiert also den Gradienten des Versatzes der Erdoberfläche. Die totale Verschiebungsrate zwischen zwei Bildpunkten erhält man daher durch Aufsummieren der dazwischenliegenden Phasendurchgänge. Die Verschiebungsrate entlang des gestrichelten Profils ist in Abbildung 5b schematisch wiedergegeben.

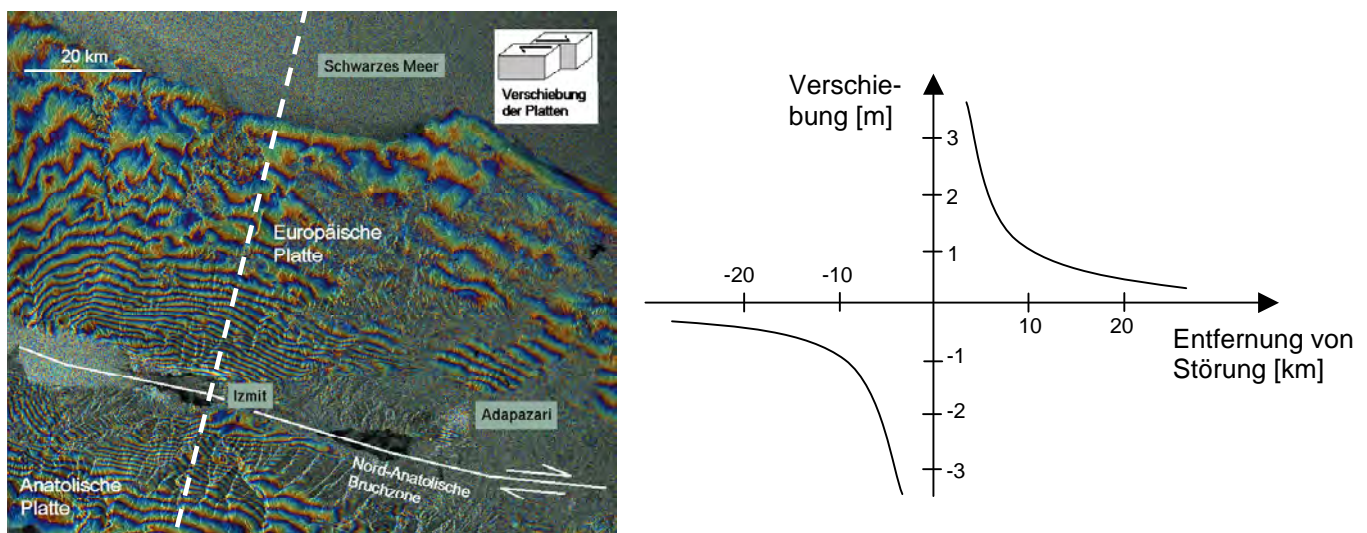


Abbildung 5 Izmit Erdbeben 17.8.99 (a) Interferogramm. Aufnahmezeitpunkte: 12.8.99 und 16.9.99. (b) Schematische Verschiebung an der Erdoberfläche entlang des gestrichelten Profils in Abb. 8 aus Interferogramm abgeleitet

Die oben genannten Beispiele geben die Bewegung der Erdoberfläche durch starke Erdbeben wieder, was als co-seismische Deformation bezeichnet wird. Von großer Bedeu-

tung für die zukünftige Spannungsverteilung und damit das seismische Risiko ist die post-seismische Deformation, die als Folge der Spannungsumverteilung nach großen Erdbeben stattfindet. Dieser Prozess kann mehrere Jahre andauern und – wie nach dem Landers Erdbeben 1992 (M7.3) in Kalifornien – in Regionen bis zu mehreren Hundert Kilometern entfernt vom Epizentrum zu erhöhter Seismizität führen (Gomberg et al., 2001). Zur Berechnung der durch die Deformation hervorgerufenen Spannung in der Erdkruste sind Modelle der viskoelastischen Eigenschaften der Kruste notwendig. Hierbei kann die 3D Struktur eine große Rolle spielen. Mit zuverlässigen Modellen der Erdkruste könnte somit in Zukunft unter Verwendung von SAR-Beobachtungen der Deformationen an der Erdoberfläche der Spannungsauf- und -abbau in der Erdkruste verfolgt werden. So wäre eine mittelfristige Vorhersage eines erhöhten seismischen Risikos in einer seismisch gefährdeten Region möglich.

## 5 Ausblick

Die differenzielle SAR Interferometrie eignet sich hervorragend zur kostengünstigen und großflächigen Analyse von Oberflächendeformationen. Hauptsächliche Einschränkungen sind die Verfügbarkeit von Daten und der Verlust an Kohärenz. Ferretti et al. (2000) entwickelten die ‚Permanent Scatterer‘-Methode bei der durch interferometrische Stapelung von vielen Szenen langfristig kleinste Bodenverschiebungen detektiert werden können. Voraussetzung ist hierbei das Vorhandensein dauerhafter Reflektoren, wie es hauptsächlich in urbanen Regionen der Fall ist. Multifrequente und mobile, Flugzeug-basierte Sensoren werden in Zukunft die Anwendungsmöglichkeiten der Interferometrie erweitern. Beispielsweise bietet sich der Einsatz längerer Wellenlängen in Regionen mit starken Dekorrelationseinflüssen, wie dichter Vegetation, an.

## 6 Literaturverzeichnis

- Bentley, C.R.. 1998. Rapid sea-level rise from a West Antarctic ice-sheet collapse: a short-term perspective. *Journal of Glaciology*, **44**(146): 157-163
- Björnsson, Helgi (1988): Hydrology of Ice Caps in Volcanic Regions. Visindafelag Islendinga, Societas Scientiarum Islandica, Rit. XLV
- Ferretti, A., C. Prati, F. Rocca (2000): Monitoring of Terrain Motion Using the PS Technique. *Proceedings EUSAR 2000, 3<sup>rd</sup> Europ. Conference on SAR*, München
- Fruneau, B., C. Delacourt, J. Achache (1997): Observation and modelling of the Saint-Etienne-de-Tigne Landslide Using SAR Interferometry. In: *Proc. of Fringe 96 Workshop on ERS SAR Interferometry*, Zürich, ESA SP-406
- Goldstein, R.M., H. Engelhardt, B. Kamb, R.M. Frolich (1993): Satellite Radar Interferometry for Monitoring Ice Sheet Motion: Application to an Antarctic Ice Stream. *Science*, **262**: 1525-1530
- Gomberg, J., P.A. Reasenber, P. Bodin, R.A. Harris (2001): Earthquake triggering by seismic waves following the Landers and Hector Mine earthquakes, *Nature*, **411**, 462-466.
- Hughes, T. (1977): West Antarctic ice streams. *Reviews of Geophysical Space Physics*, 1-46
- Massonnet, D, M. Rossi, C. Carmona, F. Adragna, G. Peltzner, K. Feigl, T. Rabaute (1993): The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry. *Nature*, **364**: 138-142
- Rott H., B. Scheuchel & A. Siegel (1999): Monitoring very slow slope movements by means of SAR interferometry: A case study from mass waste above a reservoir in the Ötztal Alps, Austria. *Geophysical Research Letters*, **26**, No.11,1629-1632, 1999
- R.T.M. (1996): Service Restauration des Terrains en Montagne, Préfecture des Alpes de Haute-Provence. La Valette, Digne

Zebker, H.A. und R. Goldstein (1986): Topographic mapping from interferometric SAR observations. *Journal of Geophysical Research*, **91**: 4993-5001

# Multi-Sensor-Ansätze in der Nahbereichsphotogrammetrie

**RALF REULKE<sup>1</sup>, MARTIN SCHEELE<sup>1</sup>, KARSTEN SCHEIBE<sup>1</sup>,  
MICHAEL POSPIS<sup>2</sup>, ALLAN ASPELMEIER<sup>2</sup> &  
BERNHARD STRACKENBROCK<sup>2</sup>**

*Abstract: Analog measurement procedures in close range photogrammetry (e.g. with theodolites) can be supplemented with digital approaches, in the near future they will be substituted more and more. High resolution imaging systems and laser scanners offer new opportunities for preservation of historic buildings and monuments. The measurement results of the laser scanner systems are high resolution digital surface models. A promising approach is to merge these data with the texture obtained from a high resolution panoramic scanner. This paper shows the potential of a multisensor approach and data fusion with data from both systems for different close range photogrammetry applications.*

## 1 Einleitung

Im Denkmalpflegebereich werden die gängigen Vermessungsverfahren, z.B. Handaufmaß, Theodolithmessung oder Messungen mit analogen Kameras, immer mehr durch digitale Verfahren abgelöst. Neben den klassischen digitalen Matrix-Kameras werden auch hochauflösende Panoramakameras verwendet, die auf Zeilensensoren beruhen. Dabei wird der Zeilensensor, der parallel zur Rotationsachse steht, im Hauptpunkt der Optik gedreht (REULKE R. & SCHEELE M.; 1998). Der Einsatz von CCD-Zeilen gewährleistet eine hohe geometrische Auflösung bei einem großen Öffnungswinkel. Mit der EyeScan-Baureihe der Firma KST GmbH Kamera & System Technik, die zusammen mit dem DLR entwickelt wurde, werden Bilddatensätze von etwa 10.000 × 50.000 Bildpunkten für einen 360° Scan in true colour und 14 bit radiometrischer Auflösung (ca. 3 Gbyte/Scan) generiert. Neben einer hohen Detailauflösung sind Stereoaufnahmen zur Rekonstruktion der Form des beobachteten Objekts möglich. Daraus lassen sich anschließend herkömmliche Produkte wie entzerrte Fassadenansichten und Orthophotos erzeugen.

Für die Gewinnung der Stereodaten erweist es sich als problematisch, dass im allgemeinen ein zweiter Standort notwendig ist. Desweiteren sind die zu einem Oberflächenmodell zu verarbeitenden Stereoscannerdaten von Gebäudeoberflächen oft unstrukturiert und selbstähnlich und damit ein kritischer Faktor bei einer Bildpunktzuoordnung.

---

<sup>1</sup> Dr. Ralf Reulke, Dr. Martin Scheele, Karsten Scheibe, German Aerospace Center DLR, Institute of Space Sensor Technology and Planetary Exploration, Rutherfordstrasse 2, 12484 Berlin

<sup>2</sup> Michael Pospis<sup>2</sup>, Allan Aspelmeier, Bernhard Strackenbrock, Octocom AG, Deutschland, Am Wacholderbusch 1-3, 16547 Birkenwerder

Deshalb werden für die Gewinnung der 3D-Informationen häufig Rotations-Laserscanner verwendet.

Von besonderem Interesse ist die Kombination aus geometrieegebenden Scannerdaten und hochauflösenden Farbbilddaten. Obwohl dieser Gedanke naheliegend ist, findet man kaum solche Ansätze mit jeweils höchstaflösenden Systemen. Der Beitrag beschreibt neben den Systemen die Datenverarbeitung und den Prozess der gegenseitigen Datenzuordnung an ausgewählten Beispielen.

## 2 Der Laserscanner

Der Laserscanner dient der Gewinnung von 3D-Informationen, die mit sehr hoher Geschwindigkeit und in hoher Dichte gewonnen werden sollen (ALBERTZ J. & WIEDEMANN A.; 1997). Der Laser-Scanner der Fa. Zoller & Fröhlich erfasst seine Umgebung mit 8000 Messungen in der Horizontalen (360°) und 1400 Messungen in der Vertikalen. Diese 11 Millionen Messpunkte werden in weniger als 2 Minuten erfasst, bei einer maximalen Messrate von 625.000 Messpunkten pro Sekunde. Ein weiterer Vorteil des verwendeten Scanners ist, dass die Intensität des reflektierten Laserlichts als Grauwert erfasst wird. Aufwendiges Beleuchten der Umgebung entfällt aufgrund des aktiven Messverfahrens.

## 3 Der Panoramascanner EyeScan

Die EYESCAN – M2 Metric ist eine digitale 360° Panoramakamera für Photogrammetrieanwendungen, die gemeinsam von der Dresdner Firma KST und dem DLR in Berlin entwickelt wurde. Es ist eine hochauflösende Kamera für den stationären und mobilen Einsatz. Die hohe Auflösung wird für einen großen Öffnungswinkel realisiert. Dazu wird ein CCD-Zeilensensor mit mehr als 10.000 Detektorelementen im Hauptpunkt der Optik reproduzierbar gedreht. Dieses Kamerasystem wird vorrangig als bildgebendes Meßsystem zur Erstellung von 360°-Panoramaaufnahmen in der Nahbereichsphotogrammetrie verwendet. Durch die Kombination mit einem leistungsfähigen und portablen Computer ist die EYESCAN – M2 Metric flexibel einsetzbar (Abb.1).



Pixelanzahl	3 × 12.000 (RGB)
Radiometrische Dynamik/Auflösung	14 Bit/8 Bit pro Band
Shutter-Geschwindigkeit	4 ms ... ∞
Datenrate	15 MByte/s
Datenvolumen (360° Scan)	3 GByte
Scandauer (360° Scan)	4 min

Abb. 1: Panoramakamera EYESCAN – M2 Metric

Das System besteht aus folgenden Komponenten:

- Kamerakopfmodul als kalibrierte Messkammer mit fest eingebautem Hochleistungs-Digitalobjektiv
- Präzisionsdrehtisch mit Schneckengetriebe und DC-Getriebemotor als Antriebsmodul
- Theodolitenstativ mit Nivellierdreifuß
- Portabler PC mit Frame-Grabber und TFT-Display

## 4 Experiment Neuschwanstein

Am 6. März 2001 wurde ein Experiment in Neuschwanstein mit dem Ziel durchgeführt, die hochauflösenden Daten der EyeScan Kamera mit den Daten des Laserscanners zu kombinieren. Die Bilddaten wurden vom Zentrum des Hofes mit einem 360° Schwenk aufgenommen. Zusätzlich wurde die Optik des Systems um 30° geneigt, so dass der Mittelteil des Schlosses erfasst werden konnte. Da die Bildgeometrien bekannt sind, können die Daten so zueinander transformiert werden, dass sie geometrisch aufeinander gesetzt werden können. Das Bild hat im Original eine Auflösung von  $20.400 \times 54.000$  Pixel und umfasst damit ein Datenvolumen von 6 Gigabytes bei 3 Kanälen (RGB) und einer radiometrischen Auflösung von 14 Bit.



Abb. 2: 360° Aufnahme und drei Detailansichten vom Panoramascanner

Abb.2 zeigt eine Übersicht der 360° Aufnahme und drei Detailansichten ausgewählter Objekte der Szene (die Uhr vom hinteren Gebäude, die obere Tür als Eingang zum Mittelteil und ein Ausschnitt der Frontseite des Schlosses).

Das entsprechende Bild des Laserscanners ist in Abb. 3 dargestellt. Besonders bemerkenswert ist die starke Verzerrung, die durch die geometrischen Verhältnisse der Aufnahme gegeben ist.



Abb. 3: Datensatz vom Laserscanner

Für die weitere Datenverarbeitung und eine Zuordnung der Kameradaten zu den Laserscannerdaten ist es vorteilhaft, die Daten von exakt dem gleichen Standpunkt zu generieren. Da in diesem Experiment die Daten zeitlich parallel erfasst wurden, konnte diese Forderung nicht eingehalten werden.

Prinzipiell kann eine Koregistrierung der Datensätze in einem solchen Fall durch zwei Ansätze realisiert werden. Entweder über eine exakte Orts- und Lagekenntnis für jedes Bildelement oder über eine klassische Bildpunktzuordnung (Matching).

Innerhalb des Neuschwanstein-Experiments wurde auf eine aufwendige Datenverarbeitung verzichtet. Die Koregistrierung wurde durch eine partielle Korrektur der Daten ermöglicht. Bei dieser Korrektur werden die Daten auf eine Bezugsebene projiziert, was dem Übergang von Zylinder- oder Kegelkoordinaten in kartesische Koordinaten entspricht (SCHEELE M., BÖRNER A., REULKE R. & SCHEIBE K.; 2001).

Um eine Koregistrierung (Abb. 6) zu ermöglichen, wurden die Bilddaten partiell korrigiert (Abb. 4 & 5).



Abb. 4: Korrigiertes Panoramabild



Abb. 5: Korrigiertes Laserscannerbild





Abb. 6: Koregistrierung von Laserscanner- und Panoramascanneraufnahme

Bei der Transformation der Laserscannerdaten muss der Zusammenhang zwischen den originalen und korrigierten Daten gespeichert werden, um eine spätere Zuordnung der Panoramakameradaten zu kartesischen Koordinaten zu ermöglichen.

## 5 Experiment Residenz München

Im Rahmen eines Experiments in der Residenz München wurden Daten des Laserscanners mit denen einer Reseaukamera kombiniert. Dabei fanden klassische photogrammetrische Verfahren Anwendung. Prinzipiell bleiben diese Algorithmen auch beim Einsatz der Rotationskamera erhalten.

In Abbildung 7 und 8 ist am Beispiel einer Orthophotodarstellung die Verknüpfung eines „4D“-Laserscans (drei Ortskoordinaten und eine Reflektanzinformation) mit einem digitalisierten, orientierten Farbphoto (aufgenommen mit einer klassischen Reseaukamera) demonstriert. Abb. 7 (links) zeigt das aus den reinen Laserscannerdaten gewonnene Orthophoto mit einer vorgegebenen Pixelgröße von  $3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ . Jedes Pixel des Grauwertbildes wurde dabei anhand der zugehörigen 3D-Koordinaten auf eine vorgegebene Ebene projiziert. Weiße Stellen entstehen durch Verdeckungen. Das digitalisierte Reseaukamerabild (Abb. 7 rechts) wurde entzerrt und über natürliche Verknüpfungspunkte relativ zum Laserscan orientiert.



Abb. 7: Orthophoto der Laserscannerdaten (l.) und Reseaukamerabild (r.)

Dann kann die Farbinformation mit einer Pixelauflösung von z.B.  $1\text{ mm} \times 1\text{ mm}$  mittels des  $3\text{ mm} \times 3\text{ mm}$  aufgelösten Oberflächenmodells zum Orthophoto umgerechnet werden (Abb. 8). Dabei wäre es möglich, die weißen Stellen durch Interpolation zu füllen, was in diesen Bereichen aber zu falschen Darstellungen führen kann. Stattdessen können von anderen Standpunkten gewonnene 3D- und 2D-Informationen einbezogen werden. Desweiteren können Mehrdeutigkeiten bei der Projektion, wie der "weiße Schatten" eines Scheinwerfers im farbigen Orthophoto, durch Vorgabe einer Maximalentfernung zur Projektionsfläche aufgelöst werden.

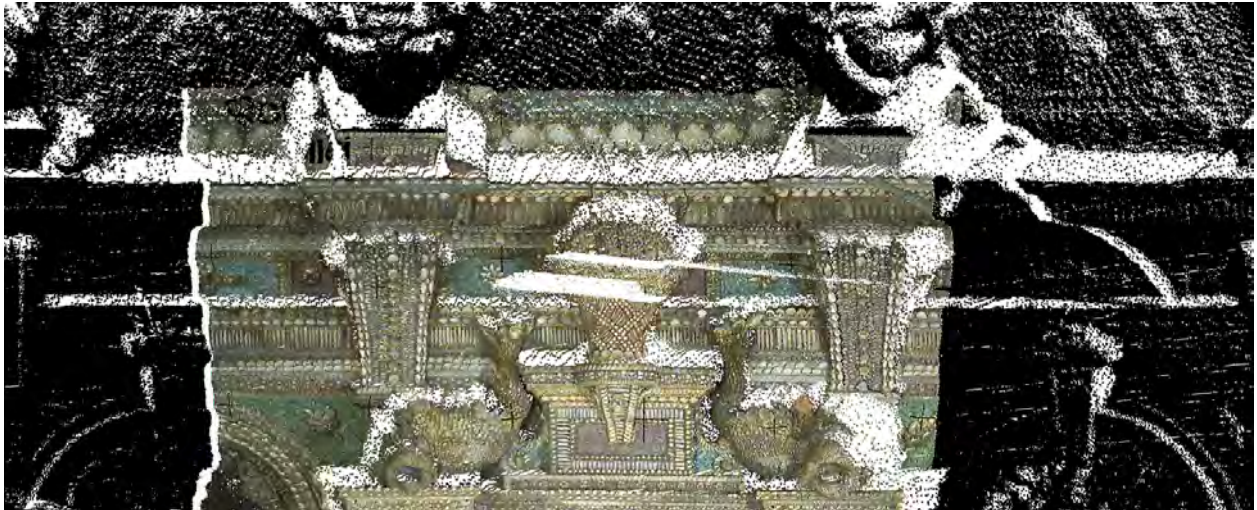


Abb. 8: Kombination aus Laserdaten und Reseaukamerabild

## 6 Zusammenfassung

Diese ersten Experimente zeigen, dass ein kombinierter Einsatz von einem Laserscanner und einer hochauflösenden Panoramakamera in der Nahbereichsphotogrammetrie neue Möglichkeiten eröffnet. Zum Einen können durch die Koregistrierung der Daten der beiden Meßsysteme die 3D-Informationen mit hochqualitativer Bildinformation gekoppelt werden. Zum Anderen ist zukünftig auch ein Verarbeitungsansatz denkbar, der die Laserscannerdaten als dichte Passpunkt Wolke in einer Stereopanoramaaufnahme nutzt. Notwendige Voraussetzung für beide Ansätze ist eine abgestimmte dynamische Kalibrierung beider Geräte. Angestrebt ist hier ein gemeinsamer Testraum.

## 7 Literaturverzeichnis

ALBERTZ J. & WIEDEMANN A. (1997); Architekturphotogrammetrie gestern – heute – morgen, Albrecht-Meydenbauer-Kolloquium, pp. 114-127, Berlin

REULKE R. & SCHEELE M. (1998); Der Drei-Zeilen CCD-Stereo Scanner WAAC: Grundaufbau und Anwendungen in der Photogrammetrie - Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation **3**, p. 157-163, Stuttgart.

SCHEELE M., BÖRNER A., REULKE R. & SCHEIBE K. (2001); Vom Flugzeugscanner zur Nahbereichskamera, Zeitschrift für Photogrammetrie und Fernerkundung 1/2001, pp. 13-22, Stuttgart

# TerraShare™ – automatische Verwaltung und Verteilung von Geo-Image-Daten im Produktionsprozess

## HARTMUT ROSENGARTEN, OBERKOCHEN<sup>1</sup>

*Abstract: New industries as well as the traditional business are generating a high demand of digital data. Managing this huge amount of data is a critical problem facing today's private and governmental imagery producers and users. Being the worlds leader for industry solutions in earth imaging Z/I Imaging expanded it's product line by introducing TerraShare – a powerful data management and distribution solution for geo-image data and projects.*

### 1. Einführung

Der Umfang digitaler Geoinformationen nimmt ständig zu. Dienstleister und Behörden, Datenvertreiber und Datennutzer verarbeiten Terabyte von überwiegend raster-basierenden Daten wie Luft- und Satellitenbilder, Orthophotos, Digitale Geländemodelle oder gescannte Karten. Die Verwaltung dieser wachsenden Datenmengen wird mehr und mehr zum Problem. Gewöhnlich wird die DV-Infrastruktur um weitere Hardwarekomponenten erweitert (Server, Plattenplatz). Die Datenorganisation wird häufig jedoch unübersichtlicher. Produktivität und Effizienz nehmen ab. Wichtige Fragen sind:

- Wo sind meine Daten gespeichert ?
- Wie schnell und einfach kann ich auf die Daten zugreifen ?
- Welchen Status hat ein Produkt (z.B. Original oder Kopie ?)
- Wie effizient können die Daten intern und extern zur Verfügung gestellt werden ?

Ein modernes, leistungsfähiges Datenverwaltungssystem bietet daher enorme Möglichkeiten zur Verbesserung der Datenproduktion und –nutzung. Im Ergebnis lassen sich Produktionszeiten verkürzen und damit Produktionskosten senken.

### 2. “Data-Centric” Paradigma

Eine höhere Produktivität wird nur dann zu erzielen sein, wenn Teilschritte der Datenbearbeitung nicht mehr seriell ablaufen, sondern parallel und verteilt im Netzwerk ausgeführt werden. Die Daten stehen im Mittelpunkt. Sie müssen immer und überall im Zugriff sein – unabhängig von ihrem zentralen oder dezentralen physikalischen Speicherort. Das gilt besonders für die Photogrammetrie mit Ihren komplexen, aber immer mehr automatisierten Arbeitsschritten. Wesentliche Schlüsselfaktoren werden sein:

- Fokus ist das Projekt und seine Daten und nicht Software und Tools
- Der Datenzugriff ist grundsätzlich multi-user-fähig
- Projekttransparenz vom Bearbeiter bis zum Datennutzer (soweit nicht durch Rechte beschränkt)
- Jede Anwendung muss für jeden Arbeitsschritt von jedem Arbeitsplatz möglich sein

---

<sup>1</sup> Dr. Hartmut Rosengarten, Z/I Imaging GmbH, Carl-Zeiss-Strasse 22, 73447 Oberkochen, email: h.rosengarten@ziimaging.de

### 3. Datenverwaltung und –verteilung mit TerraShare

Z/I Imaging's Produktfamilie TerraShare bietet eine allgemeine unternehmensweite Lösung zur Verwaltung und Verteilung von Geo-Image-Daten sowie zur Verwaltung und Steuerung kompletter photogrammetrischer Projektabläufe. TerraShare basiert auf einer modularen Client-Server-Architektur, die auf alle Belange behördlicher und privater Dienstleister zugeschnitten ist. Die Lösung liefert Funktionalitäten zur Verwaltung grosser Datenmengen im gesamten Bearbeitungsprozess von der Erfassung über die Auswertung bis hin zur Verteilung und dem Vertrieb übers Internet.

TerraShare ist eingebunden in die Windows Explorer Umgebung von Microsoft und läuft unter den Betriebssystemen Windows NT oder Windows 2000. TerraShare arbeitet in einer logischen hierarchischen Projektstruktur. Für Bearbeiter und Anwender stellt sich nicht mehr die Frage des physikalischen Speicherortes Ihrer Daten. TerraShare sorgt automatisch für die Bereitstellung der gewünschten Informationen, ob in der lokalen Produktionsumgebung oder über mehrere Standorte hinweg, ob im unternehmensweiten Netzwerk oder übers Internet.

TerraShare speichert auch umfassende Metadaten als Zusatzinformationen zu den Geo-Image-Daten und Projekten. Dazu zählen Auswertergebnisse und Statistiken wie Kameradaten, Orientierungen oder auch Produktionsstati. TerraShare repräsentiert ein einheitliches, aber offenes und modulares Projektumfeld. Darüber hinaus bietet die TerraShare Entwicklungsplattform (Software Development Kit) umfassende Möglichkeiten zur Anpassung an kunden-spezifische Bedürfnisse.

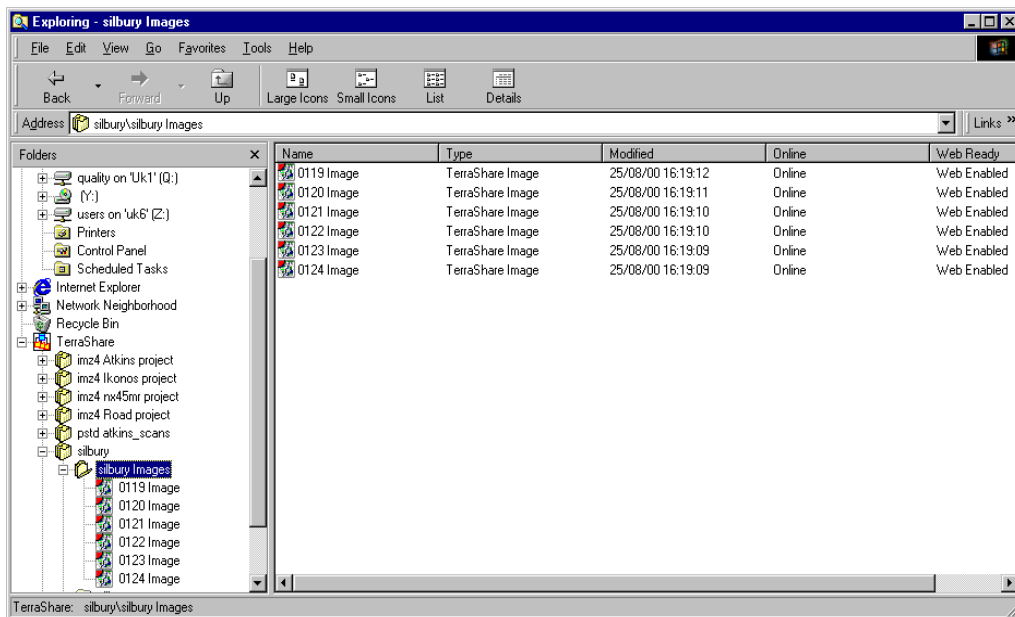


Bild 1: TerraShare Windows Explorer look & feel

### 4. Von der Datenproduktion bis zur Datennutzung

Luft- und Satellitenbilder in grossen (Daten-)Mengen werden heute bereits in zahlreichen Organisationen verarbeitet oder genutzt. Als erstes werden jedoch häufig die Datenerfasser mit den Problemen der Datenverwaltung konfrontiert. Kenngrössen von TerraShare sind dabei:

- Management grosser Datenmengen in der photogrammetrischen Produktion durch logische Projektverwaltung auch offline gespeicherter Daten
- Anzeige photogrammetrischer Daten auf jedem TerraShare Client innerhalb des Netzwerks
- Anzeige von Bildern oder Stereomodellen im Windows Explorer Umfeld
- Zugang zu TerraShare von allen photogrammetrischen Anwendungen
- Schneller Download der jeweils benötigten Daten durch "Disk shadowing"
- Kenntnisse über physikalischen Speicherort nicht notwendig; dadurch bessere Produktionsauslastung
- Schnelles und effizientes Werkzeug zur Qualitätskontrolle und Datenüberprüfung
- Web-Fähigkeit zur Verteilung von Bild- und DGM-Daten übers Internet
- Datenverteilung und -anzeige im Intranet/Extranet für Unternehmen mit mehreren Standorten, zwischen Kooperationspartnern oder zwischen Unternehmen und Kunden

## 5. Basisfunktionen in TerraShare

Terrashare bildet eine modular aufgebaute Produktfamilie. Herzstück und gemeinsame Plattform für alle Module ist das Kernprodukt TerraShare Core. Es übernimmt alle Zentralfunktionen der Projekt- und Datenverwaltung entlang der gesamten Datenprozesskette und quer durch alle beteiligten Organisationseinheiten. TerraShare Zusatzmodule erlauben die Verwaltung, Verarbeitung und Verteilung verschiedenster Datentypen im photogrammetrischen Workflow oder bieten den Zugriff und Vertrieb übers Internet. Grundsätzlich verarbeitet TerraShare alle raster-basierenden Datentypen wie Bilddaten, Digitale Geländemodelle und gescannte Karten sowie komplette photogrammetrische Projektdaten. TerraShare kann aber auch beliebige andere Datentypen wie z.B. Dokumente (doc, xls, u.a.) oder Graphikdateien (dgn, dwg, gws, u.a.) als sogenannte Generic Files verwalten. Ausserdem lassen sich die Metadaten um beliebige kunden-spezifische Sachdaten erweitern.



Bild 2: Terrashare Datenverwaltung und -verteilung im Netzwerk

Als Client-Server-Anwendung im Windows-Umfeld nutzt TerraShare den Microsoft Transaction Server (MTS). Über MTS werden alle wichtigen unternehmensweiten Funktionen der Datenverwaltung wie verteiltes Serverkonzept, Multi-Processing und Transaction-Processing unterstützt. TerraShare enthält folgende Basisfunktionen:

- Server-Komponente mit einem Datenbank-Manager, der die Anfragen der netzwerk-weiten Nutzer (Clients) verarbeitet und beantwortet.
- Verwaltung der TerraShare Datenstrukturen in einer Standard-Datenbank wie Oracle , SQL Server oder MSDE mittels ODBC (Relationen zwischen logischen und physikalischen Daten; Metadaten, weitere Nutzerdaten);
- TerraShare Explorer Plug-In zur Einrichtung und Verwaltung der TerraShare Folder und Dateien in logischer Form

TerraShare arbeitet typischerweise in einer Netzwerkumgebung mit ein oder mehreren Workstation und je nach Datenhaltungskonzept mit einem oder mehreren Servern. TerraShare verwaltet sowohl zentral als auch dezentral gespeicherte Daten. Die Server-Software wird auf einem als Server dienenden Netzwerkknoten installiert. Die Client-Software wird dann auf alle Arbeitsstationen heruntergeladen, die TerraShare nutzen sollen.

## 6. Logische Projekt- und Datenverwaltung

Bisher war es üblich, dass Daten im Produktionsprozess manuell auf bestimmten Rechnern, Arbeitsplätzen oder Disks gespeichert und weitergenutzt wurden. Im laufenden Tagesgeschäft treten dabei häufig folgende Probleme auf:

- Fragmentierung von Projektdaten bei vollen Speichermedien
- Metadata werden physikalisch gemeinsam mit den Bilddaten verwaltet (erweiterter Header)
- Kopieren der Daten zwischen Server und Workstation für bestimmte Produktionsschritte
- Suchen aktueller Daten und manuelles Kopieren für andere Abteilungen oder Nutzer
- Verschenden von Speicherplatz durch mehrfaches Vorhalten von Geo-Image-Daten

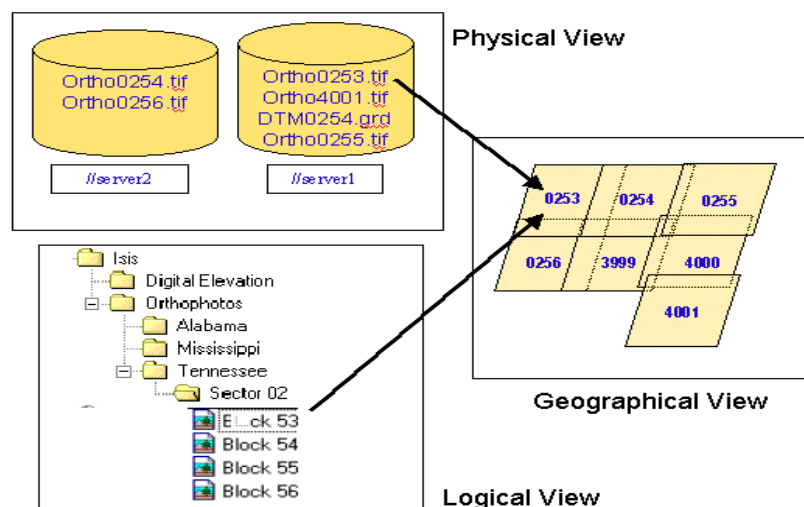


Bild 3: Logische Projektstruktur in Terrashare

All diese manuellen Prozesse sind zudem zeitaufwendig. Häufig kennt nur der Systemmanager Einzelheiten zur Dateioorganisation. TerraShare dagegen entlastet und beschleunigt den Produktionsprozess und bietet ausserdem den Datennutzern wie dem Management einen einfachen Einblick in Projekte und Daten ohne besonderen administrativen Aufwand. Einmal in TerraShare geladen, werden die Daten in Ihrer Terrashare typischen logischen Struktur unternehmensweit im Produktions- und Distributionsprozess automatisch verwaltet und sichtbar gemacht. Dieses erleichtert die Arbeit des Operateurs ebenso wie die des Projektleiters, des beteiligten Partner oder des Datennutzers. Im übrigen ist auch eine mehrfach-Zuordnung eines physikalischen Files zu verschiedenen Projekten in der Produktion möglich (m:1 Beziehung).

## 7. Modularität in einheitlicher Arbeitsumgebung

Die modulare, in Windows Explorer integrierte Architektur von Terrashare erlaubt das tägliche Arbeiten in einer einzelnen, aber einheitlichen Arbeitsumgebung. Dabei spielt es keine Rolle, ob Sie eine oder mehrere verschiedene Produktionsschienen bedienen müssen. Je nach Arbeitsabläufe kommen verschiedene Terrashare Module zum Einsatz:

- **TerraShare Core** ist der zentrale Baustein der Produktfamilie. Er enthält sowohl Server- als auch Client-Software. TS Core enthält alle Basisfunktion der Datenverwaltung und dient als Plattform für alle weiteren Produkte.
- **TerraShare Photogrammetric Manager (PM)** bildet die integrierte Schnittstelle zu allen ImageStation- und GIS-Imaging-Produkten und gewährleistet ein reibungsloses Data Management entlang der gesamten Produktionsschienen.
- **TerraShare e-geo** erlaubt das Sichten, Bereitstellen und den Vertrieb Ihrer Geo-Imaging-Projekte und -Daten im Internet
- **TerraShare Software Development Kit (SDK)** ermöglicht die Anpassung von Terrashare an Ihre speziellen Bedürfnisse im Workflow sowohl in der Produktion als auch bei der Bereitstellung im Intranet/Internet.

TerraShare Core sorgt für einen reibungslosen Verarbeitungsprozess Ihrer Daten im gesamten Netzwerk. Projekt und Daten stehen organisationsweit sowohl für Produktion, Verwaltung und Verteilung zur Verfügung. Je nach Datentyp und Software-Ausstattung kann der Datennutzer direkt an seinem Arbeitsplatz TerraShare aus seiner Anwendung heraus nutzen ("Terrashare aware").

## 8. TerraShare *Photogrammetric Manager*

TerraShare Photogrammetric Manager (PM) bildet das Interface zu den Z/I Imaging Produktlinien in Photogrammetrie (Imagestation) und GIS Imaging. Mittels TerraShare Explorer Plug-In können alle TerraShare Clients PM unternehmensweit nutzen. TerraShare PM ist speziell für hohen Leistungsdurchsatz in einem verteilten DV-Umfeld ausgelegt und enthält folgende Haupt-Funktionalitäten:

- Verwaltung photogrammetrischer Projekte innerhalb der Windows Explorer Umgebung.
- Sichten von Projekten und Geo-Image-Daten ohne Kenntnisse der physikalischen Speicherorte.
- Graphisches Fenster für Block-Layout, Projektstatus und projektrelevante Metadata.

- Bereitstellung und Anzeige von Image-Daten am Arbeitsplatz "Just-in-time"; bei erneuter Benutzung wird auf die lokal vorhandenen Daten zugegriffen, unnötige Netzwerkbelastungen zu vermeiden.
- Einheitliche logische Betrachtung der Projekte unabhängig von Datenort und Arbeitsplatz; dadurch bleibt der Anwender ungestört von anderen Arbeitsprozessen wie z.B. Datentransfer vom Scanner zu Workstation oder Servern.
- Einheitliche Methode zur Abfrage von Projektdaten wie Kamera, Streifen, Bild, Modell, AT-Parameter
- Qualität und Status photogrammetrischer Projekte von beliebigen TS Clients im Netzwerk überprüfen
- Direktes Starten von ImageStation Applikationen aus der Projektsicht des TS Client im Windows Explorer Umfeld

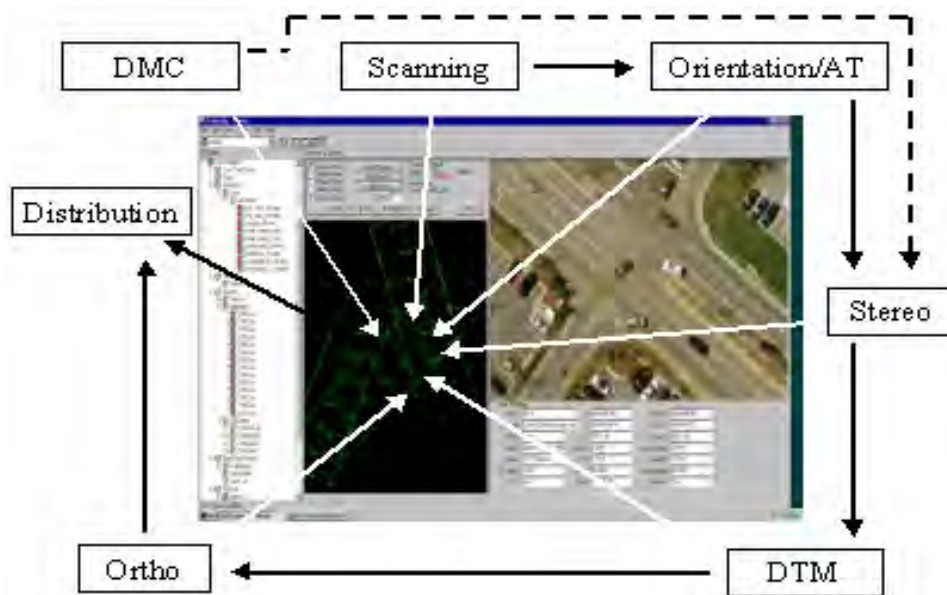


Bild 4: Display und verteilte Arbeitsprozesse unter TerraShare PM

## 9. TerraShare e-Geo

E-geo ist das Distributionsmodul in der Terrashare Produktfamilie. Es erlaubt die Bereitstellung und den Zugriff auf Projektinformation und Daten im gesamten unternehmensweiten Netzwerk (Intranet, Extranet) sowie im Internet. TerraShare e-geo bietet folgende Kernfunktionen:

- Visualisieren der Daten in einem graphisch-räumlichen Umfeld und Zugang zu den Metadaten
- Sichten der mit TerraShare archivierten Geo-Image-Daten übers Internet
- E-commerce-Komponente für Vertriebs- und Lieferzwecke übers Internet

Photogrammetrische Datenerfassung und -fortführung entwickelt sich immer mehr zu einem globalen internationalen Geschäft. Dabei eignet sich TerraShare e-geo hervorragend zur Verbesserung des Produktions-Workflows im Unternehmen oder in Zusammenarbeit mit Partnern über mehrere Standorte hinweg. Wichtig ist ein hoher Nutzen globaler Zusammenarbeit ohne Qualitätsverluste oder ständige Datenkonvertierungen. So kann z.B. ein



Scanning-Dienstleister direkt in TerraShare scannen und die Daten unmittelbar übers Internet zur Kontrolle durch den Auftraggeber bereitstellen.



Bild 5: Beispiel von TerraShare e-geo mit Display-Kontrollfunktionen

## 10. TerraShare Entwicklungsumgebung (SDK)

TerraShare SDK bietet Ihnen Werkzeuge zur Nutzung von TerraShare für eigene Software-Entwicklungen im Rahmen auftrags-spezifischer Produktionsabläufe und Workflows. SDK enthält folgende Tools:

- Zugriff auf Daten, Service-Routinen und Beispiel-Programme von TerraShare Core mittels API (Application Programmer's Interface).
- Zugriff auf Funktionen zur Datenlokalisierung, Speicherplatzverwaltung und server-basierenden Verarbeitungsroutinen.
- Plug-in für kunden-spezifische ActiveX Controls als Interface zu Terrashare
- Verwalten von Geo-Image-Daten innerhalb eigener Workflow-Lösungen

## 11. Applikationen nutzen TerraShare (“TerraShare Aware”)

Neben dem TerraShare Explorer Plug-In können auch andere Anwendungen und Programme den Terrashare-Client für den Zugriff auf TerraShare Daten nutzen. Wir nennen diese Anwendungen “Terrashare Aware”, wenn sie in der Lage sind TerraShare Dateien zu lesen oder schreiben. Dabei gibt es zwei verschiedene Level von Anwendungsintegrationen: COMPLETE und BASIC.

Alle Z/I Imaging Produkte der Photogrammetrie und im GIS-Imaging sind vollständig TerraShare aware. Operateure können alle Z/I Anwendungen wie die neue Automatische Aerotriangulation ISAT oder die Orthophotoproduktion mit OrthoPro direkt aus der Windows Explorer Umgebung eines TerraShare Projekts aufrufen. Alle Terrashare Funktionen stehen zur Verfügung.

Anwendungen sind BASIC TerraShare aware, wenn sie Microsoft's Open Dialog Box zum Öffnen von Files nutzen. Damit kann auf die durch TerraShare verwalteten Geo-Image-Daten zugegriffen werden. Für viele Anwendungen ist diese Basisintegration in TerraShare äusserst nützlich und oft ausreichend Schreibrechte für Imagedaten sowie das Nutzen von Metadaten sind jedoch nicht möglich..

Jedes Nicht-Z/I-Produkt kann mittels Funktionen von TerraShare SDK vollständigen TerraShare-Aware-Status erlangen und damit den gesamten Leistungsumfang von TerraShare nutzen. Ein Beispiel dafür ist die Bildverarbeitungs-Software eCognition™ der Firma Definiens AG. Weitere Plug-in's für marktübliche GIS- und CAD-Produkte sind in der Entwicklung.

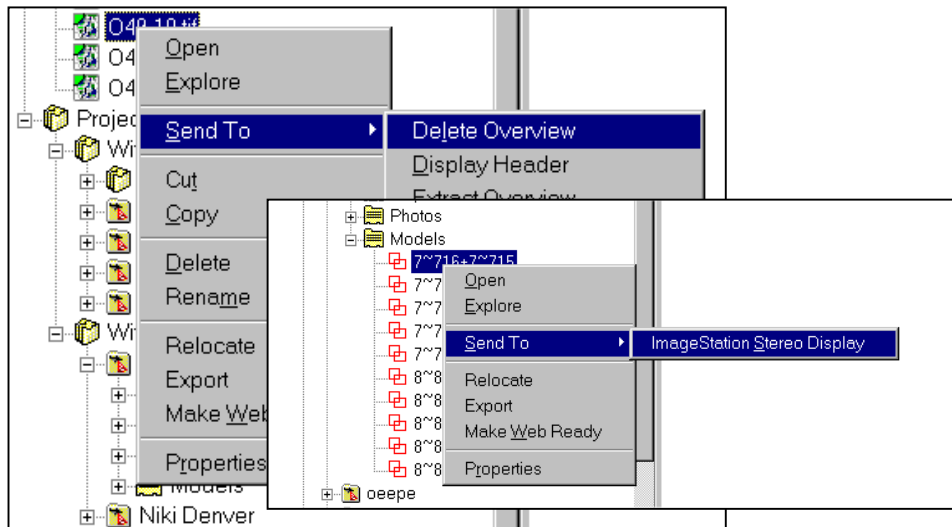


Bild 6: Starten von "TerraShare Aware" Anwendungen und Funktionen

## 12. Effiziente Arbeitsabläufe - einfache Handhabung

Jede Arbeitsstation und ihre Anwendungen innerhalb einer TerraShare Umgebung haben unmittelbaren Zugriff auf Bilddaten, Projekte und andere Datentypen, die vom Terrashare Server verwaltet werden. Kernstück ist die logische Projekt- und Datenverwaltung im gewohnten Windows Explorer Umfeld sowie die Pflege und Verwaltung der TerraShare Metadatenbank. Sie enthält alle wichtigen nicht-graphischen Attribute der Daten wie physikalischer Speicherort, Koordinatensystem, Projektstatus, Auswertestatistik oder benutzerdefinierte Zusatzinformationen. Der Server versorgt alle Datenanfragen der Clients über Intranet/Internet.

Das TerraShare Explorer Plug-In wiederum ist das Windows Explorer Interface zur kompletten TerraShare Umgebung. Damit haben Sie in gewohnter Weise einen bequemen und vollständigen Zugang zum Datenverwaltungssystem von TerraShare. TerraShare Dateien und Ordner können genauso behandelt werden wie Explorer Dateien und Ordner.

Der rechte Teil des Explorer Fensters dient der Visualisierung von Bild und Footprints zur georeferenzierten Zuordnung im jeweiligen Projekt sowie zur Darstellung von Anzeige-Funktionen und Metadaten (siehe auch Bild 4). Das TerraShare Explorer Plug-in bietet ausserdem umfassende Funktionen zum Import/Export, Kopieren, Umbenennen und Löschen Ihrer Terrashare Dateien.

TerraShare orientiert sich an den konkreten Arbeitsabläufe beim Kunden. Es ist eine Gesamtlösung zur Verbesserung und Beschleunigung der Produktion und betrifft daher nicht nur die Fachabteilung sondern den unternehmensweiten IT-Bereich. Das offene und modulare Konzept erlaubt eine schrittweise Einführung in Anlehnung an die immer schneller wachsenden Anforderungen. Z/I Imaging begleitet Sie hier in jeder Phase des Projekts.

## **13. Zusammenfassung**

TerraShare ist eine umfassende, leistungsstarke Systemlösung zur Verwaltung und Verteilung von Geo-Image-Daten und -Projekten für private und behördliche Organisationen im Bereich Geodatenerfassung und -fortführung sowie -verteilung und -vertrieb. TerraShare bietet eine unternehmensweite, offene Client-Server-Architektur, die eine ständige Anpassung an kundenspezifischen Anforderungen sicherstellt. Wichtige Faktoren sind dabei schnellere Such- und Zugriffszeiten, Transparenz und hohe Durchgängigkeit im Workflow und schliesslich wirksame Verbesserungen des Personaleinsatzes in der Geodatenproduktion und -distribution. Damit führt Terrashare zu erheblichen, bereits kurzfristig sichtbaren Kostenreduktionen im Projekt.

## **14. Literaturverzeichnis**

- BIMA, W.J. (2001): Image Management and Distribution – Vorträge zum 5. Seminar Aerial Cameras and Digital Photogrammetry, Steamboat Springs, CO, USA.
- GRAHAM, L. (2001): Distributed Processing – Vorträge zum 5. Seminar Aerial Cameras and Digital Photogrammetry, Steamboat Springs, CO, USA.
- GREENING, T. (2001): TerraShare, a User's Perspective – Vorträge zum 5. Seminar Aerial Cameras and Digital Photogrammetry, Steamboat Springs, CO, USA.
- ROGERS, R. (2000): Managing Imagery in the Enterprise – GEOEurope, Ed. 9, Issue 11, pp. 28-29, U.K.

# Qualität und Verfügbarkeit der Daten von SRTM / X-SAR

**ACHIM ROTH<sup>1</sup>, MICHAEL EINEDER<sup>2</sup>, BERNHARD RABUS<sup>3</sup> &  
EBERHARD MIKUSCH<sup>4</sup>**

*Abstract: The Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) was jointly performed by NASA, the Italian Space Agency (ASI) and DLR between February 11 and 22, 2000. onboard the shuttle Endeavour (see Abb. 1) two antenna-pairs operating in C- and X-band were simultaneously illuminating and recording radar signals which will be processed to a digital elevation model within the next two years. This paper focuses on the products of the X-SAR system, the status of the calibration and describes the production and archiving system.*



Abb. 1: Aufnahmesituation SRTM

---

<sup>1</sup> Dipl. Ing. Achim Roth, DLR, Deutsches Fernerkundungsdatenzentrum (DFD), Oberpfaffenhofen, 82234 Wessling, Tel: 08153/28-2706, Email: Achim.Roth@dlr.de

<sup>2</sup> Dipl. Ing. Michael Eineder, DLR, Institut für Methodik der Fernerkundung (IMF), Oberpfaffenhofen, 82234 Wessling, Tel: 08153/28-1396, Email: Michael.Eineder@dlr.de

<sup>3</sup> Dr. Bernhard Rabus, DLR, Deutsches Fernerkundungsdatenzentrum (DFD), Oberpfaffenhofen, 82234 Wessling, Tel: 08153/28-2895, Email: Bernhard.Rabus@dlr.de

<sup>4</sup> Dipl. Ing. Eberhard Mikusch, DLR, Deutsches Fernerkundungsdatenzentrum (DFD), Oberpfaffenhofen, 82234 Wessling, Tel: 08153/28-2721, Email: Eberhard.Mikusch@dlr.de

# 1 Einführung

Im Rahmen der Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) wurde die Erdoberfläche zwischen  $54^\circ$  südl. Breite und  $60^\circ$  nördlicher Breite mit zwei Radarsystemen im C- und X-Band aufgezeichnet. Aus diesen Daten wird mit der Methode der Radarinterferometrie ein Höhenmodell generiert, das 80% der Landmasse umfassen wird. Dabei kam zum ersten Mal im All eine neue Technologie zum Einsatz, die mit zwei leicht versetzten Antennen zeitgleiche Aufnahmen ermöglicht und somit ideale Bedingungen für die Erstellung eines globalen, homogenen und hochqualitativen Höhenmodells bietet.

Die C-Band-Daten werden beim Jet Propulsion Laboratory (JPL) verarbeitet, während die Daten des X-Bands beim DLR-DFD prozessiert und archiviert werden. Ein elektronisches Nutzerinterface ermöglicht die Prüfung der Verfügbarkeit und die Bestellung der Produkte.

Um die hohen Qualitätsansprüche zu erfüllen ist eine umfangreiche Kalibrierung erforderlich. Dabei spielt die präzise Bestimmung der Aufnahmegeometrie eine zentrale Rolle. Während der Mission wurde permanent die relative Lage der beiden Antennen zueinander vermessen sowie die Flugbahn und Lage des Shuttles bestimmt. Die Einzelmessungen wurden in einer separaten Verarbeitung am Jet Propulsion Laboratory zu dem sog. PADR-Produkt (Position and Attitude Determination Record) prozessiert. Da die Mastbewegungen nicht vollständig von den Meßgeräten erfaßt wurden, mußten nachträglich Korrekturen durch Analysen von langen Aufnahmestreifen (mehrere 1000 km) über Meer bestimmt werden. Diese Arbeiten wurden gemeinsam von JPL und DLR durchgeführt.

## 2 Produkte von SRTM / X-SAR

Das Radar zeichnet neben der Helligkeit des rückgestreuten Signals auch dessen Phasenlage in Bezug zur ausgesandten Welle auf. Jedes Pixel beinhaltet somit Helligkeits- und Phaseninformation, die die Basis der interferometrischen Auswertung bildet. Die Phase ist u.a. proportional zur Entfernung des abgebildeten Objekts zur Antenne sowie auch umgekehrt proportional zur verwendeten Wellenlänge. Es werden Aufnahmen von zwei verschiedenen Positionen im Raum benötigt, da aus den unterschiedlichen Entfernungen der Bodenpunkte zu den beiden Antennen die dreidimensionale Bodenkoordinaten bestimmt werden. Der Blickwinkelunterschied liegt dabei – im Gegensatz zu optischen Verfahren – nur in der Größenordnung einer Bogenminute. Die somit entstehenden Parallaxen sind weit geringer als die Ausdehnung eines Pixels, so daß sich die beiden Bilder in ihren Helligkeitsprofilen nicht unterscheiden (BAMLER et al, 2000). Die Bildprodukte von SRTM/X-SAR werden von den Aufnahmen der Primäranterie in der Ladebucht des Shuttles erzeugt. Da diese bereits 1994 während der ersten beiden Flüge von SIR-C/X-SAR im Einsatz war, können die Daten z.B. für vergleichende Untersuchungen herangezogen werden.

### 2.1 Digitales Höhenmodell

Die Höheninformation wird aus den an der Erdoberfläche rückgestreuten Signalen ermittelt. Das Radarsignal dringt dabei in Abhängigkeit der verwendeten Wellenlänge in den Boden bzw. die Bodenbedeckung ein. Aufgrund der kurzen Wellenlänge des X-Bands wird die Reflexion jedoch in den meisten Fällen direkt an der Oberfläche erfolgen und SRTM wird daher ein der optischen Stereoauswertung vergleichbares „Oberflächenmodell“ liefern.

Die einzelnen Höhenwerte des SRTM/X-SAR-DHMs werden aus einem „Flächensignalen“ generiert, das eine Ausdehnung von ca. 25 m hat. Der Höhendatensatz wird in geographische Koordinaten transformiert und als Kacheln mit einer Seitenlänge von  $15' \times 15'$  in Länge und Breite ausgeliefert. Die Produktgröße ist ca. drei MBytes einschließlich der dazu-

gehörigen Höhenfehlerkarte was eine schnelle Bereitstellung und Verteilung über Netzwerke erlaubt. Das Auslieferungsformat ist DTED (Digital Terrain Elevation Data).

Die Produktspezifikation der Höhenmodelle von SRTM/X-SAR ist in Tabelle 1 gelistet.

Rasterabstand	1''x1'' Länge & Breite
Höhenstufen	1m
Datum (horizontal)	WGS84
Datum (vertikal)	WGS84
Datenformat	16-bit Signed Integer
horizontale Genauigkeit (absolut)	±20m 90% zirkularer Fehler
horizontale Genauigkeit (relativ)	±15m 90% zirkularer Fehler
vertikale Genauigkeit (absolut)	±16m 90% vertikaler Fehler
vertikale Genauigkeit (relativ)	±6m 90% vertikaler Fehler

Tabelle 1: DHM Produkt

## 2.2 SAR Bildprodukte

Die Bildprodukte werden in drei verschiedenen Darstellungen und Bildgeometrien angeboten. Diese sind

- Single Look Complex (SSC)
- Multi Look Ground Range (MGD)
- Geocoded Terrain Corrected (GTC)

Beim SSC Produkt werden für jedes Pixel Real- und Imaginärteil in der Sensor spezifischen Laufzeitengeometrie geliefert. Beim MGD werden die Helligkeitswerte für jeden Bildpunkt ermittelt und in die sog. Ground-Range-Geometrie transformiert. Damit wird eine homogene Rasterung über Range (senkrecht zur Flugrichtung) hergestellt. Da für jeden Bildpunkt seine dreidimensionale Lage ermittelt wird, kann das Bildprodukt auch ortho-entzerrt und in eine Kartenprojektion transformiert werden. Diese Schritte werden für das GTC durchgeführt.

Alle Bilddaten decken eine Fläche von ca. 150 km in Flugrichtung und 50 km in Range ab und werden im CEOS-Format ausgeliefert. Tabelle II faßt die Produktspezifikationen der Bildprodukte zusammen. Weitere Informationen sind in (ROTH et al., 2000) zu finden.

	<b>MGD</b>	<b>SSC</b>	<b>GTC</b>
Projektion	Ground Range	Slant Range	UTM
Ellipsoid	GEM6	n.a.	WGS84
Bilddatenformat	Amplitude	Komplex	Amplitude
Räumliche Auflösung			25 m
Azimut	25m	8–12 m	
Range	25m	17 m	
Pixel Spacing			25 m
Azimut	12.5 m	13.32 m	
Range	12.5 m	3.9-5,8 m	
Abs. Lagefehler ( $\sigma$ )			< 30 m
Azimut	3km	3km	
Range	<4 km	<4 km	

Tabelle 2: SAR Bildprodukte

## 3 Stand der Arbeiten

### 3.1 Kalibrierung

Wie bereits erwähnt reagiert die Radar-Interferometrie höchst empfindlich auf Entfernungsunterschiede zwischen Erdoberfläche und Sensor. Diese sind die kritische Größe zur Ableitung der Höheninformation. Da aber auch die Schwingungen des Auslegers Änderungen der Entfernung zu den Bodenpunkten bewirken, muß die relative Lage der beiden Antennen zueinander hoch genau bestimmt werden. Abbildung 2 zeigt ein Interferogramm von SRTM/X-SAR, bei dem die Mastbewegungen noch nicht berücksichtigt wurden. Deren Auswirkungen sind besonders gut über der Meeresoberfläche sichtbar und würden bei direkter Umrechnung in ein Höhenmodell ein virtuelles Relief erzeugen. Daher wurde über die gesamte Missionsdauer der Abstand der beiden Antennen sowie deren Winkelauslenkung beobachtet und die Flugbahn mittels GPS bestimmt (DUREN et al., 1998).

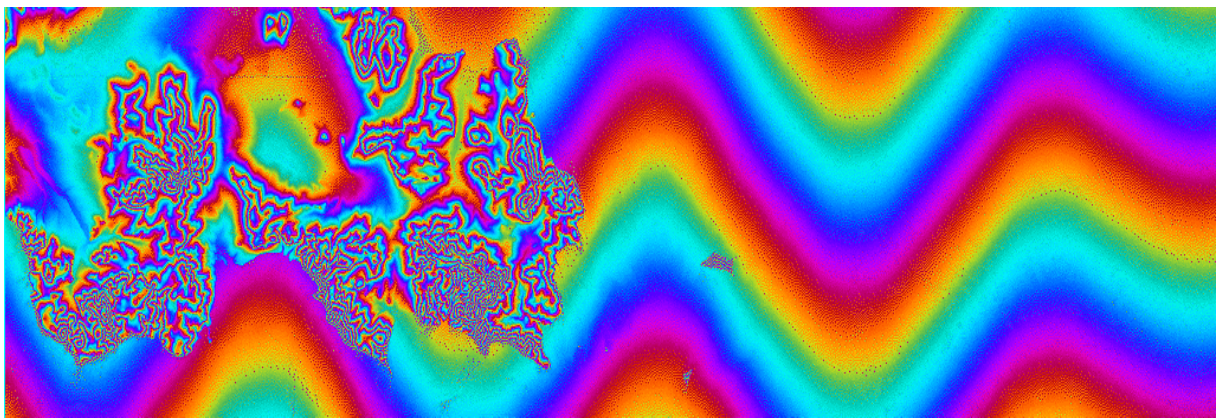


Abbildung 2: Phasendifferenzen erzeugt durch Mastschwingungen

Durch den Ausfall einer Stickstoff-Düse, die den Ausleger über einen längeren Zeitraum in einer stabilen Lage halten sollte, wurde jedoch eine Änderung der Aufnahmebedingungen notwendig. Zum einen wurden häufiger als geplant Lagekorrekturen mit den Steerdüsen des Shuttles durchgeführt. Zum anderen wurde das sog. Deadband erhöht, das die Maximalauslenkung der Aufnahmeconfiguration festlegt, um die Anzahl der Manöver und den daraus resultierenden Treibstoffverbrauch zu reduzieren. Dadurch hatte das Gesamtsystem über einen längeren Zeitraum nicht mehr die geplante Lagestabilität. Zusätzlich traten Probleme beim sog. AODA-System (Attitude and Orbit Aviation) auf, das die Lage der Antennen mit mehreren Meßinstrumenten beobachtete. Die Folge ist, daß die Abtastrate von AODA für die vollständige Erfassung der nun auftretenden hochfrequenten Schwingungen nicht ausreichend war.

Im Rahmen der geometrischen Kalibrierung wurden diese Schwingungen nachträglich modelliert und korrigiert. Zu diesem Zweck wurden Aufnahmestreifen prozessiert, die über mehrere Tausend Kilometer die Meeresoberfläche erfaßten. Das Radar-Höhenmodell wurde mit einem präzisen ozeanographischen Modell verglichen, das aus die Mission überspannenden ERS-Altimetermessungen erzeugt und um den entsprechenden Tidenhub korrigiert wurde (HELM et al., 2001). Die Ozeanhöhen im Aufnahmestreifen wurden auf etwa 10 cm genau bestimmt. Die Differenzen wurden analysiert, um nicht kompensierte Mastbewegungen identifizieren und Korrekturen für das AODA-System ermitteln zu können.

Abbildung 3 zeigt ein Profil der Höhendifferenzen in Flugrichtung mit einer Gesamtlänge von ca. 8.500 km.

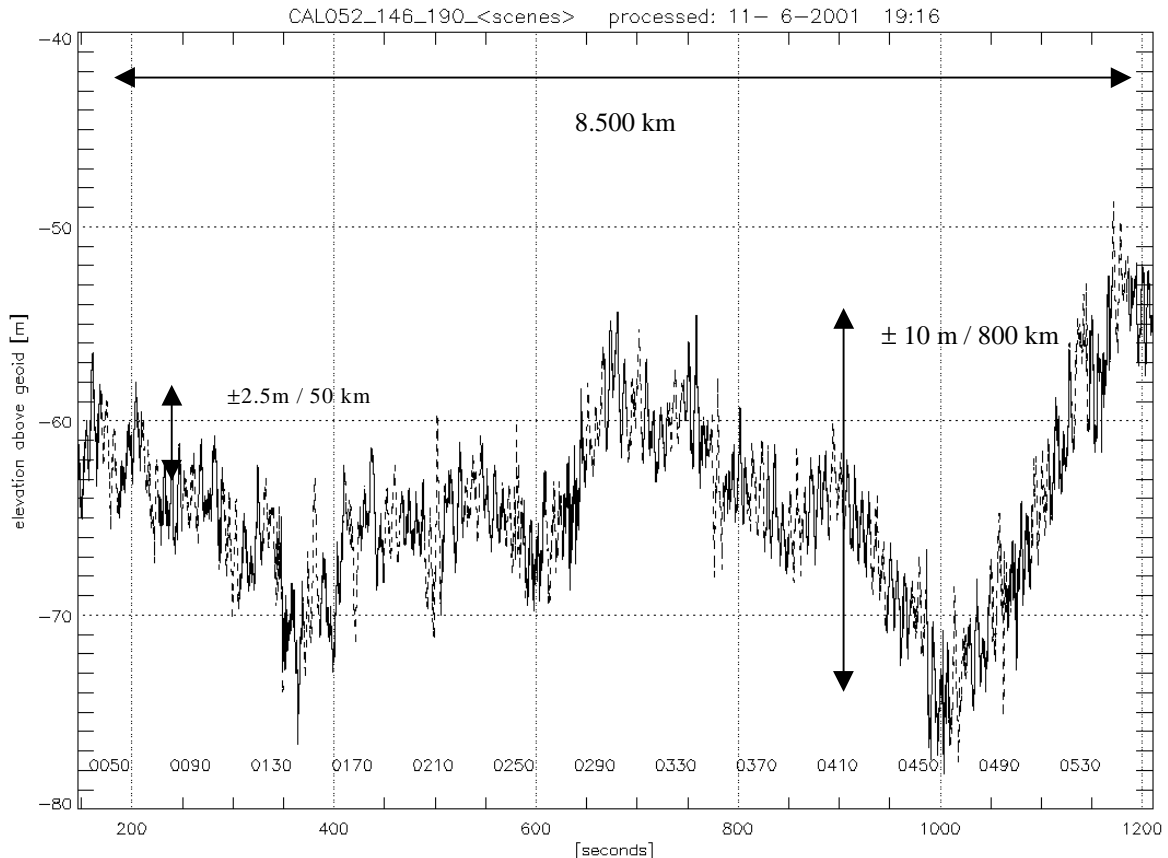


Abbildung 3: SRTM/X-SAR Höhenprofil über Ozean

Die Mastschwingungen führen zu Fehlern im Höhenmodell von  $\pm 2.5$  m mit einer Periodizität von etwa 50 km entlang der Flugrichtung. Zündungen der Lageregelungsdüsen waren ca. alle 800 km erforderlich, um den Rollwinkel des Schuttles zu korrigieren. Diese erzeugen ein zusätzlichen Höhenfehler von ca.  $\pm 10$  m.

Die relative Genauigkeit des Höhenmodells hängt im wesentlichen ab vom Rauschen der Phasenwerte der X-SAR-Daten. Obwohl z.Zt. die gemessene Kohärenz noch nicht der im Vorfeld der Mission geschätzten entspricht, ist zu erwarten, daß durch Filterung und Multilooking der relative Höhenfehler noch deutlich unter 4 m ( $\sigma$ ) gesenkt werden kann. Nähere Beschreibungen sind in (EINEDER et al., 2001) zu finden.

### 3.2 Prozessierung

Parallel zu den Kalibrierungsarbeiten und der Analyse der Mastdaten wurden die Radardaten des X-Bands in die Verarbeitungskette des DFD integriert. Zunächst wurden die Bänder, auf denen die Daten während des Shuttle-Flugs aufgezeichnet wurden, kopiert. Die Originale bleiben am Kennedy-Space-Center und sind dort archiviert.

Alle kopierten Bänder wurden inzwischen in Oberpfaffenhofen erfaßt und dem sog. Screening unterzogen. In diesem Prozess werden die Rohdaten in Szenen aufgeteilt, in ein Computerlesbares Format überführt, in das zentrale Robot-Archiv des DFD kopiert und katalogisiert. Zusätzlich werden sie einer ersten Qualitätsprüfung unterzogen. Erst nach diesem Schritt stehen sie für die interferometrische Verarbeitung zur Verfügung.

Inzwischen wurden alle Bänder erfolgreich bearbeitet und archiviert. Die interferometrische Verarbeitung ist damit vorbereitet. Abbildung 4 zeigt die Verfügbarkeit der SRTM / X-SAR-Daten über Europa.



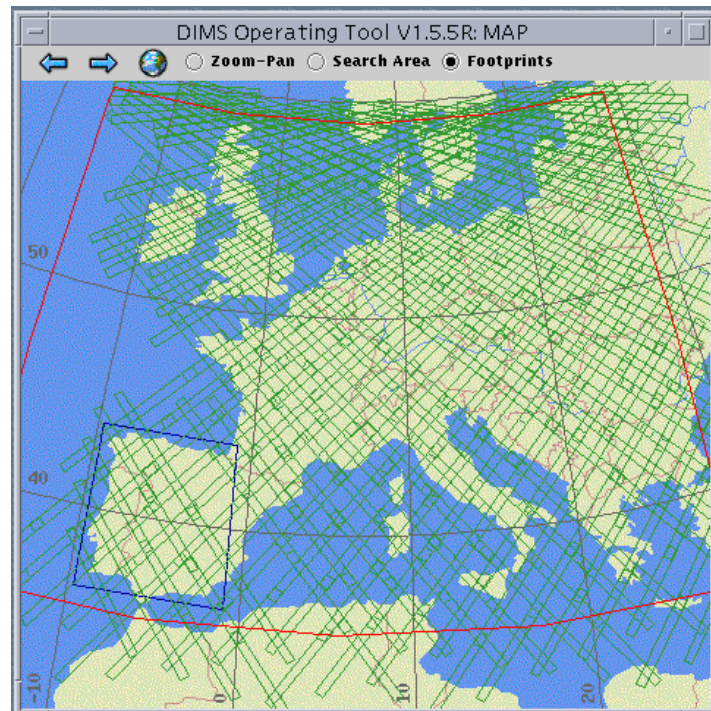


Abbildung 4: Bedeckung mit Daten von SRTM/X-SAR über Europa

Aus den Vermessungsdaten des AODA-Systems wurden am Jet Propulsion Laboratory die sog. PADR-Files (Position and Attitude Determination Record) erzeugt. Diese geben über die Dauer der gesamten Mission die Position und die Lage des Shuttles in einem zeitlichen Raster von 0.25 Sekunden an.

## 4 SRTM / X-SAR Bodensegment

Das SRTM/X-SAR Bodensegment besteht aus einer Kette von Prozessoren, die schrittweise die Verarbeitung der Radardaten zu Höhenmodellen durchführen. Diese unabhängig betriebenen Subsysteme werden von dem Daten-, Informations- und Management-System (DIMS) des DFD gesteuert. Alle Prozessoren tauschen ihre Informationen und Daten über das zentrale Archiv aus, sodaß sämtliche Eingangs-, Zwischen- und Endprodukte auch über die Laufzeit des Projekts hinaus erhalten bleiben. Insgesamt wird eine Datenmenge von ca. 25 TByte entstehen.

Die endgültigen Produkte werden über „EOWEB“, das Datenportal des DLR-DFD, angeboten. EOWEB bietet u.a. die Möglichkeit geographisch zu navigieren. Durch die direkte Anbindung des Portals an den Katalog des Datenarchivs wird automatisch der jeweils aktuelle Stand der verfügbaren Produkte dargestellt.

### 4.1 Interferometrische Verarbeitungskette

Die interferometrische Verarbeitungskette besteht aus vier unabhängigen Prozessoren:

- Dem Scanning System
- Dem Screening und Transcriptions-System
- Dem InSAR-Prozessor und
- Dem Geocoding und Mosaicking System

Die Aufgabe des **Scanning-System** war es, die von NASA gelieferten Bänder direkt nach der Mission hinsichtlich der Lesbarkeit zu prüfen und die Zuordnung der einzelnen Aufnahme-streifen, der sog. „Data Takes“ zu der jeweiligen Position auf dem entsprechenden Band her-zustellen.

Das **Screening- und Transcriptions-System** überträgt die SAR-Daten von den Bändern in das Roboter-Archiv. Dabei werden die während der Mission gemischt aufgezeichneten Sig-nale der beiden Antenne wieder getrennt, in ein computerlesbares Format überführt, in ein-zelne Szenen aufgeteilt und paarweise archiviert. Die Rohdaten werden analysiert, um even-tuelle Datenfehler wie z.B Ausfälle bei der Aufzeichnung zu erkennen und zu vermerken. Die geographische Lage der Szene sowie ihr genauer Aufnahmezeitpunkt werden ermittelt und mit weiteren für die spätere interferometrische Prozessierung wichtigen Parametern im Kata-log verzeichnet.

Der **interferometrische Prozessor** führt zunächst paarweise die SAR-Prozessierung der Rohdaten zu den sog. Single-Look-Complex-Produkten durch. Nach einer Sub-Pixel genauen Registrierung sowie Filterungen wird das Interferogramm erzeugt, die Phasenmehrdeutigkeit durch das Phase-Unwrapping aufgehoben sowie die Kohärenzkarte und das Intensitätsbild berechnet (EINER & ADAM, 1997). Dabei werden die Auswirkungen der Mastbewegun-gen auf das Interferogramm berücksichtigt.

Das **Geocoding- und Mosaicking-System** bestimmt für jeden einzelnen Phasenwert die je-weilige Höheninformation unter Berücksichtigung der Position des Shuttles im Raum und der relativen Lage der beiden Antennen zueinander (ROTH et al., 1999). Bei der Geokodierung werden für jeden Bildpunkt die dreidimensionalen Bodenkoordinaten ermittelt, in eine Kar-tenprojektion transformiert und dabei in ein regelmäßiges Raster überführt. Diese Arbeits-schritte werden einheitlich auf den Höhendatensatz, die Bilddaten und die Kohärenzkarte angewendet. Die Verarbeitung erfolgt auf Basis der einzelnen Szenen. Im Mosaicking-Prozess werden diese zu einem großflächigen Datensatz zusammengefügt (KNÖPFLE et al., 1998).

## 4.2 Archivierung und Nutzerschnittstelle

Die Verarbeitung der SRTM / X-SAR-Daten ist an das **Daten-, Informations- und Mana-gement-System DIMS** (MIKUSCH et al., 2000) angeschlossen. Es besteht aus vier wesentli-chen Komponenten, der Datenbibliothek (Katalog und Archiv), der Auftragskontrolle, der Produktionskontrolle und dem Nutzerinformationsservice, der auch die Produktauslieferung einschließt. DIMS ist für einen Multi-Missions-Betrieb ausgelegt.

Die in DIMS zu verwaltenden Produkte müssen im Vorfeld konfiguriert werden. Danach übernimmt die **Datenbibliothek** deren vollständige und konsistente Verwaltung. Entspre-chend ist sie für alle Verarbeitungsschritte die Quelle für die Eingangs- und Lieferadresse für die neu erstellten Produkte. Die Datenarchivierung erfolgt vollautomatisch über ein Roboter-system. Die Kapazität liegt z.Zt. bei 300 TByte, die bei Bedarf erweitert werden kann.

Auf Basis der Datenbibliothek übernimmt die **Auftragskontrolle** die Steuerung aller Prozes-se, die zwischen der Produktbestellung und dessen Auslieferung anfallen. Die **Produktions-kontrolle** organisiert die Produktionsketten. Das „Operating Tool“ ermöglicht den interakti-ven Zugriff auf die beschriebenen Komponenten.

Die Produkte von SRTM / X-SAR können auf CD-ROM oder über Internet ausgeliefert wer-den. Die Abfrage und Bestellung wird über EOWEB, das Datenportal des DLR-DFD, ermög-licht. EOWEB ist eine auf Java/www-Technik basierende graphische Nutzerschnittstelle, über die sowohl der Interessensbereich auf einer Karte graphisch markiert und weitere Suchkriterien definiert werden können, als auch das Ergebnis der Abfrage dargestellt wird. Die Bestellung ist ebenfalls über EOWEB möglich.

### 4.3 Bestimmungen zur Datenpolitik

Das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt wird die Produkte von SRTM / X-SAR in der Regel ohne Einschränkungen verfügbar machen. Aus außen- und sicherheitspolitischen Gründen kann der Zugang durch Beschluß des DLR-Vorstands beschränkt werden. Daten des Staatsgebiet von Italien werden von der italienischen Weltraumagentur ASI prozessiert und verteilt.

Die Projekte, die während des Announcement-of-Opportunity-Prozess ausgewählt wurden, erhalten die Daten kostenfrei. Für alle anderen Nutzungen und Nutzer werden die Daten zu Selbstkosten abgegeben. Die jeweils aktuelle Preisliste wird vom DLR veröffentlicht.

Diese Bestimmungen gelten vorbehaltlich der Zustimmung des DLR-Vorstands (DLR, 2001).

## 5 Literaturverzeichnis

- BAMLER, R., DECH, S., RUNGE, H., EINEDER, M., ROTH, A. & MEISNER, R. (2000): SRTM: mit der Shuttle Radar Topography Mission die Erde neu vermessen. Petermanns Geographische Mitteilungen, 2000/3, 14-17.
- ROTH, A., MARSCHALK, U., KNÖPFLE, W., RABUS, B., BENJES, A. & KOSMANN, D. (2000): SRTM/X-SAR Products and Quality. Tagungsband Eusar 2000-Konferenz, München, 237-240
- DUREN, R., WONG, E., BRECKENRIDGE, B., SCHAFFER, S., DUNCAN, C., TUBBS, E. & SALOMON, P. (1998): Metrology, attitude and orbit determination for spaceborne interferometric synthetic aperture radar. Tagungsband SPIE AeroSense Conference on Acquisition, Tracking and Pointing XII
- HELM, A., BRAUN, A., EICKSCHEN, S., RENTSCH, M. & SCHÖNE, T. (2001): Calibration of the Shuttle Radar Topography Mission X-SAR Instrument Using Altimetry Data, Geophysical Research Abstracts, Vol. 3, EGS General Assembly Suppl., p. 404
- EINEDER, M., BREIT, H., ADAM, N., HOLZNER, J., SUCHAND, S. & RABUS, B. (2001): SRTM/X-SAR Calibration Results, Tagungsband der IGARSS'01-Konferenz, Sydney, Australien
- EINEDER, M. & ADAM, N (1997): A Flexible System for the Generation of Interferometric SAR Products. Tagungsband der IGARSS'97-Konferenz, Singapore
- ROTH, A., KNÖPFLE, W., RABUS, B., GEBHARDT, S. & SCALES, D. (1999): GeMoS – A System for the Geocoding and Mosaicking of Interferometric Digital Elevation Models. Tagungsband der IGARSS'99-Konferenz, Hamburg
- KNÖPFLE, W., STRUNZ, G. & ROTH, A. (1998): Mosaicking of Digital Elevation Models derived by SAR Interferometry. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 32, Part 4, 306-313
- MIKUSCH, E., DIEDRICH, E., GÖHMANN, M., KIEMLE, S., RECK, C., REIßIG, R., SCHMIDT, K., WILDEGGER, W. & WOLFMÜLLER, M(2000): Data Information and Management System for the Production, Archiving and Distribution of Earth Observation Products. Tagungsband der DASIA 2000 – Data Systems in Aerospace, Montreal, Canada, EUROSPACE, ESA, SP-457, 401-406
- DLR (2001): Datenpolitik des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) zur raumgestützten Fernerkundung. DLR EODP, V3.0, Mai 2001

# Halbautomatische Gebäudeextraktion durch hybride Ausgleichung unter Einbeziehung von 3D Objektmodellen

FRANZ ROTTENSTEINER<sup>1</sup>

*Zusammenfassung: Es wird eine neue Methode zur halbautomatischen Gebäudeextraktion aus digitalen Luftbildern vorgestellt. Grundlage dieser Methode ist das CSG-Prinzip: jedes Gebäude wird aus einfachen Gebäudeprimitiven, die durch Boolesche Operatoren kombiniert werden, zusammengesetzt. Die Primitive werden durch den Benutzer in den Bildern näherungsweise positioniert. Die Feinmessung erfolgt automatisch. Fertig rekonstruierte Gebäude werden in einem TIS gespeichert. In allen Phasen des Auswerteprozesses übernimmt eine neue Methode der Integration von robuster Parameterschätzung und Objektmodellierung durch Randdarstellung eine Schlüsselrolle. Das Verfahren zur automatisierten Feinmessung der Gebäudeprimitive beruht auf der hierarchischen Anwendung von merkmalsbasierten Zuordnungsverfahren im Objektraum. Es werden Ergebnisse eines Testprojekts präsentiert.*

## 1 Einleitung

Der große Bedarf an 3D Gebäudemodellen kollidiert mit den enormen Kosten für die Erfassung dieser Daten, weshalb die Automatisierung dieser Aufgabe als notwendig erscheint. Um der Komplexität der Aufgabe gerecht zu werden und dennoch kostengünstige Methoden zur Erfassung von Gebäuden zur Verfügung stellen zu können, bietet sich die Entwicklung von halbautomatischen Verfahren zur Gebäudeextraktion an. VAN DEN HEUVEL (2000) unterscheidet zwei Arten von halbautomatischen Systemen. Bei der ersten Gruppe von Systemen erfolgt die Messung von Punkten und die Erfassung von Strukturdaten interaktiv. Aus der so gewonnenen strukturierten Punktwolke wird dann automatisch die Topologie der Gebäude abgeleitet. Auf diesem Prinzip beruht z.B. der CyberCity Modeler (GRÜN & WANG, 1998). Bei der zweiten Gruppe von Systemen ist die Objektmodellierung direkt in die photogrammetrische Auswertung integriert. Es werden einfache Gebäudemodelle vorgegeben. Der Benutzer wählt auf Basis einer visuellen Interpretation ein passendes Modell aus und positioniert es näherungsweise in den Bildern. Die Feinmessung erfolgt automatisch, z.B. (GÜLCH ET AL., 1998).

Für die Modellierung der Gebäude kommen vorwiegend zwei Modellierungstechniken zur Anwendung, z.B. (GÜLCH ET AL., 1998): *Randdarstellung*, also die Modellierung eines Objektes durch seine begrenzenden Flächen, Kanten und Ecken sowie deren Nachbarschaftsbeziehungen, und *Constructive Solid Geometry* (CSG), die Modellierung von Gebäuden durch einfach geformte volumetrische Primitive, die mit Hilfe Boolescher Mengenoperatoren kombiniert werden können. Tatsächlich werden zur Gebäudeextraktion oft hybride Modellierungstechniken verwendet. Dabei wird dem Benutzer eine CSG-Schnittstelle zur Verfügung gestellt, während für die Visualisierung sowie als Schnittstelle zu CAD-Programmen die Randdarstellung aus der CSG-Repräsentation abgeleitet wird (MÄNTYLÄ, 1988).

In Abschnitt 2 soll ein am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung der TU Wien (I.P.F.) entwickeltes System zur halbautomatischen Gebäudeextraktion aus digitalen Luftbildern für ein topographisches Informationssystem (TIS) vorgestellt werden. In Abschnitt 3 werden die Ergebnisse eines Pilotprojektes präsentiert, und Abschnitt 4 bringt eine Zusammenfassung und einen Ausblick auf weitere Entwicklungen dieses Systems.

---

<sup>1</sup> Dr. Franz Rottensteiner, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, Technische Universität Wien, Gußhausstr. 27-29, A-1040 Wien, Österreich, e-mail: [fr@ipf.tuwien.ac.at](mailto:fr@ipf.tuwien.ac.at)

## 2 Halbautomatische Gebäudeauswertung

### 2.1 Systemübersicht und Arbeitsablauf

Das neue Verfahren zur Gebäudeauswertung wurde als Modul des am I.P.F. entwickelten Programmes ORPHEUS realisiert. ORPHEUS stellt einerseits eine graphische Benutzeroberfläche für das Programmsystem ORIENT zur Ausgleichung hybrider Beobachtungen (KAGER, 1989) und andererseits einen digitalen Mehrbild-Monokomparator zur interaktiven Messung von Punkten und Generierung von 3D Photomodellen dar (ROTTENSTEINER, 2001). Grundlage des vorzustellenden Verfahrens ist die Integration von Objektmodellierung und photogrammetrischer Auswertung (VAN DEN HEUVEL, 2000). Als Ausgangsmaterial liegen digitale Luftbilder sowie deren Orientierungsparameter vor. Ein digitales Geländemodell (DGM) kann verwendet werden, um die Höhen der Bodenpunkte der Gebäude zu interpolieren. Es wird eine Datenbank mit einfachen Gebäudeformen zur Verfügung gestellt, die sowohl parametrische Gebäudeprimitive als auch prismatische Gebäudetypen enthält. Während durch diese Datenbank und die entsprechenden Werkzeuge zur Bearbeitung der Primitive eine CSG-Benutzerschnittstelle vorgegeben wird, erfolgt die interne Modellierung sowohl der Primitive als auch des zusammengesetzten Gebäudes durch Randdarstellung.

Jedes Gebäude wird vom Benutzer aus Primitiven aus der Datenbank der Gebäudeformen mit Hilfe von Booleschen Operatoren zusammengesetzt. Dabei sind mindestens zwei digitale Bilder am Bildschirm dargestellt, denen alle bereits ausgewerteten Gebäude, das aktuelle Gebäude und das aktuelle Primitiv als Drahtmodelle überlagert sind (Abb. 1). Der Benutzer kann nun in den Bildern Gebäudeecken messen. Nach jeder Interaktion werden die Parameter des Primitives aus den vorhandenen Beobachtungen geschätzt und die Darstellung der Drahtmodelle erneuert. Auf Wunsch kann die Feinmessung automatisch durchgeführt werden. Danach kann das Primitiv nötigenfalls weiter interaktiv bearbeitet werden, bis der Benutzer zum Schluß kommt, das Primitiv sei korrekt rekonstruiert und deshalb zu akzeptieren. Wird ein Primitiv akzeptiert, so wird es dem aktuellen Gebäude hinzugefügt, und es werden die Randdarstellung des aktuellen Gebäudes und jene des aktuellen Primitives nach der von MÄNTYLÄ (1988) angegebenen Methode verschnitten, gegebenenfalls die Höhe des Bodens aus dem

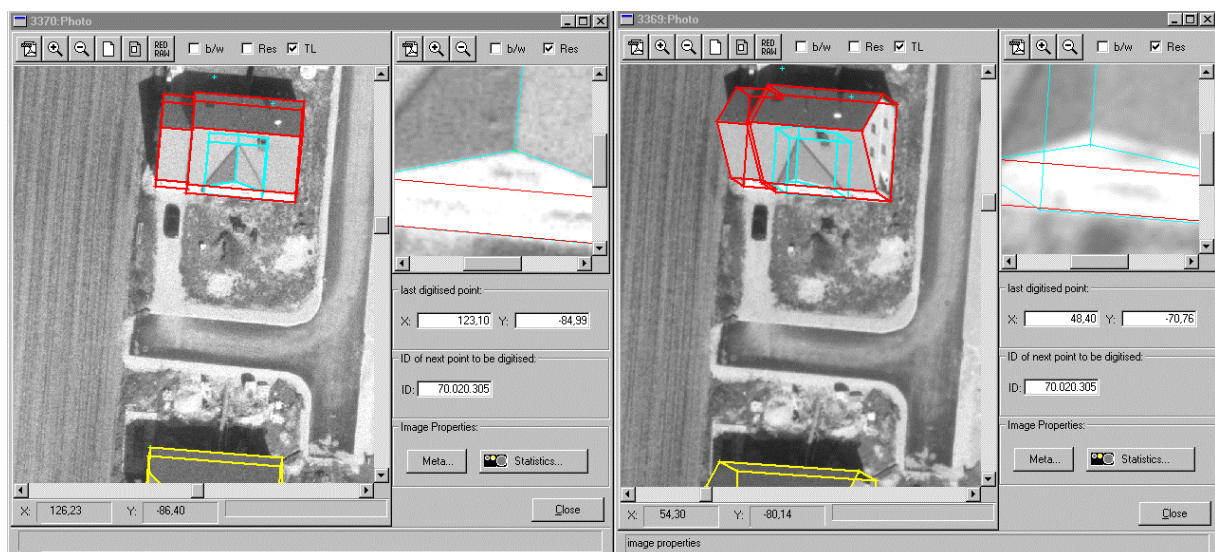


Abb. 1: Visualisierung zweier Luftbilder für die Gebäudeextraktion. Gelb: bisher erfaßte Gebäude. Rot: aktuelles Gebäude. Cyan: aktuelles Primitiv.

DGM bestimmt und die Darstellung des Gebäudes in allen Bildern nachgeführt. Sobald der Benutzer entscheidet, daß kein weiteres Primitiv mehr dem Gebäude hinzuzufügen ist, wird das Gebäude akzeptiert und an das TIS übergeben.

Durch diesen Arbeitsablauf wird auf mehrere Arten Arbeit im Vergleich zur konventionellen Auswertung gespart. Zunächst stellen die Gebäudeprimitive bereits konsistente 3D-Modelle mit vollständiger topologischer Information dar. Durch die Ausnützung von Symmetrien und Orthogonalitäten bei der Modellierung wird die Anzahl der vom Benutzer interaktiv zu identifizierenden Gebäudeecken erheblich verringert. Wenn die Feinmessung automatisch erfolgen kann, wird die Anzahl der notwendigen Benutzeraktionen weiter reduziert. Schließlich fallen bei der Kombination der Primitive die Schnittlinien automatisch an.

## 2.2 Das mathematische Modell der hybriden Ausgleichung

Das Programm ORIENT zeichnet sich durch die große Anzahl der Beobachtungstypen, die in einer Ausgleichung simultan verarbeitet werden können, aus (KAGER, 1989). In ORIENT werden die Beobachtungen als Koordinaten von Punkten in 3D Räumen betrachtet, denen je ein kartesisches Koordinatensystem, das *Beobachtungskoordinatensystem*, zugeordnet ist. Jeder dieser Räume ist mit dem Objektkoordinatensystem durch eine Abbildungsfunktion verknüpft, deren Parameter aus den Beobachtungen durch Ausgleichung nach vermittelnden Beobachtungen geschätzt werden. In ORIENT werden alle Beobachtungstypen einheitlich behandelt, indem zur Beschreibung des Zusammenhangs zwischen beobachtetem Punkt  $\mathbf{p}=(u,v,w)^T$  und Objektpunkt  $\mathbf{P}=(X,Y,Z)^T$  zunächst dieselbe Transformation verwendet wird:

$$\mathbf{M} \cdot [\mathbf{p} - \mathbf{p}_0(\mathbf{adp})] = \lambda \cdot \mathbf{R}^T(\boldsymbol{\Theta}) \cdot (\mathbf{P} - \mathbf{P}_0) \quad (1)$$

In Gleichung (1) wird  $\mathbf{p}_0 = (u_0, v_0, w_0)^T$  als *innerer Referenzpunkt* bezeichnet. Er kann durch Funktionen der zusätzlichen Parameter *adp* modifiziert werden.  $\mathbf{R}$  ist eine Rotationsmatrix in Abhängigkeit der Drehwinkel  $\boldsymbol{\Theta}$ , z.B.  $\boldsymbol{\Theta} = (\omega, \varphi, \kappa)^T$ .  $\lambda$  bezeichnet einen Maßstabsfaktor,  $\mathbf{P}_0$  heißt *äußerer Referenzpunkt*, und  $\mathbf{M} = \text{diag}(m_u, m_v, m_w)$  bezeichnet eine Spiegelungsmatrix. Mit Ausnahme von  $\mathbf{M}$  können alle Parameter durch Ausgleichung bestimmt werden. Aus Gleichung (1) werden die Abbildungsgleichungen aller Beobachtungstypen abgeleitet, wobei einzelne Parametergruppen verschiedene Interpretationen erhalten können. So gilt etwa für *in zentralperspektivischen Bildern gemessene Punkte*:  $w = 0$ ,  $\mathbf{P}_0$  ist das Projektionszentrum und  $\mathbf{p}_0$  liegt um die Kamerakonstante  $c$  vor dem Hauptpunkt. Die zusätzlichen Parameter *adp* sind die Koeffizienten von Verzeichnungspolynomen, und  $\lambda$  beschreibt die Position des Objektpunktes  $\mathbf{P}$  auf dem Projektionsstrahl. Durch Umformung von Gleichung (1) erhält man die Gleichungen der Zentralprojektion in ihrer üblichen Form. Weiters können für alle Gruppen von Parametern in Gleichung (1) Beobachtungen („*Parameterbeobachtungen*“) eingeführt werden. So degeneriert Gleichung (1) z.B. für Paßpunkte zu  $\mathbf{p}=\mathbf{P}$  (KAGER, 1989).

Im Kontext der Gebäudeextraktion von besonderer Bedeutung sind „GESTALT“-Beobachtungen, also fiktive Beobachtungen der Art, daß ein Punkt  $\mathbf{P}$  im Objektraum auf einer Fläche liege. Eine solche Fläche wird ebenfalls in einem lokalen Koordinatensystem modelliert, das mit dem Objektkoordinatensystem über Gleichung (1) zusammenhängt. Der Maßstab wird konstant mit  $\lambda = 1$  angenommen. Um  $\mathbf{P}$  als auf der Fläche liegend zu modellieren, kann der Abstand zwischen  $\mathbf{P}$  und der Fläche fiktiv mit dem Wert 0 „beobachtet“ werden. Es wird an Stelle des Normalabstandes die größte Komponente des Differenzvektors verwendet.  $\mathbf{p}_0$  erhält eine besondere Interpretation: seine Komponenten werden als Polynome in Abhän-

gigkeit von  $\mathbf{p}_R = (u_R, v_R, w_R)^T = \mathbf{R}^T \cdot (\mathbf{P} - \mathbf{P}_0)$  angenommen, durch die je eine Fläche im Beobachtungskoordinatensystem modelliert wird. Es gibt daher drei Möglichkeiten für die Formulierung der Abbildungsgleichungen:

$$\begin{aligned} 0 &= m_u \cdot u_R + \sum_{j,k=0}^{n,n} a_{jk} \cdot (m_v \cdot v_R)^j \cdot (m_w \cdot w_R)^k \\ 0 &= m_v \cdot v_R + \sum_{i,k=0}^{n,n} b_{ik} \cdot (m_u \cdot u_R)^i \cdot (m_w \cdot w_R)^k \\ 0 &= m_w \cdot w_R + \sum_{i,j=0}^{n,n} c_{ij} \cdot (m_u \cdot u_R)^i \cdot (m_v \cdot v_R)^j \end{aligned} \quad (2)$$

Dabei werden die zusätzlichen Parameter **adp** aus Gleichung (1) durch die GESTALT-Koeffizienten  $a_{jk}$ ,  $b_{ik}$  und  $c_{ij}$  ersetzt, die die Form der Fläche im Beobachtungskoordinatensystem beschreiben. Innerhalb einer Applikation kann für eine GESTALT, also für die eine bestimmte Menge von Punkten enthaltenden Fläche, eine beliebige Auswahl einer Teilmenge aller möglichen Koeffizienten getroffen werden. Da die Zuordnung von Parametern der Abbildungsfunktion zu den GESTALTen per Referenz erfolgt, können mehrere GESTALTen mit unterschiedlichen Koeffizienten sich auf das selbe bzw. mehrere GESTALTen mit identischen Koeffizienten auf verschiedene Beobachtungskoordinatensysteme beziehen. Auf diese Art und durch geeignete Wahl der Elemente von  $\mathbf{M}$  können sehr leicht implizit geometrische Bedingungen zwischen Flächen modelliert werden (KAGER, 1989).

Alle Beobachtungen werden simultan nach der Methode der kleinsten Quadrate ausgeglichen, wobei das mathematische Modell der Ausgleichung sich aus den Spezialisierungen der Abbildungsfunktion ergibt. Das stochastische Modell der Ausgleichung ist durch die Annahme gegeben, daß die Beobachtungen unkorreliert und normalverteilt sind. Grobe Fehler in den Beobachtungen können durch robuste Schätzung eliminiert werden. Zu diesem Zweck wird nach Beendigung der Ausgleichung die Iteration erneut aufgenommen, wobei die Gewichte der Beobachtungen in Abhängigkeit ihrer normalisierten Residuen aus dem jeweils vorigen Iterationsschritt moduliert werden (KAGER, 1989).

## 2.3 Modellierung der Gebäudeprimitive im Rekonstruktionsprozeß

Im Rekonstruktionsprozeß sollen die durch die Modellierung der Primitive vorgegebenen topologischen und geometrischen Bedingungen in die Ausgleichung einfließen. Dies erfolgt durch ein System von GESTALTen, das bei der Initialisierung eines Gebäudeprimitive angelegt wird. Jeder Fläche der Randdarstellung entspricht eine (ebene) GESTALT, die durch eine der Gleichungen (2) modelliert wird. Alle diese GESTALTen werden im selben Beobachtungskoordinatensystem formuliert, d.h. es gibt für alle GESTALTen nur einen äußeren Referenzpunkt  $\mathbf{P}_0$  und einen Satz von Drehwinkeln  $\Theta$ . Die Parametrisierung aller Ebenen bezieht sich auf eben dieses Koordinatensystem, wobei durch geeignete Wahl der Spiegelungsmatrix  $\mathbf{M}$  Symmetrien modelliert werden können. Die Form der Gebäudeprimitive wird durch die gewählten Polynomkoeffizienten  $a_{jk}$ ,  $b_{ik}$  und  $c_{ij}$  beschrieben. Für alle Punkte, die einer Fläche der Randdarstellung zugeordnet werden, wird eine Beobachtung in die entsprechende GESTALT eingeführt. Dies gilt auch für alle Gebäudeecken der Randdarstellung, sodaß von vornherein für jede Gebäudeecken mindestens drei GESTALT-Beobachtungen vorliegen, die in der Ausgleichung die Ebenen verknüpfen und somit die Topologie der Randdarstellung repräsentieren. Abb. 2 zeigt als Beispiel die Parametrisierung eines einfachen Primitives.  $\mathbf{P}_0$  liegt im Zentrum auf dem Boden. Die  $w$ -Achse des Koordinatensystems steht auch im Objektraum vertikal, es gilt  $\omega = \varphi = 0$ . Das Primitiv besteht aus sieben Ebenen:

1. Boden:  $w_0 = 0$ .
2. Vorderwand:  $v_0 = a_{00}^f$
3. Rückwand:  $v_0 = a_{00}^f$ ;  $m_v = -1$ : symmetrisch zu 2. bezüglich der  $uw$ -Ebene.
4. Rechte Wand:  $u_0 = b_{00}^r$
5. Linke Wand:  $u_0 = b_{00}^r$ ;  $m_u = -1$ : symmetrisch zu 4. bezüglich der  $vw$ -Ebene.
6. Rechte Dachebene:  $w_0 = c_{00}^r + c_{10}^r \cdot u_R$
7. Linke Dachebene:  $w_0 = c_{00}^r + c_{10}^r \cdot u_R$ ;  $m_u = -1$ : symmetrisch zu 6. bezüglich der  $vw$ -Ebene.

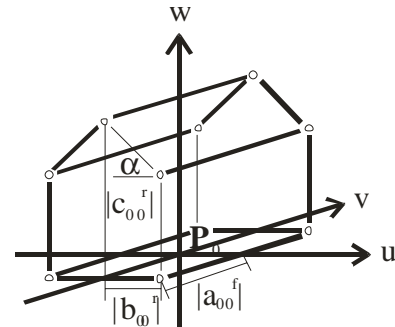


Abb. 2: Parametrisierung der Ebenen eines Gebäudes mit Satteldach.

Als Parametern treten  $P_0$  und  $\kappa$  (Position und Orientierung des Primitives im Objektraum),  $a_{00}^f$ ,  $b_{00}^r$ ,  $c_{00}^r$ ,  $c_{10}^r$  (Form des Primitives) und die Objektkoordinaten der Gebäudeecken auf. Letztere sind immer aus ihren GESTALT-Beobachtungen bestimmbar. Die verbleibenden Parameter müssen aus Bildkoordinaten bestimmt werden. Solange diese nicht vorliegen, werden dafür „Parameterbeobachtungen“ eingeführt. Obwohl die Modellierung der Gebäudeprimitive durch Randdarstellung erfolgt, ist zu ihrer Beschreibung nur eine minimale Anzahl von Parametern nötig. Um die Datenbank der Gebäudeprimitive zu erweitern, muß nur die Beschreibung der Randdarstellung des neuen Primitives sowie die Abbildung der Primitivparameter in das oben beschriebene System der GESTALT-Parametrisierung festgelegt werden.

## 2.4 Interaktive Bearbeitung der Gebäudeprimitive

Nach der Initialisierung eines Primitives, bei der das eben beschriebene System von GESTALTen angelegt und mit Startwerten versehen wird, erfolgt die interaktive Bearbeitung durch Identifizieren der Gebäudeecken in den digitalen Bildern. Für jede vom Benutzer in den Bildern identifizierte Gebäudeecke werden zwei Bildkoordinaten-Beobachtungen generiert, die zur Bestimmung der Gebäudeparameter herangezogen werden. Es erfolgt nach jeder Benutzerinteraktion eine Ausgleichung, in die neben den durch die Modellierung vorgegebenen GESTALT- und Parameterbeobachtungen die vom Benutzer gemessenen Bildkoordinaten einfließen. Dabei wird das Problem, zu erkennen, welche Parameter durch die neu hinzugekommenen Beobachtungen bestimmbar sind, mit Hilfe der robusten Schätzung gelöst, wobei die Strategie der Modulation der Gewichte nur auf die „Parameterbeobachtungen“ angewandt wird. Nach der Ausgleichung wird die Darstellung der Drahtmodelle erneuert. Diese Prozedur wird so lange wiederholt, bis auf Grund einer visuellen Beurteilung entschieden wird, daß die Drahtmodelle gut genug zum Bildinhalt passen. Dabei hat man die Wahl, die Gebäudeecken in den Bildern näherungsweise zu positionieren, um Startwerte für die automatische Feinmessung zu erhalten, oder sie exakt zu messen. Diese Methode arbeitet unabhängig von der Reihenfolge, in der die Gebäudeecken identifiziert werden, und sie ist auch unabhängig von der Anzahl der identifizierten Ecken (Rottensteiner, 2001).

## 2.5 Automatische Feinmessung der Gebäudeprimitive

Ausgehend von den digitalen Bildern, deren Orientierungsparametern und den vom Benutzer vorgegebenen groben Näherungen für die Gebäudeparameter erfolgt die automatische Feinmessung durch hierarchische Anwendung merkmalsbasierter Bildzuordnungsverfahren. Beginnend in einem vom Benutzer vordefinierten Bildpyramidenniveau  $N$  werden in jedem Pyramidenniveau zunächst mit Hilfe der polymorphen Merkmalsextraktion (FUCHS, 1998) Bild-



punkte und –kanten extrahiert. In der Folge werden nur noch die Bildkanten verwendet, die in einem modellgetriebenen Prozeß den Dachkanten der Randdarstellung zugeordnet werden. Diese Zuordnung erfolgt in einem zweistufigen Verfahren, in dem zuerst Zuordnungshypothesen erzeugt und anschließend hinsichtlich ihrer Konsistenz mit einem Objektmodell evaluiert werden, um falsche Hypothesen zu eliminieren (GÜLCH, 1994). Als Ergebnis erhält man eine der Auflösung des jeweiligen Pyramidenniveaus entsprechende Objektrepräsentation, die als Näherung für den Zuordnungsprozeß in der nächsthöheren Auflösung dient. Der Prozeß ist abgeschlossen, sobald die Zuordnung in den Bildern mit der höchsten Auflösung erfolgt ist. Durch diese iterative Vorgangsweise wird der Konvergenzradius der Zuordnung erhöht. Um dem Problem der in den Bildern auftretenden Verdeckungen zu begegnen, ist es nützlich, mehr als zwei Bilder zu verwenden (ROTTENSTEINER, 2001).

Die Erzeugung der Zuordnungshypothesen erfolgt unabhängig für alle Dachkanten der Gebäudeprimitive in allen Bildern. Die genäherte Lage der Kante in einem Bild sei  $e^o$  (Abb. 3). In den Bildern werden die Bildkanten  $l$  durch Polygone approximiert. Ein Segment  $s_i$  von  $l$  wird dann der Objektkante zugeordnet, wenn mindestens einer seiner Endpunkte innerhalb eines durch eine Schranke  $\epsilon$  im Bild definierten Suchbereiches liegt und der Winkel  $\alpha$  zwischen  $s_i$  und  $e^o$  kleiner als ein Schwellwert  $\alpha_0$  ist. Für jeden Endpunkt eines so als Kandidaten für die Zuordnung zu einer Objektkante gefunden Segments werden vier Beobachtungen erzeugt (je zwei Bildkoordinaten und zwei GESTALT-Beobachtungen), denen drei unbekannte Objektkoordinaten gegenüberstehen. Das stochastische Modell der Bildkoordinaten ergibt sich aus den mittleren Fehlern der Polygonapproximation durch Fehlerfortpflanzung: der mittlere Fehler eines Endpunktes normal zum Segment ist umgekehrt proportional der Quadratwurzel der Länge des Segments, jener in Richtung des Segments gleich dem Digitalisierungsintervall (FUCHS, 1998). Lange Segmente erhalten so einen größeren Einfluß als kurze.

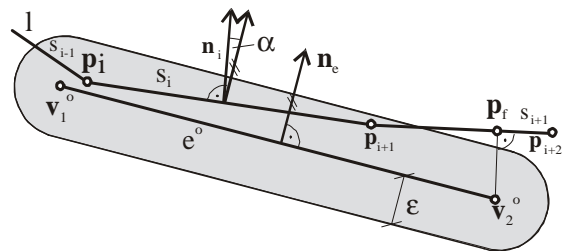


Abb. 3: Erzeugung von Zuordnungshypothesen.

Die Evaluierung der Zuordnungshypothesen erfolgt durch eine gemeinsame Ausgleichung aller Beobachtungen für alle Kanten, wobei die Rolle des Objektmodelles durch das in Abschnitt 2.3 beschriebene System von GESTALT-Beobachtungen wahrgenommen wird. Die Eliminierung falscher Hypothesen erfolgt durch robuste Schätzung, wobei das Prinzip der Gewichtsmodulation nur auf die Bildkoordinaten angewandt wird. Auf Grund der hierarchischen Strategie kann in jedem Bildpyramidenniveau der Suchbereich relativ klein gehalten werden, was die Zahl der falschen Zuordnungen von vornherein verringert. Ein wichtiger Parameter des Evaluierungsprozesses ist der mittlere Fehler a priori  $s_g$  einer GESTALT-Beobachtung, der die „Rigidität“ des Objektmodells im Zuordnungsprozeß beschreibt.

## 2.6 Verwaltung der Gebäudemodelle in einem TIS

Die Rolle des TIS wird im hier beschriebenen System von dem am I.P.F. entwickelten und auf einer relationalen Datenbank mit zusätzlichen geometrischen Elementen beruhenden Programm SCOP.TDM übernommen (HOCHSTÖGER, 1996). Zur Verwaltung der Gebäudedaten wurde ein „objekt-rationales“ Prinzip verwendet, das es ermöglicht, diese relationale Datenbank zu nutzen und doch eine objektorientierte Sicht auf diese Datenbank zur Verfügung zu stellen. In SCOP.TDM werden DGMs in einer Tabelle der relationalen Datenbank so verwal-

tet, daß jede Zeile dieser Tabelle einem auf eine binäre Datei ausgelagerten DGM entspricht. Die Spalten dieser Tabelle enthalten nur die Metadaten, z.B. Objekttyp, Dateiformat, Dateiname und Ausdehnung. Es werden also die eigentlichen Daten als auf Datei ausgelagerte „binäre große Objekte“ („Binary Large Objects“, BLOBs) behandelt, während die Metadaten in der relationalen Datenbank verwaltet werden. Dieses Prinzip wird nun auch auf Gebäudedaten angewendet, indem neue Werte für die Attribute „Objekttyp“ und „Dateiformat“ zugelassen werden. Die Randdarstellung der Gebäude ist auf eine externe binäre Datei ausgelagert. Um die objektorientierte Sicht auf die topographischen Daten zu erhalten, ist eine Schnittstelle nötig, die an SCOP.TDM Abfragen richtet, aus dem Ergebnis das Attribut „Objekttyp“ interpretiert und das dem Wert dieses Attributes entsprechende Objekt instantiiert. Diese Objekte verfügen dann über die entsprechenden Methoden, um ihre Daten aus den dem Wert des Attributes „Dateiname“ entsprechenden Dateien zu initialisieren (ROTTENSTEINER, 2001).

### 3 Ergebnisse

Zur Evaluierung des neuen Verfahrens wurde ein Testprojekt in Stoitzendorf (Niederösterreich) durchgeführt. Dafür wurde ein kleiner Luftbildblock ( $M = 1:4500$ ,  $c=15$  cm, Digitalisierungsintervall:  $15 \mu\text{m}$ , S/W) mit zwei Streifen mit 70% Längs- und 50% Querüberdeckung verwendet. Im Bereich des Ortskerns waren alle Gebäude in sechs Bildern sichtbar. Ein DGM wurde durch Stereoauswertung in einem analytischen Auswertegerät bestimmt.

Um die Genauigkeit des Verfahrens zur automatischen Feinmessung zu untersuchen, wurden fünf Gebäudeprimitive ausgewählt und sowohl automatisch als auch manuell ausgewertet. Es konnten so mittlere Fehler  $\sigma_{\Delta}$  der Differenzen der Parameter der Primitive berechnet werden. Sie betragen für die Position  $(X_0, Y_0)$  des Primitivs  $\sigma_{\Delta} = \pm 3.1$  cm, für die Orientierung  $\kappa \sigma_{\Delta} = \pm 85$  mgon, für die Gebäudedimensionen  $a_{00}^f$  und  $b_{00}^r$   $\sigma_{\Delta} = \pm 2.9$  cm, für die Firsthöhe  $c_{00}^r$   $\sigma_{\Delta} = \pm 2.8$  cm sowie für die Dachneigung  $c_{10}^r$   $\sigma_{\Delta} = \pm 1.1\%$ . Diese Ergebnisse zeigen das hohe Genauigkeitspotential der Methode, das durch die große Anzahl an Beobachtungen für ein einzelnes Primitiv (ca. 2500) begründet ist. Allerdings sind noch weitere Untersuchungen mit einer größeren Anzahl von Gebäuden nötig, um zu einer endgültigen Beurteilung zu kommen.

Es wurde auch die Konvergenzfähigkeit der automatischen Feinmessung in Abhängigkeit von Steuerparametern und der Qualität der Näherungswerte untersucht (ROTTENSTEINER, 2001). Das Verfahren konvergiert bei Abweichungen der Näherungen von bis zur halben Gebäude-

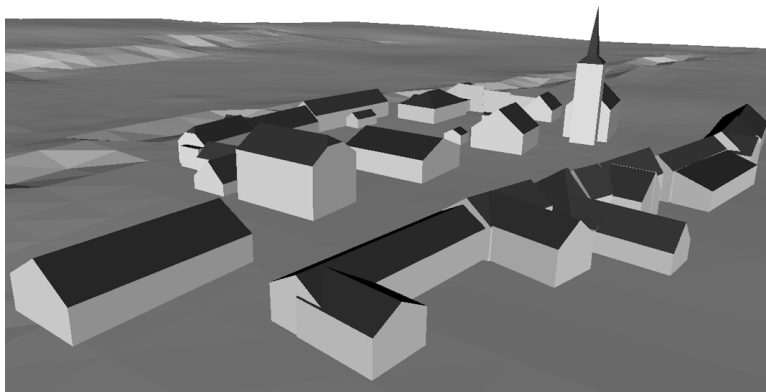


Abb. 4: VRML-Visualisierung der ausgewerteten Gebäude mit DGM.

ausdehnung, aber nur unter Verwendung der hierarchischen Strategie, weil in den Bildern mit grober Auflösung bei gleicher Größe des Interessensgebietes weniger Fehlzuordnungen auftreten. Hinsichtlich des Einflusses von  $s_g$  zeigte sich, daß schon für  $s_g = \pm 10$  cm falsche Ergebnisse auftreten können, weil falsche Zuordnungen nicht mehr eliminiert werden. Im Testprojekt hat sich die Wahl von  $s_g = \pm 2$  cm bewährt.

Um die allgemeine Anwendbarkeit des Verfahrens zu testen, wurde der Ortskern von Stoitzendorf zur Gänze ausgewertet. Abb. 4 zeigt eine VRML-Visualisierung des erfaßten Bereichs. Er besteht aus 18 Gebäudeblöcken mit insgesamt 48 Primitiven. Als kritisch für den Erfolg der automatischen Feinmessung haben sich vor allem Schlagschatten und fehlender Kontrast herausgestellt. Generell war die monoskopische Interpretation der Bilder für die Wahl eines Gebäudeprimitives in manchen Fällen kritisch. Hier hätte wohl die Verwendung von Farbbildern bzw. eine stereoskopische Betrachtung eine deutliche Verbesserung gebracht. Trotzdem kann das Ergebnis der Rekonstruktion einer doch relativ komplexen Szene mit sehr verschachtelten Gebäudeformen als sehr ermutigend betrachtet werden.

## 4 Zusammenfassung und Ausblick

Es wurde ein neues Verfahren zur halbautomatischen Gebäudeextraktion entwickelt und in einem Pilotprojekt getestet. Die Ergebnisse des Tests zeigen das hohe Genauigkeitspotential der neuen Methode, aber auch einige Möglichkeiten zu deren Verbesserung. Das dem Verfahren zugrunde liegende Prinzip der Integration von Objektmodellierung und Parameterschätzung ist aber in keiner Weise auf die Anwendung im Kontext der halbautomatischen Gebäudeextraktion beschränkt. Es kann auch auf eine generische Modellierung durch Polyeder verallgemeinert werden und somit in Zukunft die Grundlage für eine Feineinpassung von Gebäudemodellen in einer datengetriebenen Gebäudeextraktion sein.

## 5 Literaturverzeichnis

- FUCHS, C., 1998: Extraktion polymorpher Bildstrukturen und ihre topologische und geometrische Gruppierung. Dissertation, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, DGK-C 502, München.
- GRÜN, A. & WANG, X., 1998: CC-Modeler: A Topology Generator for 3-D City Models. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* **53** (5): 286-295.
- GÜLCH, E., 1994: Erzeugung digitaler Geländemodelle durch automatische Bildzuordnung. Dissertation, Universität Stuttgart, DGK-C 418, München.
- GÜLCH, E., MÜLLER, H., LÄBE, TH. & RAGIA, L., 1998: On the Performance of Semi-automatic Building Extraction. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* **32** (3/1): 331-338.
- HOCHSTÖGER, F., 1996: Software for Managing Country-Wide Digital Elevation Data. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* **31** (B2): 160-163.
- KAGER, H., 1989: ORIENT: A Universal Photogrammetric Adjustment System. In: GRÜN, A. & KAHMEN, H. (Hrsg.): *Optical 3-D Measurement*. Herbert Wichmann Verlag, Karlsruhe: 447-455.
- MÄNTYLÄ, M., 1988: *An Introduction to Solid Modeling*. 401 Seiten, Computer Science Press, Rockville, Maryland, USA.
- ROTTENSTEINER, F., 2001: Semi-automatic extraction of buildings based on hybrid adjustment using 3D surface models and management of building data in a TIS. Dissertation, *Geowissenschaftliche Mitteilungen* **56**, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, TU Wien, ISBN 3-9500791-0.
- VAN DEN HEUVEL, F. A., 2000: Trends in CAD-based Photogrammetric Measurement. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* **33** (B5): 852-863.

# Mountain Rescue: Mission Support using Space Technology

STEFAN SARADETH<sup>1</sup>, MARKUS LAUTNER<sup>2</sup>, KLAUS LEGAT<sup>3</sup> & NIK  
KLEVER<sup>4</sup>

*Abstract: Search and Rescue (SAR) is a critical activity for saving the lives of human beings in distress. Here the timely and adequate supply of position and environment information is necessary. A mission support tool (SAR Land) is designed and implemented facilitating the location of victims, the overall coordination and providing rescue forces with appropriate information. Satellite positioning (GPS), communication (GSM) and Earth observation are integrated with common-off-the-shelf IT technology (e.g. GIS software and pocket computers). SAR Land is specifically conceived for the application in mountain rescue, tough application in such areas as humanitarian aid, emergency services during big events as well as tourism is envisaged. A report is given on the design and implementation of a preoperational, proof-of-concept demonstrator.*

*Zusammenfassung: Für die Rettung von Unfallopfern oder Vermissten ist die Suche und schnelle Bergung wesentlich. Im Rahmen eines von der EU im Rahmen des Astron Programms geförderten Projektes wurde ein funktionsfähiger Prototyp entwickelt zur Online-Bereitstellung von Informationen und Koordinaten der Einsatzkräfte. Dabei werden GPS-, Kommunikations- und Erdbeobachtungs-Techniken mit neuester Software und Taschencomputern kombiniert. Die Technik ist speziell abgestimmt auf die Anforderungen der Bergrettung, kann aber auch z.B. bei Katastrophenhilfe oder im Tourismus zum Einsatz kommen. Der Prototyp besteht aus einem 1. "Field-Assistent" basierend auf einem Pocket PC mit GIS, sowie der Anbindung einer Positionierungs- und Datenkommunikationslösung und 2. einem "Head-Assistent" u.a. ausgestattet mit 3d-Geländevisualisierung, Positionsverfolgung, GIS und Kommunikationsmodul. Der Einsatz wird im Gebiet um Oberstdorf - Nebelhorn demonstriert und validiert.*

## 1 Introduction

### 1.1 Search and Rescue in the Mountains

The increasing tourism and outdoor activities in the mountains cause a growing number of accidents and victims. The Alpine Club statistics state that more than 900 people lose their lives each year in the Alps. Every year more than 10 000 accidents occur and more than 1000 cases of lost or missing people are on record. Search and Rescue (SAR) is a critical activity for saving life of human beings in distress. Traditionally SAR service is closely associated with marine activities and mountain rescue. The first mountain rescue organisations were set-up in the 20ies of the last century. Nowadays Mountain Rescue is under high demand - the Bavarian Mountain Rescue alone responds to more than 10 000 emergency calls every year.

---

<sup>1</sup> Dr. Stefan Saradeth, GAF mbH, Arnulfstr.197, D-80634 München, email: saradeth@gaf.de

<sup>2</sup> Dipl. Geogr. Markus Lautner, GAF mbH, email: lautner@gaf.de

<sup>3</sup> Dipl. Ing. Klaus Legat, TeleConsult Austria, email: legat@teleconsult-austria.at

<sup>4</sup> Prof. Dr. Nik Klever, Bergwacht Bayern, Head WG Information, email:  
nik.klever@bergwacht-bayern.de

## **1.2 Mission Support Tool and the synergy of Earth observation, communication and navigation**

Communication and navigation are not new to SAR operations and they become more and more popular to tourists, hikers and other people travelling and working in the mountains. This is reflected by the increasing use of GPS (Global Positioning System) as a standard equipment being low priced and miniaturized down to the size of a wrist watch. Maps now become increasingly available with the WGS84 grid coordinate system superimposed. Similarly mobile communication became extremely popular in Europe the last years. The Austrian and German part of the Alps are now to a large extent (more than 80% of the area) covered by terrestrial mobile communication networks (GSM, Global System for Mobile Communication). In Germany more than 75% of mountain rescue calls are nowadays communicated through mobile telephone.

The synergy of the technologies Earth observation, communication and navigation has much to offer to SAR teams as well as to the outdoor and tourist community. Further technical developments (e.g. more frequent and higher resolution imagery, improved navigation and positioning) and service improvements (e.g. global services, more attractive pricing) will further support this. The key technologies can be either satellite-based (e.g. satellite remote sensing, satellite communication) or not satellite-based (e.g. aerial photography, GSM/SMS) with each having specific advantages.

A preoperational, yet functional mission support tool (proof-of-concept demonstrator) is developed with the purpose to support the Mountain Rescue and Search organisations in planning, performing, monitoring and coordinating of their tasks. The tool is conceived to help the operation head to coordinate, monitor, direct and advise field teams. The mission support tool consists of a Head Assistant (HA) and a Field Assistant (FA).

In the Head Assistant, a photo-realistic 3D GIS covers headquarter's responsibility area and includes visualisation of ancillary data. The HA is connected with each Field Assistant via telecommunication. Thus, they can exchange vital information and the operation head is informed about the current location of all the field teams.

The demonstrator is conceived and built on standard COTS (common off-the-shelf) hardware and software. A key issue is the modular approach. One technology can be replaced or complemented by an alternative, e.g. the terrestrial technology option (e.g. terrestrial communication link) by the satellite technology (satellite communication). The mission support tool is discussed in more details below. A general scheme on the integration of the mission support tool in SAR operations is given in Fig. 1.

## **2 Understanding of Requirements: Use cases**

Development of the Mission Support tool is controlled by a clear understanding of mission context and requirements. The application scenarios for the missions "Search" and "Rescue" were developed and analysed in detail. As principal actors of the system were identified: operation head(s), field teams and expert user.

Many SAR operations such as rescue, transport and recovery start as search operations. Search operations are the most demanding missions in terms of involved staff and duration of the operation. Usually between 2 and 12 field teams, each consisting at least of 2 persons are sent out. The operation head is usually mobile in a car and approaches the search area as close as possible.



**Figure 1: Integration of the SAR Mission Support Tool in a mountain search scenario**

The operation head can request further support (e.g. SAR helicopters with IR camera). Once the location of the person in distress is known to a certain extent, the rescue operation starts. Usually one field team is sent to the person in distress. When the location of the person in distress is not completely clear then 2 or more teams can be sent. In case that several field teams are in the area anyhow, the most appropriate (closest) one must be identified and selected for the rescue operation. The operation head is close to the mission area and remains in the car or is with the field team(s). The mission support tool can provide benefits to mountain rescue operations, especially in the case where several teams are operating in the field or during bad weather conditions.

Use cases were identified and described in detail to define the user requirements and establish a platform for system testing and validation. A use case represents the means of operating the system which is stimulated by an actor and generates a visible result that can be appreciated and measured by the actors. The use cases represent the SAR Mission Support

Tool functions from the user point of view. The user is an actor and can submit / request services to SAR Land. All use cases were analysed and described in a standardized way. An example for the use case “Analyse SAR situation” is presented in Table 1. Information is given (among other) on the actors who initiate the use case and on the sequence of interactions between the system and the actors. The following use cases were identified:

1. **Acquire Terrain Reconnaissance:** The operation head and staff use the system to acquire, improve and update knowledge of the terrain
2. **Analyse SAR situation:** In the phase alert and preparation the operation head assesses and verifies the SAR alert and situation
3. **Alarm field teams:** The operation head uses the system to alarm and inform the staff
4. **Define of search area and operation areas:** The operation head uses the system to delineate the primary search area and the operation areas for the field teams
5. **Instruct field teams:** The field teams get briefed and instructed on the operation
6. **Transfer operation data:** Data required for the performance of the operation are transferred for the field teams
7. **Coordinate and Monitor:** Head of operation coordinates and monitors all activities, using the following two cases
8. **Receive field team positions** and
9. **Telecommunicate:** Telecommunication between the operation head and all field teams
10. **Receive position data – field guidance:** Field teams are briefed on their own position
11. **Perform post-operation analysis:** After completion of the mission the “perform post-operation analysis” allows to assess the performance of the operation and all actors and to produce lessons-learnt
12. **Maintain database:** The expert user keeps the database up-to-date

**Table 1: Use Case - Analysis of SAR situation**

Title	Analyse SAR situation
Goal	Assessment and verification of the alert message
Actors	Operation Head
Operating conditions	Reception of SAR alert through Operation Head
Dependency	This use case extends the case “Terrain Reconnaissance”
Description	<p>The following sequence of activities occurs:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Receive and assess the alert message <ul style="list-style-type: none"> <li>• Locate location of last appearance of missed person</li> <li>• Assess terrain and trails within larger search area</li> <li>• Step through checklist, identify possible whereabouts like mountain cabins, bivouac places and check by telephone</li> <li>• Identify high risk areas</li> <li>• Communicate with local police</li> </ul> </li> <li>2. Verify the alert <ul style="list-style-type: none"> <li>• Call cabins and hotels and ask for missed person</li> </ul> </li> <li>3. Plan the SAR operation <ul style="list-style-type: none"> <li>• Assess need for resources (mountain rescue staff, field teams, additional resources (police, helicopter))</li> </ul> </li> </ol>
Non Functional Requirements	<ul style="list-style-type: none"> <li>• The easy, quick and error free performance of the use case is essential</li> <li>• The performance should not last more than 30 minutes</li> </ul>
Constraints	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Required is quick processing of the case after alert reception</li> </ul>

### 3 SAR LAND Mission Support Tool

SAR Land consists of a number of components, which are schematically displayed in figure 2 and further discussed below.

#### 3.1 Head Assistant (HA)

The component Head Assistant is intended to assist in all of the three identified purposes of the mission support tool: planning, monitoring and coordination of SAR operations. It collects and distributes relevant information from and to the field teams and provides a synergistic overview of the terrain scenery and the additional data sources.

The HA allows the operation head to get a realistic impression of the terrain through a 3d visualisation system, based on information derived from maps, EO data and a DTM and enhanced with other information layers, like characterisation of relevant infrastructure.

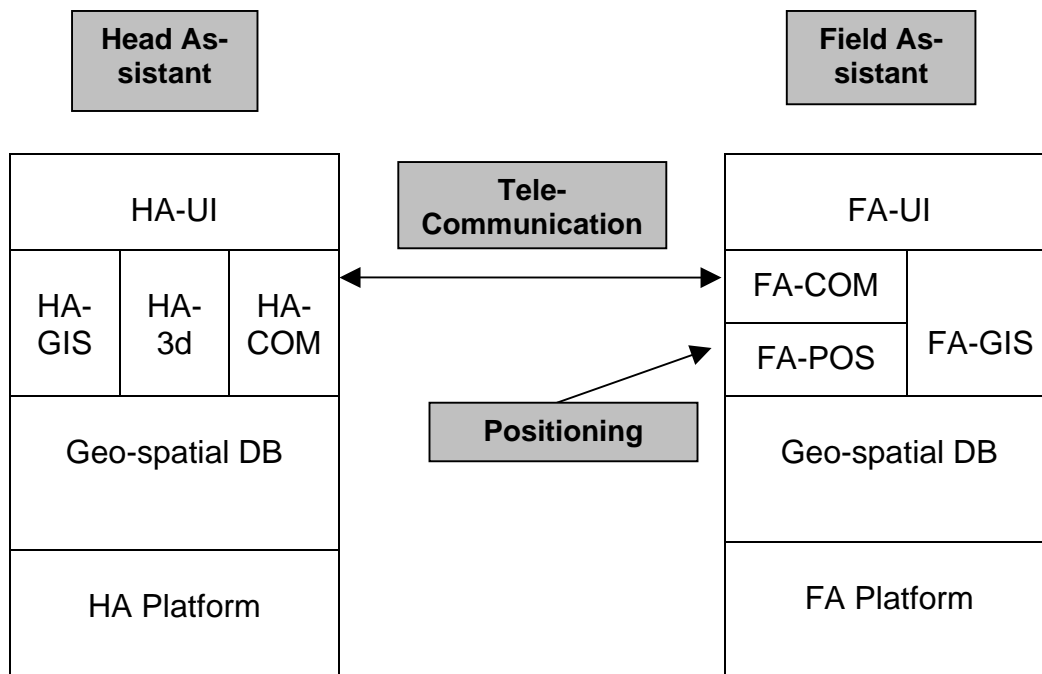


Figure 2: Components of the SAR LAND Mission Support Tool

A communication interface provides the 3d-visualisation application with current positioning information of the field teams, to allow an intuitive display and monitoring of all moving items. In addition to this, voice- and text-messages can be exchanged to ease important coordination tasks. A GIS component provides GIS functionality, e.g. facilitating the generation of vector information during the planning phase (digitising of target / search areas).

The HA consists of:

2. **Platform:** This is a computing platform consisting of standard PC or notebook with at least 64 MB RAM and MS Windows (W98) operating system
3. **3d-data visualisation engine (HA-3d):** The TerraExplorer software (Skyline Software Systems) provides 3d- and map visualisation of terrain which is based on information derived from maps, EO data and a Digital Terrain Model (DTM) enhanced



with other information layers. The component allows monitoring the current positions of the field teams in virtual reality.

4. **Geographic information system engine** (HA-GIS): The HA-GIS (ESRI ArcView / ArcExplorer) is in charge of the following tasks: Display of map information, overlay of different information layers.
5. **Telecommunication module** (HA-Com): Standard GSM device and C&N software enable communication with the FAs.
6. **User interface** (HA-UI)
7. **Geo-spatial Database**

### 3.2 Field Assistant (FA)

The basic functionality of the FA is related to

- positioning – i.e., position determination of the field team or rescuer,
- visualisation of the operation area together with the position/area of the target and of the respective field team using a standard GIS,
- position data transmission to the HA during the SAR operation,
- exchange of text messages with the HA and voice communication with the HA.

The FA consists of:

8. **Platform**: This is a pocket PC operating Windows CE (Compaq iPAQ H3660)
9. **GIS engine** (FA-GIS): The FA-GIS (ESRI ArcPad) provides a display of map information and Earth observation / aerial imagery plus location information of own position and the position of the target or search area
10. **Telecommunication module** (FA-Com): The communication component (C&N switchbox and standard GSM device) provides all required telecommunication services with the HA.
11. **User interface** (FA-UI)
12. **Geo-spatial Database**
13. **Positioning module** (FA-Pos): The positioning component generates up-to-date positioning information for the FA. GPS was selected to be the positioning system of choice for the FA because GPS offers a proved functionality and is the most used position determination system worldwide. For GPS applications, standards and interfaces are established, e.g., for mapping purposes.

### 3.3 Communication

GSM has been selected for the operation-related telecommunication task, because GSM may be used for voice communication, text messaging, and (to a minor extent) for mass data transmission and, thus, provides all types of communication required for current and future SAR operations. In addition GSM is a fairly wide-spread system. Thus in the Austrian and German parts of the Alps, the GSM network covers more than 80% of the territory.

### 3.4 Geo-spatial database

The geo-spatial database provides the essential content to the mission support tool. Table 2 gives details on the data and information layers contained in the database. The data are pre-processed and georeferenced to a common reference system (Gauß-Krüger, Bessel, Potsdam, 12°E). For ease of handling and also to cope with the memory limitations of current pocket PCs, large raster datasets are used in compressed form (MrSID wavelet compression).

**Table 2: Overview of geo-spatial database**

<b>Data type</b>	<b>Data source</b>	<b>Remarks</b>
<b>EO / Aerial imagery</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aerial imagery (b/w, BLVA)</li> <li>• IRS-LISS (Euromap)</li> </ul>	Data acquisition between 1998 and 2000. Geometr. resolution up to 0.4m
<b>DEM data</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ERS-Tandem data</li> <li>• MonaPro DEM</li> </ul>	Digital elevation model (raster). Geometr. resolution up to 25m,
<b>Map data</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Digital topographic map (TK 25, BLVA)</li> <li>• Annotated image map (derived from IRS)</li> </ul>	information on <ul style="list-style-type: none"> <li>- trails,</li> <li>- access roads,</li> <li>- mountain cabins, etc.</li> </ul> Used as 2D raster map reference and for digitising of vector layers.
<b>Ancillary data</b>	Various sources (Internet, tourist and hiking maps, verbal communication...)	additional information on trails, access roads, mountain cabins, specific landmarks, GSM coverage etc.
<b>Dynamic Positioning data</b>	Generated from GPS in Field Assistant	Position data from the field teams.

## 4 First Experiences and Outlook

Compared to today's SAR operation the use of the mission support tool offers the following advantages:

- realistic terrain visualisation
- synoptic display of information and data at mission headquarter
- precise positioning information and map / aerial imagery background for the field teams (independent from local knowledge and weather conditions).
- constant monitoring of field team positions and activities at mission headquarter
- integrated solution for communication, localisation, navigation and geoinformation

In Figure 3 the user interface and some of the capabilities of the Head-Assistant are presented. The mission support tool will now be validated in the area around Oberstdorf together with Bavarian Mountain Rescue. Its geodatabase comprises the whole area of responsibility of the operating unit in Oberstdorf. The validation will be controlled and guided by the use cases as discussed above. Currently implemented is a functional but still preoperational demonstrator fully based on existing COTS technology. A fully operational tool will require further development and refinement, especially with respect to improvements in accuracy, reliability and sturdiness.

## 5 Acknowledgements

The project is funded through the European Union, Astron Programme, Applications on the Synergy of Telecommunications, Earth Observation and Navigation, Contract No. 17175-2000-F1SC ISP DE. The content of the publication is the sole responsibility of its authors and in no way represents the views of the European Commission or its services. We would like to thank the local operating unit of the Bergwacht Bayern in Oberstdorf for their continuous support. IRS satellite imagery has been provided free of charge by Euromap, Neustrelitz. The support of Ingrid Wenninger (GAF), Wolfgang Lechner and Stefan Baumann (TeleConsult Austria) is acknowledged.

**Figure 3: SAR Mission Support Tool - Head Assistant:** it offers real-time and interactive 3D-terrain visualisation and exploration (large window). The positions of field teams are displayed and regularly updated. If required, 2D aerial/satellite imagery or maps can be displayed as reference (left window) and additional information like trails, locations of mountain cabins, etc. can be superimposed.



# VISPA – Virtual Sport Assistant

FLORIAN SAYDA<sup>1</sup>, ELMAR WITTMAN<sup>2</sup>

*Positionsbezogene Dienste oder auch ‚Location Based Services‘ (LBS) werden als eine der zukünftigen Anwendungen im Mobilfunkbereich gesehen an denen großer Bedarf bestehen wird. Im Rahmen des VISPA Projektes wird ein Prototyp für einen mobilen positionsbezogenen GI Service für Bergwanderer bzw. Bergsteiger entwickelt. Im wesentlichen soll der Nutzer durch verschiedene Funktionalitäten bei der Wegfindung im alpinen Gelände unterstützt werden. Das Ziel hierbei ist es den Nutzer vor gefährlichen Situationen zu bewahren, oder ist er bereits in eine solche geraten auf dem sichersten Weg herauszuführen. Im Folgenden wird sowohl die Systemarchitektur als auch die Kernfunktionalitäten von VISPA erläutert. Weiterhin werden der mobile Klient, der Aufbau des Servers und der genutzte Datenbestand beschrieben.*

## 1. Einleitung

Durch die allgemeine Verfügbarkeit und einfache Handhabung neuer Technologien wie Internet, mobiler Kommunikation, Geoinformationssysteme (GIS) und tragbarer elektronischer Geräte (Laptop, PDA) hat sich eine neue Möglichkeit an Informationen zu gelangen entwickelt, die sogenannten, orts- oder positionsbezogenen Dienste auch bekannt als ‚Location Based Services‘ (LBS).

Die Hauptinformation auf die diese Anwendungen aufbauen ist die Position des jeweiligen Dienstnutzers. Es gibt eine Reihe von Ansätzen, wie diese Information gewonnen werden kann. Eine einfache Möglichkeit ist, den Nutzer seine Position interaktiv bestimmen zu lassen, zum Beispiel durch Angabe von Ort, Strasse und Hausnummer. Dies würde die Anwendungsmöglichkeiten der Location Based Services jedoch stark einschränken, da in vielen Fällen dem Nutzer seine eigene Position nicht hinreichend genau bekannt ist. Deshalb werden zur Positionsbestimmung andere automatische Verfahren eingesetzt. Hierbei wird vor allem GPS, aber auch die Möglichkeit der Positionsbestimmung innerhalb der Mobilfunknetze genutzt.

Dienste, die Positionen eines Nutzers verwenden um Informationen bezüglich dieser Positionen zu ermitteln, lassen sich in 2 Kategorien einteilen. Zum einen können Informationen auf Anfrage bereit gestellt werden (‚pull services‘). Zum anderen können dem Nutzer auch Informationen ohne direkte Anforderung übermittelt werden (‚push services‘). Dies können zum Beispiel Dienste sein, die Nutzer über Gefahren informieren, wenn sie sich in einem bestimmten Gebiet befinden.

Bei dem im Folgenden beschriebenen LBS (Virtual Sports Assistant-VISPA) handelt sich um einen Service für Bergsteiger. Er stellt eine Reihe von Informations-, Routing- und Navigationsdiensten zur Verfügung. Das gesamte Projekt ist auf einen Zeitraum von 8 Monaten angelegt und hat im Februar 2001 begonnen. Dieser Bericht spiegelt den Stand des Projektes Ende Juni 2001 wieder.

---

<sup>1</sup>Florian Sayda, Arbeitsgemeinschaft GIS, Universität der Bundeswehr München, 85577 Neubiberg, e-mail: [florian.sayda@unibw-muenchen.de](mailto:florian.sayda@unibw-muenchen.de)

<sup>2</sup>Elmar Wittman, IfEN Gesellschaft für Satellitennavigation mbH, Hauptstr. 37, 85579 Neubi-  
berg, e-mail: [E.Wittmann@ifen.com](mailto:E.Wittmann@ifen.com)

## 2. Systemüberblick

Das Projekt VISPA wird im Rahmen des ASTRON Programms der Europäischen Union durchgeführt und vom EC Joint Research Center (JRC) finanziert. Die VISPA Entwicklung führt ein Konsortium bestehend aus der IfEN GmbH (Koordinator) und der Arbeitsgemeinschaft GIS (AGIS) der Universität der Bundeswehr München durch. Unterstützt wird das Projekt in der Definitions- sowie in der Testphase vom Deutschen Alpen Verein (DAV).

### 2.1. Service Beschreibung

Bergwandern bzw. Bergsteigen ist eine der Hauptsportarten in alpinen Regionen. Diese Freizeitaktivität stellt hohe Anforderungen an Kartenmaterial, Positionierung und Navigation. Hier soll VISPA einen Beitrag zur Sicherheit von erfahrenen, besonders jedoch von unerfahrenen Bergwanderern leisten.

Im Rahmen des Projektes wird ein Prototyp des gesamten Systems für ein Testgebiet von ungefähr 30kmx30km entwickelt. VISPA soll dem Nutzer helfen folgende Fragstellungen zu beantworten:

- Wo bin ich?
- Welche Ziele stehen mir zur Verfügung?
- Wie gelange ich an ein bestimmtes Ziel?

Weiterhin unterstützt VISPA den Nutzer in verschiedenen Situationen wie:

- Ich habe den Weg verloren. Wie komme ich dorthin zurück?
- Ein Unwetter zieht auf. Wo ist die nächste Schutzhütte?

VISPA besteht aus zwei wesentlichen Komponenten. Zum einen aus der mobilen Komponente (TourGuide) auf Basis eines Pocket PCs, verbunden mit einem GPS Empfänger, einem digitalen Kompass und einem GPRS fähigen Mobiltelefon, mit dem die Kommunikation mit der zweiten Komponente, dem ‚Personal Information and Navigation Assistant‘ (PINA-Server), ermöglicht wird. Dieser stellt den Service Provider des Systems dar, welcher die Anfragen des Nutzers bearbeitet und die entsprechenden Ergebnisse an den Client übermittelt.

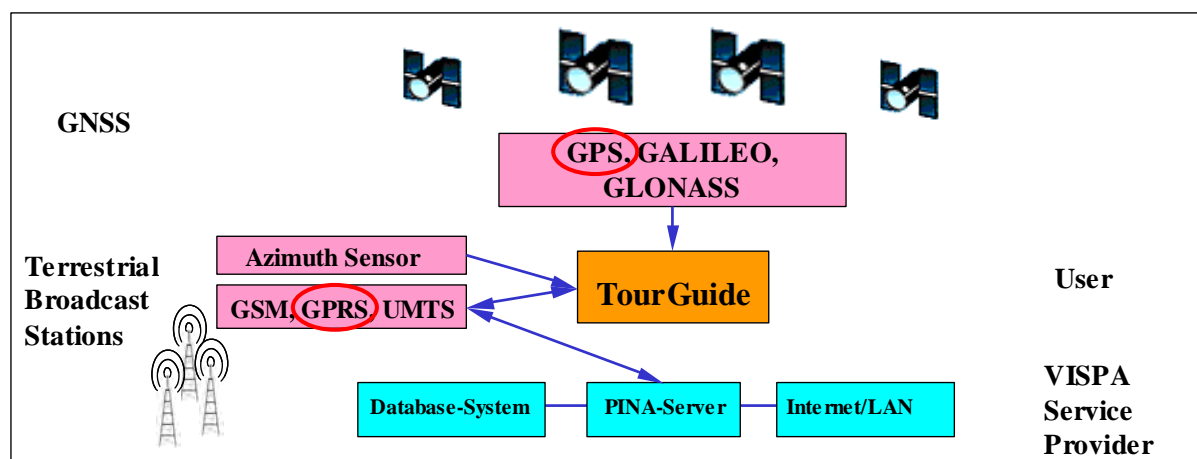


Abb. 1: VISPA System Aufbau

Der TourGuide wird vom Benutzer stets mit geführt, wobei seine aktuelle Position mit Hilfe des GPS Empfängers bestimmt wird. Eine Positionsgenauigkeit von 5-20 m kann erreicht werden, da die künstliche Verschlechterung (selective availability SA) der GPS Signale im Mai 2000 abgeschaltet wurde. Unter Verwendung des GPRS Mobiltelefons können die in folgendem Kapitel erläuterten Dienste genutzt werden.

## 2.2. Kernfunktionalitäten

Folgende Geoinformationen können vom PINA Server auf Anfrage bezüglich der aktuellen Position des Nutzers angefordert werden:

- Karte der Umgebung:  
Auf Anfrage werden topographische Karten in verschiedenen Maßstäben der Umgebung des Nutzers bereitgestellt. Die Position des Nutzers wird in der entsprechenden Karte angezeigt.
- Points of interest (POI):  
Für Bergwanderer relevante Punkte wie Gipfel, Schutzhütten oder auch Liftstationen in der Umgebung des Nutzers können vom PINA Server angefordert werden.
- Zusätzliche Informationen zu Points of interest:  
Weiterhin stellt der Server zu jedem POI weitere Informationen, wie zum Beispiel Öffnungszeiten von Hütten oder deren Telefonnummer, bereit.
- Routing:  
Dem Nutzer werden Routing Funktionalitäten für folgende Anwendungsfälle bereitgestellt. Als Ergebnis der Routenplanung wird jeweils eine Anzahl von Wegpunkten an den Client übermittelt. Der Client kann die vorgeschlagene Route in der entsprechenden Karte darstellen und den Nutzer entlang der Wegpunkte zum Ziel führen.
  1. Der Nutzer wählt einen der POIs als Zielpunkt aus. Der Server errechnet die entsprechende Route zum gewünschten Zielpunkt.
  2. Gerät der Bergwanderer in eine kritische Situation (z.B Erschöpfung, Unwetter) kann er vom PINA Server den kürzesten Weg zur nächsten Hütte anfordern.
  3. Kommt der Nutzer vom Weg ab, kann er seine aktuelle Position an den Server übermitteln, um eine entsprechende Route zurück zum verlorenen Weg zu erhalten.
- Bild des umgebenden Geländes basierend auf DGM Daten (,3D-Bilder')  
Um dem Nutzer die Orientierung im Gelände zu erleichtern, werden nicht nur herkömmlich Karten zu Verfügung gestellt, sondern auch gerenderte perspektive Ansichten des Geländes basierend auf DGM Daten. Auf die Oberfläche des DGM wird zusätzlich eine Textur in Form einer topographischen Karte oder Luftbildes und/oder die vorgeschlagene Route aufgebracht. Als Standpunkt wird jeweils die Position des Nutzer verwendet, die Blickrichtung wird mittels des digitalen Kompasses ermittelt. Im Folgenden werden die Bilder welche als Ergebnis dieses Rendering-Prozesses entstehen als ,3D-Bilder' bezeichnet.

Generell dienen die Informationen, welche vom PINA Server übermittelt werden, dazu dem Nutzer die Orientierung in seiner Umgebung zu erleichtern. So kann zum Beispiel die Richtung zum nächsten Wegpunkt der vorgeschlagenen Route ermittelt werden. Unter Verwendung der Daten des digitalen Kompasses kann sich der Nutzer entsprechend orientieren, bis seine aktuelle Blick- bzw. Bewegungsrichtung mit der Richtung zum nächsten Wegpunkt übereinstimmt.

### 2.3. Modellbeschreibung

Abb. 2 zeigt den Aufbau von VISPA mit den beiden Hauptkomponenten ‚Mobile Device‘ (TourGuide) und dem ‚PINA Server‘. Der Mobile Client wählt sich mittels GPRS bei einem Internet Provider ein. Sobald diese Verbindung hergestellt ist kann er mittels http-Protokoll die entsprechenden Anfragen an den Server übermitteln. Bei der Definition der Schnittstellen zwischen Client und Server werden folgende Spezifikationen eingesetzt:

- OpenGIS Web Map Server Interface Implementation Specification
- Geography Markup Language

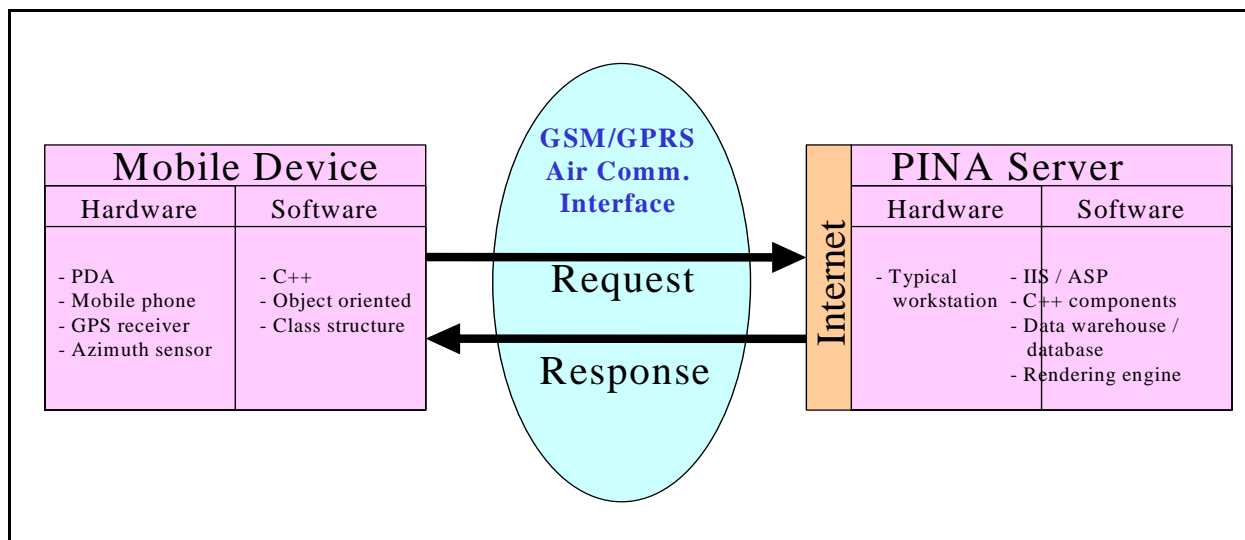


Abb. 2: Logisches Modell

### 3. Mobile Client: Hardware und Software Architektur

Grundsätzlich besteht eine Vielzahl von Möglichkeiten für die Hardware-Konfiguration des mobilen Gerätes: Als Benutzer-Terminal bieten sich Notebooks, Handheld PCs und PDAs (Personal Digital Assistants) an. Da es ein Ziel des VISPA-Projekts ist, ein möglichst kompaktes und einfach zu bedienendes mobiles Gerät für Bergsteiger zu entwickeln, wurde als „Herzstück“ der mobilen Einheit ein PDA gewählt. Für die Kommunikation mit dem Server wird ein GPRS-fähiges Handy benötigt. Zur Zeit (Juni 2001) sind allerdings noch sehr wenige Modelle auf dem Markt erhältlich.

GPS Empfänger sind sowohl als separate Geräte mit Anschlussmöglichkeit über die serielle Schnittstelle als auch als Module in Form von PC-Karten oder Compact Flash Karten erhältlich.

Die folgende Abbildung zeigt eine Übersicht grundsätzlich möglicher Hardware-Komponenten und ihrer Schnittstellen.

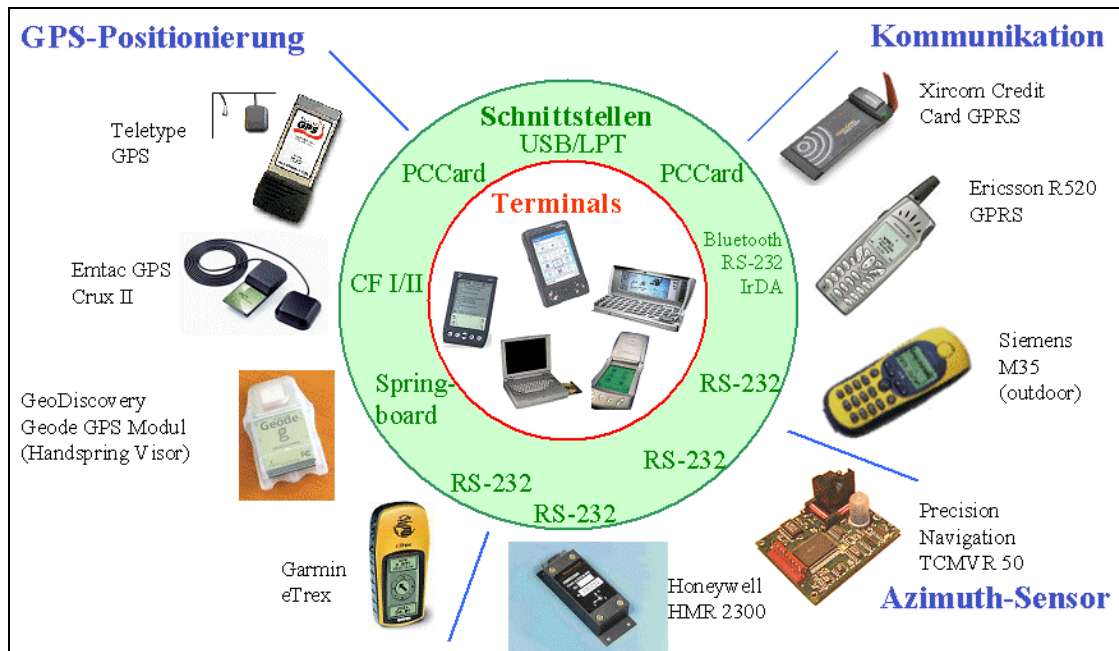


Abb. 3: optionale HW-Komponenten

### 3.1. Konfiguration des VISPA TourGuide

Die verwendeten HW-Komponenten für den TourGuide sind in der folgenden Abbildung zusammengestellt.



Abb. 4: HW-Konfiguration des TourGuide



### **3.1.1. Detaillierte Beschreibung der Hardware**

#### **Terminal: Pocket PC Compaq iPAQ 3660**

Der iPAQ 3660 von Compaq ist ein leistungsfähiger Pocket PC mit Touchscreen (Auflösung: 240 x 320 Pixel). Der eingebaute Umgebungslichtsensor passt das farbige TFT-Display (4096 Farben) automatisch den vorherrschenden Lichtverhältnissen an, wodurch selbst bei grellem Sonnenschein das Display gut ablesbar bleibt.

Das Betriebssystem des iPAQ ist Windows für Pocket PC (Windows CE 3.0).

Der iPAQ 3660 bietet folgende Schnittstellen:

Der IrDA-Port dient als Schnittstelle zur Kommunikationseinheit (→ Handy), der Compact Flash-Einschub (am 'CF-Jacket' Erweiterungspack) nimmt die Navigationseinheit auf. Der Richtungsgeber wird über die serielle RS-232 Schnittstelle an den Pocket PC angeschlossen.

#### **Kommunikationseinheit: Handy Motorola Timeport 260**

Das Timeport 260 ist ein GPRS-fähiges 3-Band Handy mit drei GPRS-Downlinkkanälen. Die Verbindung zum Pocket PC wird über die Infrarotschnittstelle hergestellt.

#### **Navigationseinheit: EMTAC Crux II GPS Receiver Card**

Die Crux II Karte ist ein 12-Kanal GPS-Empfänger im Compact Flash Format und kann direkt in den Compact Flash Slot des iPAQ CF-Jacket eingeschoben werden. Durch die Fähigkeit, WAAS/EGNOS-Signale zu verarbeiten, ist eine Steigerung der Positionsgenauigkeit möglich.

#### **Richtungsgeber: IfEN/TCM 50 Azimuth Sensor**

Die richtungsgebende Einheit basiert auf dem digitalen Azimuth-Sensor TCM 50 von Precise Navigation und wurde von der IfEN-GmbH montiert. Der Kompass weist eine Neigungskompensation für Neigungen bis zu 50° auf. Die Azimut-Werte werden im NMEA-0183 Standard ausgegeben, ihre Genauigkeit beträgt ca. 3 – 5°. Zur Verbindung mit dem Pocket PC verfügt der Kompass über eine RS-232C Schnittstelle.

## **3.2. Software für den Mobile Client**

Zur Entwicklung der Software wird die Entwicklungsumgebung MS embedded Visual C++ 3.0 zusammen mit dem MS Pocket PC 3.0 Software Development Kit eingesetzt. Diese Entwicklungsumgebung weist weitgehend dieselbe Benutzer-Oberfläche wie das Standard-Paket MS Visual C++ auf und ermöglicht es, mit dem Emulator einen Pocket PC auf dem Desktop PC zu simulieren.

Vier SW-Hauptkomponenten werden für den Mobile Client entwickelt:

- User Interface: zur Ausführung von Visualisierungs-Aufgaben, Weiterleitung von Benutzereingaben etc.
- Communication Interface: zur Abwicklung der Anfragen/Antworten an/vom Server; Schnittstelle zur HW-Kommunikationseinheit
- Navigation Interface: zur Decodierung der Positions- und Richtungsinformation von Navigationseinheit und Richtungsgeber

- Application Logic: zur Steuerung von Anfragen an den Server und die Verwaltung relevanter Daten (→ Kartendaten, Routing, POI Informationen etc.)

## 4. Server Architektur

Im folgenden Kapitel wird die Architektur des PINA Servers innerhalb des VISPA Projektes beschrieben. Die Hauptaufgabe des PINA Servers liegt der Bearbeitung der Anfragen des TourGuide durch Bereitstellung und Generierung entsprechender Geoinformationen.

Der Server besteht aus drei Hauptkomponenten. Dem Kommunikationsinterface, dem Modul zur Produktion der Geoinformationen sowie einem Data Warehouse. In Abhängigkeit der Anfrage und der Position des Nutzers werden die entsprechenden Geoinformationen aufbereitet.

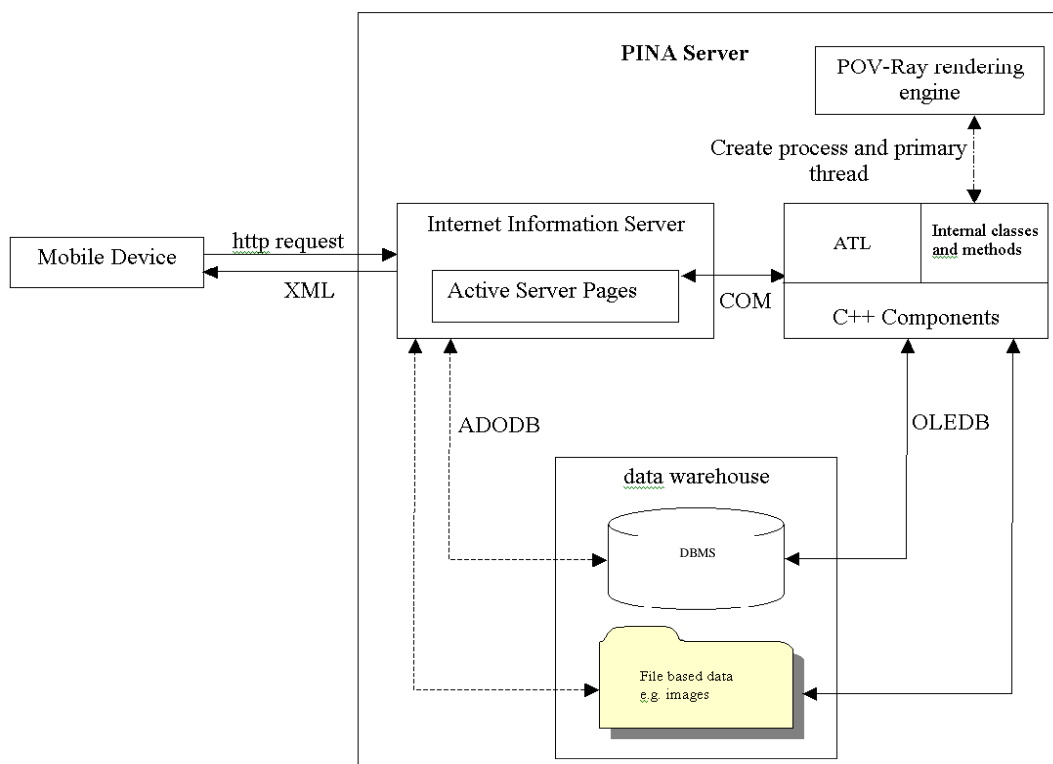


Abb. 5: Architektur des PINA Servers

Abb. 5 zeigt einen Überblick der PINA Server Komponenten, die im folgenden kurz erläutert werden.

Die Kommunikation zwischen Server und Klient basiert auf dem http-Protokoll. Als Schnittstellen werden in beide Richtungen hauptsächlich XML und GML verwendet, wobei als Schnittstellenprotokoll die Spezifikationen wie in Kapitel 2.3 beschrieben Anwendung finden.

Da es nicht möglich ist alle Funktionalitäten in Active Server Pages (ASPs) mit VBScript zu implementieren werden die Komplexeren, zum Beispiel Generierung der ‚3D-Bilder‘ des umgebenden Geländes basierend auf DGM Daten, in C++ Module implementiert. Über das Component Object Model (COM) können diese Module direkt von den ASPs aufgerufen werden.

Eine weitere Hauptkomponente des PINA Servers ist das Data Warehouse. In ihm werden sämtliche Daten die zur Produktion der Geoinformationen benötigt werden vorgehalten. Je nach Art der Daten werden sie auf verschiedene Weise abgelegt. Rasterdaten, z.B. gescannte Karten, werden in einer Dateistruktur gespeichert. Vektordaten, z.B. das Wegenetz, werden in einem Datenbankmanagementsystem (DBMS/RDBMS) abgelegt.

Die folgenden Daten werden in VISPA genutzt:

- DGM  
Ein digitales Geländemodell mit einer Auflösung von 1" (30.9m) dient als Grundlage für die Erstellung der ‚3D Bilder‘ (siehe Kapitel 2.2).
- Gescannte Karten  
Die gescannten topographischen Karten liegen in einer gekachelten Struktur vor. Sie werden benutzt, um dem Nutzer eine entsprechende Karte seiner Umgebung übermitteln zu können. Weiterhin dienen sie als Textur für das DGM.
- Wegenetz  
Um die Routing-Funktionalität implementieren zu können, liegt für das Testgebiet ein Wegenetz in einer entsprechenden Knoten - Kanten Struktur vor.

## 5. Zusammenfassung

Die beiden folgenden Abbildungen zeigen zwei Beispiele die in einer frühen Phase des Projektes entstanden sind. Abb. 6 a zeigt eine konventionelle topographische Karte. Abb. 6 b zeigt ein Beispiel für ein ‚3D Bild‘ mit einer topographischen Karte und einem Routenvorschlag als Textur.

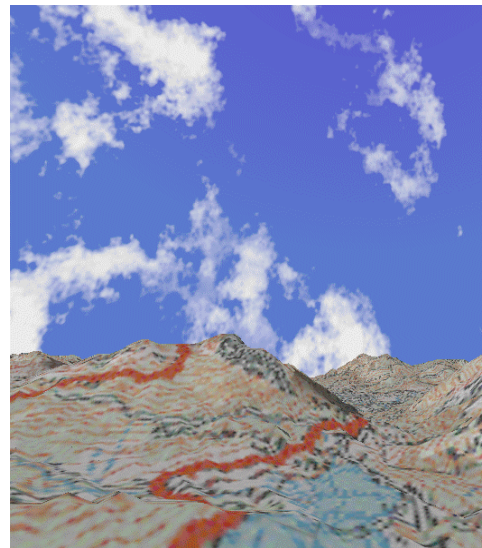
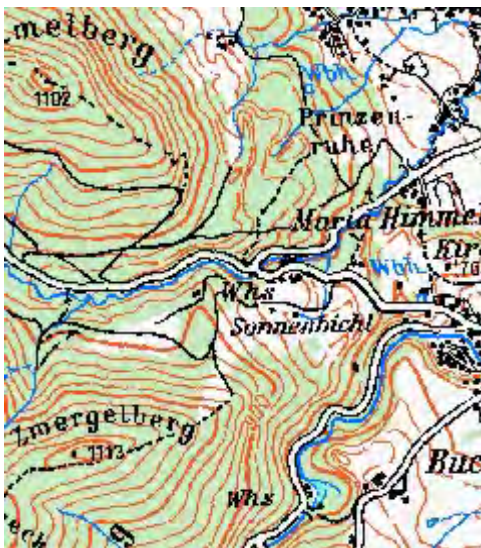


Abb. 6 a,b: Topo. Karte; ‚3D Bild‘

Während der Umsetzung des Projektes haben sich bis zum jetzigen Zeitpunkt zwei Hauptprobleme herauskristallisiert. Zum einen gestaltet sich die Integration der einzelnen Hardwarekomponenten (PDA, GPS-Empfänger, Mobiltelefon, Digitaler Kom-

pass) recht schwierig. Dieses Problem wird sich jedoch in Zukunft durch die Verfügbarkeit sogenannter ‚smart phones‘, die PDA und Mobiltelefon integrieren, vereinfachen. Zum anderen konnten die vom Provider angekündigten Übertragungsraten von GPRS während der Tests nicht ganz erreicht werden.

## **6. Danksagung**

Die Autoren bedanken sich für die Unterstützung und Kooperation beim European Commission Joint Research Center (JRC) in Ispra/Italien, welches das VISPA Projekt finanziert. Weiterhin möchten die Autoren dem Deutschen Alpen Verein (DAV) für das eingebrachte Fachwissen auf dem Gebiet des Bergwanderns und Bergsteigens und die Unterstützung während der Testphase danken.

# Telelearning-Module für die Aus- und Weiterbildung in Fernerkundung und Photogrammetrie

JOCHEN SCHIEWE<sup>1</sup>

*Zusammenfassung: Der integrative Einsatz computer-unterstützter Lehrmethoden wird als Mittel zur Steigerung der Effizienz der Bildungsarbeit sowie als Qualitätsmerkmal auf dem Bildungsmarkt angesehen. In diesem Kontext wird eine Recherche über vorhandene Telelearning-Module für die Gebiete Fernerkundung und Photogrammetrie durchgeführt und eine eigene Tutorial-Entwicklung zur photogrammetrischen Höhenauswertung vorgestellt.*

## 1 Einführung

Trotz des international gesehen hohen Bildungsstandards in Deutschland wird die **Notwendigkeit zur Reform** bildungspolitischer Rahmenbedingungen von allen Beteiligten des Bildungsprozesses mit unterschiedlichem Nachdruck betont. Zur Begründung werden Erscheinungen wie der Mangel an qualifizierten Arbeitskräften (z.B. Computerexperten), die stagnierende Quote der Universitätsabschlüsse bzw. der Anstieg der Abbrecherquoten (z.B. Informatik 60%, Mathematik 70%) sowie die Gefahr der sozialen Ausgrenzung aufgrund eines geringen Bildungsniveaus angeführt. Aus dieser Notwendigkeit heraus ergeben sich eine Reihe von **Reformzielen**:

- Im Mittelpunkt steht die Steigerung der *Effizienz* der Bildungsarbeit sowie deren *didaktischen Qualität*. Dies ist insbesondere vor dem Hintergrund einer sogenannten "Lehre-Schere" zu sehen, die den Konflikt zwischen dem abwachsenden und schnell veraltenden Lernstoff - in Form von Fachwissen und Sekundärqualifikationen - einerseits, sowie den konstanten, wenn nicht sogar geringer werdenden Zeitressourcen für den Lehrbetrieb andererseits beschreibt.
- Um insbesondere den immer kürzer werdenden Halbwertszeiten des Wissens sowie der Auflösung bzw. dem Bedeutungsverlust bisheriger Berufsinhalte Rechnung zu tragen, sind zum einen *inhaltliche und methodische Umstellungen* in der Ausbildung, zum anderen Anleitungen zum *lebenslangen Lernen* (d.h. eine Intensivierung der Weiterbildungs-Komponente) notwendig. Exemplarisch für den inhaltlichen Wandel im Kontext der Fernerkundungs- und Photogrammetrie-Ausbildung sei auf den Trend zur Automation durch die Bildverarbeitung sowie die Hinwendung zu Multi-Sensor- und Multi-Daten-Systemen verwiesen (ACKERMANN, 1998). Aus methodischer Sicht wird zu Recht eine strikte Modularisierung des Bildungsangebotes gefordert (ASCHENBERNER ET.AL., 2000).
- Schließlich verlangt die immer stärker werdende Konkurrenz auf dem nationalen und internationalen Bildungsmarkt einerseits, sowie die sinkenden Studentenzahlen insbesondere in den Ingenieurwissenschaften) andererseits, von den Bildungsanbietern eine offensive Außendarstellung, bei der nicht nur aktuelle Inhalte, sondern auch aktuelle Formen der Wissensvermittlung für einen *Imagegewinn* beitragen können.

---

<sup>1</sup> Dr.-Ing. Jochen Schiewe, Forschungszentrum für Geoinformatik und Fernerkundung, Hochschule Vechta, Postfach 1553, 49364 Vechta, e-mail: jschiewe@fzg.uni-vechta.de

Als ein wesentliches **Mittel zur Reform** der (Hochschul-)Lehre derzeit immer wieder der intensive und integrative Einsatz von computer-unterstützten Lernmethoden angeführt. Umfangreiche Fördermaßnahmen von Bund und Ländern unterstützen diese Richtung. So hat das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Jahr 2000 rund 400 Mio. DM für die Entwicklung multimedialer Lernangebote, neue Fernstudienangebote und Kombinationen mit der Präsenzlehre im Programm "Neue Medien in der Hochschullehre" aufgelegt. In Kürze soll ein Ideenwettbewerb "Virtuelle Hochschule" folgen. Auch der Ausbau des Deutschen Forschungsnetzes (DFN) auf Übertragungsraten von zunächst 2.5 GB/s unterstützt diese Maßnahmen.

Eine **Zielsetzung dieses Beitrages** besteht nun darin, die existierenden, computer-unterstützten Aus- und Weiterbildungsangebote im Bereich Fernerkundung und Photogrammetrie zu analysieren (Kapitel 2). Aus der Tatsache, dass der Themenkomplex Bildmessung dabei kaum oder nur peripher abgehandelt wird, wurde das Telelearning-Modul "Photogrammetrische Höhenauswertung" unter Berücksichtigung organisatorischer, didaktischer und technischer Aspekte entwickelt (Kapitel 3). Dieses Tutorial wird zum einen curricular in den Studiengang Umweltwissenschaften an der Hochschule Vechta eingebunden, zum anderen ist es aber auch jederzeit über das Internet verfügbar. Schließlich werden die Erfahrungen der Entwicklungs- und Evaluationsphase zusammengefasst und generelle Empfehlungen für eine koordinierte Nutzung künftiger computer-unterstützter Lehrangebote gegeben (Kapitel 4).

## 2 Computer-unterstützte Lehrangebote in Fernerkundung und Photogrammetrie

### 2.1 Einordnung

Der computer-unterstützte Einsatz in der Lehre ist in unterschiedlichen Formen anzutreffen. Die Angebote lassen sich grob einteilen in solche, die die klassische *Präsenzlehre ergänzen*, und solche, die die *Präsenzlehre (teilweise) ersetzen*.

Der einfachste Vertreter der Angebote, die **ergänzend zur Präsenzlehre** wirken, ist die *digitale Skriptensammlung*: Hierbei erfolgt die Dokumentation von Präsenzveranstaltungen durch Erläuterungen und die Bereitstellung von Studienmaterialien (Folien, Übungszettel und -daten), worauf entweder direkt von einem Server oder über das Internet zugegriffen werden kann. Eine weitere Ausprägung ist der *Medieneinsatz in der Präsenzlehre* in Form von Bildschirmpräsentationen (z.B. mit PowerPoint) oder integrierten Software-Schulungen (d.h. dem Wechsel von theoretischen Einweisungen und praktischen Übungen im Rechnerlabor). Im folgenden sollen diese Angebote nicht weiter betrachtet werden, für eine exemplarische Diskussion siehe auch SCHIEWE (2001).

Im Gegensatz hierzu bewirken Angebote, die die **Präsenzlehre (teilweise) ersetzen**, i.d.R. bedeutende Einschnitte aus organisatorischer, didaktischer und technischer Sicht. Auch hier lassen sich verschiedene Ausprägungen definieren:

- *Teil-virtuelle Lehrmodule* werden im Netz oder auf CD-ROM bereitgestellt, um Teile der Präsenzveranstaltung zu ersetzen oder zusätzliches Material bereitzustellen.
- *Virtuelle Lehrmodule* ersetzen komplette Veranstaltungen, sind aber in ein reguläres Präsenzstudium eingebunden.

- *Virtuelle Studiengänge* bieten nicht nur einzelne Module, sondern komplette Studien- oder Ausbildungsgänge über digital bereitgestellte Materialien an. Beispiele hierfür sind die Fernuniversität Hagen ([www.fernuni-hagen.de](http://www.fernuni-hagen.de)), die Virtuelle Hochschule Oberrhein ([www.viror.de](http://www.viror.de)) oder der Fernstudiengang UNIGIS der Universität Salzburg (bzw. der Hochschule Vechta im deutschen Raum (SCHIEWE, 2001; [www.unigis.de](http://www.unigis.de))).

In der Umsetzung treten natürlich noch Zwischenformen auf, z.B. beinhalten die virtuellen Studiengänge auch kurze verpflichtende Präsenzveranstaltungen. Bei den Angeboten, die ein räumlich und zeitlich flexibles Selbststudium ermöglichen, handelt es sich *Telelearning*-Module. Im Gegensatz hierzu erfolgt bei den *Teleteaching*-Veranstaltungen die Vermittlung durch einen entfernten Lehrer durch die Nutzung breitbandiger Telematik-Komponenten. Beim *Teletutoring* als einer zusätzlichen Form zu den beiden zuvor genannten Angeboten, die per se noch keine Kommunikationsmöglichkeiten beinhalten, erfolgt die Betreuung von Lernprozessen durch einen entfernten Tutor. Hierbei unterscheidet man zwischen synchroner bzw. asynchroner Kommunikation (Beispiele: Chats bzw. e-mails).

Da aufgrund des hohen technischen, organisatorischen und finanziellen Aufwandes Teleteaching-Veranstaltungen (zu Recht) kaum anzutreffen sind (SCHREMMER & EFFELBERG, 1999), soll im weiteren Verlauf des Beitrages eine Beschränkung auf Telelearning-Tutorials mit einem bestimmten Teletutoring-Anteil erfolgen.

## 2.2 Übersicht Telelearning-Tutorials

Im Bereich der Fernerkundung existieren eine Reihe von Telelearning-Tutorials, über die z.B. die Internationale Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung (ISPRS; [www.commission6.isprs.org/wg1/](http://www.commission6.isprs.org/wg1/)) oder CHRISTIANSEN (2001) einen Überblick geben. Generell ist festzustellen, dass es für die Bereiche Bildinterpretation und Bildtransformation bereits ein relativ gutes Angebot für den universitären und außer-universitären Einsatz gibt, wohingegen der Themenkomplex der Bildmessung kaum bzw. nur peripher abgehandelt wird.

Exemplarische Vertreter für den Bereich der Bildmessung sind die folgenden Module:

- Das internet-basierte *Radar and Stereoscopy Tutorial* des Canadian Centre of Remote Sensing (CCRS; [www.ccrs.nrcan.gc.ca/ccrs/eduref/sradar/srintro.html](http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/ccrs/eduref/sradar/srintro.html)) stellt das Thema der stereoskopischen Höhenauswertung von allen betrachteten Modulen in der größten Detailtiefe dar. Als Codierungsmöglichkeiten für die Inhalte werden hierbei vorwiegend Texte und einige statische Grafiken eingesetzt, es gibt allerdings keine Lerndialoge (d.h., Fragen und Antwortanalysen).
- Das Modul *Einführung in die Fernerkundung* der TU Berlin (KÖNIG, 2000; [www.fpk.tu-berlin.de/cbt/fernerkundung/](http://www.fpk.tu-berlin.de/cbt/fernerkundung/)) behandelt u.a. Grundzüge der Photogrammetrie sowie der stereoskopischen Auswertung. Als Codierungsformen werden gleichberechtigt Text (knapp) und Grafiken (teilweise auch animiert) verwendet, es gibt knappe Lerndialoge.
- Das nur offline nutzbare Modul *LDIPinter* (HÖHLE, 2000; [www.i4.auc.dk/jh](http://www.i4.auc.dk/jh)) der Universität Aalborg, behandelt Theorie und Praxis der automatischen Messung in digitalen Bildern. Zu jedem der fünf Themen (automatische Messung, Korrelation im Subpixelbereich, automatische Messung in Reseau-Bildern, automatische Orientierung von Luftbildern) existiert eine animierte Bildschirmseite (Grafik und Text) sowie eine komplexe Aufgabe mit knapper Antwortanalyse ("wrong" oder "correct").
- *Arpenteur* (GRUSSENMEYER & DRAP, 2000; [www.arpenteur.net](http://www.arpenteur.net)) ist ein Softwarepaket der Universität Strasbourg, das die Orientierung von Architekturbildern erklärt und praktisch durchführt. Die Erklärungs-komponente wird gegenüber der Übungskomponente zurückgestellt, ein Abfragen theoretischen Wissens erfolgt nicht.

Eine zusammenfassende Bewertung ergibt, dass aus organisatorischer Sicht für die beschriebenen Module sowohl eine curriculare Einbindung, als auch eine Nutzung zur Weiterbildung als sinnvoll erscheint. Aus technischer Sicht bauen die meisten Module auf einer HTML-Basis auf, sodass eine universale Nutzung möglich ist. Defizite gibt es vorwiegend im didaktischen Bereich: Zum einen werden die multimedialen Möglichkeiten Lehrform (d.h., der angemessene Einsatz von Texten sowie statischen und animierten(!) Grafiken) nicht ausgeschöpft. Zum anderen fehlen i.d.R. analytische Lerndialoge, die eine sofortige Lernzielkontrolle für den Studierenden ermöglichen. Schließlich sind fundierte didaktische Ansätze (z.B. ein konstruktivistischer Ansatz; KLIMSA, 1997) nicht erkennbar.

### 3 Konzeption eines Photogrammetrie-Tutorials

Die Notwendigkeit, ein eigenes Telelearning-Modul zur photogrammetrischen Höhenauswertung zu entwickeln, ergibt sich zum einen aus organisatorischen und inhaltlichen Aspekten der Geoinformatik-Ausbildung an der Hochschule Vechta, die auch stellvertretend für die Situation an anderen Hochschulen angesehen werden können (Abschnitt 3.1). Zum anderen stellten die vorhandenen Module aufgrund der beschriebenen Defizite (siehe Abschnitt 2.2) keine Lösungsmöglichkeit für den geplanten, teilweise ersetzenden Einsatz in der Präsenzlehre dar. Die entsprechenden organisatorischen, technischen sowie didaktischen Gesichtspunkte bei der Konzeption des Tutorials werden in Abschnitt 3.2 diskutiert.

#### 3.1 Rahmenbedingungen

Jährlich werden an der Hochschule Vechta ca. 20 bis 40 Studenten in den interdisziplinär ausgerichteten Diplom-**Studiengängen** Umweltwissenschaften (grundständig) und Umweltmonitoring (Aufbau) in den Disziplinen Landschaftsökologie, Raumentwicklung und Geoinformatik ausgebildet. Der Gesamtumfang der Geoinformatik-Veranstaltungen beträgt im Studiengang Umweltwissenschaften 54 Semesterwochenstunden (SWS) und im Studiengang Umweltmonitoring 24 SWS. Inhaltlich gliedert sich die Geoinformatik-Ausbildung neben Grundlagenfächern (Mathematik, Statistik) in die Bereiche Geographische Informationssysteme, Kartographie, Informatik und Fernerkundung. Neben diesem Ausbildungsangebot werden noch Weiterbildungsveranstaltungen (Präsenzkurse für GIS-Produkte sowie der Fernstudiengang "UNIGIS professional") angeboten.

Hinsichtlich der **Medienausstattung** kann in der Lehre ein Geoinformatik-Labor mit 25 Windows NT-Arbeitsplätzen eingesetzt werden. Alle Rechner erlauben die Nutzung gängiger Produkte zur Vektor- bzw. Rasterdatenverarbeitung und -analyse (z.B. ArcInfo, ArcView, Smallworld bzw. Erdas Imagine, ER Mapper) und besitzen einen Internet-Anschluss.

Die Erfahrungen der ersten 4 Jahre der Geoinformatik-Ausbildung haben typische **Probleme** des Lehr-/Lernprozesses offenbart (siehe auch Kapitel 1): Aufgrund der Interdisziplinarität sowie des parallelen Angebotes von zwei Studiengängen bestehen *heterogene Interessens- und Wissensschwerpunkte* der Studenten. Grundlagen-Veranstaltungen können aus Zeitgründen nicht ausreichend vermittelt werden und die Abfolge von Veranstaltungen hat sich in bestimmten Bereichen als nicht optimal herausgestellt. Hieraus entstehende *Wissenslücken* werden spätestens bei der Bearbeitung von Haus- oder Diplomarbeiten erkannt, wobei zu diesen



Zeitpunkten ein Nachholen des Stoffes selten realisierbar ist. Schließlich erlauben der Zeitrahmen bzw. die Personalsituation keine fachspezifischen *Wahlmöglichkeiten*.

Während computer-unterstützte Lehrangebote, die ergänzend zur Präsenzlehre wirken, bereits zum Standard der Geoinformatik-Lehre an der Hochschule Vechta zählen (siehe auch SCHIWE, 2001), werden nun auch Telelearning-Module entwickelt, die durch den teilweisen Ersatz der Präsenzlehre die beschriebenen Probleme ansatzweise lösen sollen.

## 3.2 Modul-Beschreibung

Ab dem Sommersemester 2001 wird das Telelearning-Modul "Photogrammetrische Höhenauswertung" im Rahmen der Veranstaltung "Bildinterpretation" eingesetzt, um einen Vorlesungsblock von ca. 3 mal 90 Minuten zu ersetzen. Darüber hinaus ist aber auch eine offene Nutzung möglich ([www.iuw.uni-vechta.de/personal/geoinf/jochen/photo-tutorial.htm](http://www.iuw.uni-vechta.de/personal/geoinf/jochen/photo-tutorial.htm)).

Der Konzeption des Moduls liegen folgende **Grundgedanken** zugrunde:

- Aus *inhaltlicher Sicht* bestehen die Lernziele des Moduls in der Ansammlung von deklarativem und prozeduralem Wissen zu den Themen stereoskopisches Sehen, Messen und Höhenberechnung.
- Aus *organisatorischer Sicht* erfolgt eine Einbettung des Tutorials in eine einführende Präsenzveranstaltung und eine abschließende Übung zur praktischen Anwendung der Lerninhalte. Als Erfolgskontrolle wird ein verbindlicher, schriftlicher Kurztest die o.g. Lernziele abprüfen.
- Ein Kernpunkt bei der Modulentwicklung aus *didaktischer Sicht* ist die Verwendung eines *konstruktivistischen Ansatzes*, der von der Grundidee ausgeht, dass Wissen durch einen aktiven Konstruktionsprozess des Lernenden entstehen sollte (MANDL ET.AL., 1997). Hierbei werden insbesondere verschiedener Grade und Qualitäten der äußeren Anleitung berücksichtigt, um Lerninhalte, Lernwege und Lerntempi an die individuellen Fähigkeiten und Kenntnisse des Lernenden anpassen zu können. Somit kann sowohl der Heterogenität des Wissens- und Interessenstandes der Studenten begegnet werden. Ferner sollten sogenannte *Ankerreize* (z.B. realistische Probleme und authentische Situationen) als Ausgangspunkt des Lernprozesses dienen.

Prinzipiell erfolgt eine zeitpunktunabhängige, d.h. offene Distribution des Lernstoffes, für die Veranstaltung "Bildinterpretation" wird indirekt eine getaktete Verteilung durch die terminierte Abschlussübung erzielt. Es erfolgt eine asynchrone Kommunikation zwischen Tutor und Lernenden (per e-mail), um die Ortsungebundenheit und eine Anpassung an individuelle Lerngeschwindigkeiten zu gewährleisten. Um auch eine asynchrone Diskussion innerhalb der Lerngruppe zu ermöglichen, wird der schnelle Zugriff auf eine Mailingliste, in der alle Veranstaltungsteilnehmer zusammengefasst sind, eingerichtet. In der Einführungsveranstaltung wird explizit auf dieses Angebot zum *kooperativen Lernen* hingewiesen. Abb. 1 zeigt die Umsetzung der wesentlichen genannten Elemente durch das Bildschirmdesign. Als Entwicklungswerkzeug wird ein HTML-Editor in Verbindung mit existierenden Java-Scripts eingesetzt.



Abb. 1: Telelearning-Tutorial "Photogrammetrische Höhenauswertung": Bildschirmdesign

Die Codierung der **Informationsanteile** erfolgt primär durch Texte, statische Bilder sowie selbst erstellte Animationen (zur Visualisierung dynamischer Prozesse). Auf Audioelemente wird bewusst verzichtet, da hiermit ein konstruktivistischer Ansatz behindert wird: Die Textvermittlung erfolgt fremdgesteuert, sodass keine individuelle Anpassung des Lerntempos sowie der Lertiefe möglich ist (DICK, 2000). Ferner ist durch die notwendige Nutzung von Kopfhörern ein kooperatives Lernen erschwert.

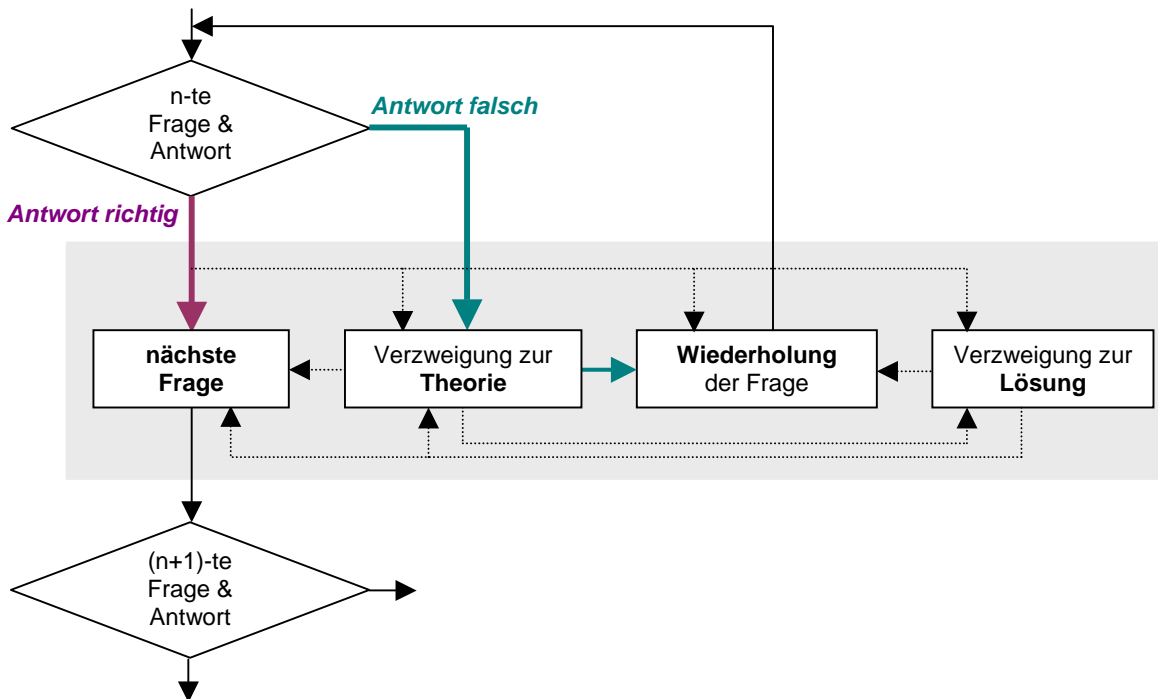


Abb. 2: Konzeption der Lerndialoge: Verzweigungs-Möglichkeiten (gestrichelte Linien) und -Empfehlungen (durchgezogen und fett) bei der Antwortanalyse

Aus didaktischer Sicht wird ein Schwerpunkt bei der Modulentwicklung auf die Gestaltung der **Lerndialoge** gelegt. Als Kompromisslösung zwischen der Minimierung der Suggestivität, der Individualisierung der Antwortanalyse und der Schaffung abwechslungsreicher Lerndialoge werden Multiple-Choice-Fragen mit einer oder mehreren Antwortalternativen sowie Objektmarkierungen (als graphischer Pendant zu Multiple-Choice-Fragen) eingesetzt. Bei der Antwortanalyse ist eine summarisch-globale Rückmeldung ("richtig" oder "falsch") weniger hilfreich - aufgrund der großen Anzahl von Antwortalternativen oft aber nicht zu vermeiden. Im Kontext des konstruktivistischen Ansatzes besteht ferner der Zwiespalt zwischen fremdbestimmter Wegadaptivität und selbstbestimmtem Lernen. Als Kompromiss bieten sich Verzweigungs-Empfehlungen an (siehe Abb. 2).

Die *Evaluation* des Moduls erfolgt neben der verpflichtenden schriftlichen Lernzielkontrolle durch einen Fragebogen, der die Erfahrungen der Nutzer insbesondere hinsichtlich der organisatorischen und didaktischen Aspekte erkunden soll.

## 4 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Die Einführung computer-unterstützter Lehrangebote in der Aus- und Weiterbildung wird von einem Netzwerk von Einflussfaktoren beeinflusst: Neben inhaltlichen, didaktischen, technischen und organisatorischen Aspekten sind nicht zuletzt wirtschaftliche Faktoren von Bedeutung. Es ist zu erwarten, dass im Zuge der Globalisierung des Bildungsmarktes computer-unterstützte Lehrangebote in Kürze als national und international wertvolle Ware angesehen werden können. Umgekehrt müssen sich einheimische Hochschulen auf den Wettbewerb mit ausländischen (insbesondere US-amerikanischen) Lehrangeboten einstellen.

In diesem Kontext und mit der Zielsetzung, die Geoinformatik-Aus- und Weiterbildung effektiver und qualitativ besser zu gestalten sowie einen Image-Gewinn für die betreffende Hochschule zu erlangen, ist auch im Bereich Fernerkundung und Photogrammetrie die Konzeption, Implementierung und Evaluation computer-unterstützter Lehrangebote voranzutreiben. Eine exemplarische Realisierung hierfür wurde mit dem am FZG Vechta entwickelten Modul "Photogrammetrische Höhenauswertung" vorgestellt.

Aus externen und eigenen Erfahrungswerten lassen sich bereits wesentliche Schlussfolgerungen für künftige Entwicklungen computer-unterstützter Lehre ableiten:

- Eine bedeutende Steigerung der Effizienz der Bildungsarbeit ist insbesondere durch solche computer-unterstützten Lehrangebote zu erwarten, die die *Präsenzlehre teilweise ersetzen*, wobei die Präsenzveranstaltungen in der Ausbildung (weniger in der Weiterbildung) weiter die zentrale Rolle spielen sollten.
- Die nachhaltige Einführung der neuen Angebote erfordert *organisatorisch-strategische Voraussetzungen*, die insbesondere von den Hochschulen selbst geschaffen werden sollten (KERRES, 2001).
- Um Mehrfachentwicklungen zu vermeiden bzw. Mehrfachnutzungen zu ermöglichen, ist eine strikte inhaltliche *Modularisierung* der Tutorials anzustreben.
- Da zu erwarten ist, dass in Zukunft ein heterogenes Tutorial-Angebot entstehen wird, erscheint die Schaffung eines übergeordneten, *virtuellen Eingangsportals* sinnvoll, um

die Chance einer übergreifenden Nutzung zu wahren bzw. einen Überblick anzubieten. Es ist zu diskutieren, ob die Deutsche Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung ein solches Angebot bereitstellen kann.

- Die Einführung computer-unterstützter Lehrangebote, die die Präsenzlehre teilweise ersetzen, ist mit einem sehr hohen Initialisierungsaufwand verbunden. Um diesen Aufwand zu reduzieren, sollte eine möglichst deutliche Trennung zwischen der Entwicklung von Inhalten (sog. *Content* - in diesem Fall durch Fernerkundungs- und Photogrammetrie-Fachleute) und Benutzerumgebungen (sog. *Lehr-/Lernplattformen*) erfolgen.
- Um das erweiterte didaktische Potenzial der neuen Lehrangebote hinsichtlich Multimedialität, Multimodalität und Interaktivität auch zielgerichtet einzusetzen, ist eine intensivere Zusammenarbeit mit Didaktikern zwingend notwendig.

## 5 Literaturverzeichnis

- ACKERMANN, F. (1998): Photogrammetrie im Wandel – Neue Anforderungen an das Hochschulstudium. *Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation*. (2): 69-79.
- ASCHENBERNER, P., HARBECK, R., MEIBNER, W. & WINTGES, T. (2000): Zur Zukunft der Kartographie. *Kartographische Nachrichten*. **50**(6): 253-258.
- CHRISTIANSEN, T. (2001): Fernerkundungstutorials im Internet. *GIS - Geo-Informationssysteme*. (3):8-12.
- DICK, E. (2000): *Multimediale Lernprogramme und telematische Lernarrangements*. Verlag Bildung und Wissen.
- GRUSSENMEYER, P. & DRAP, P. (2000): Teaching architectural photogrammetry on the web with arpenteur. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*. **33**(B6): 102-109.
- HÖHLE, J. (2000): The use of CAT/CAL programs for image processing and remote sensing in distance learning. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*. **33**(B6): 137-144.
- KERRES, M. (2001): Neue Medien in der Lehre - Von der Projektförderung zur systematischen Integration. *Hochschulentwicklung/-politik*. (2):38-44.
- KLIMSA, P. (1997): Multimedia aus psychologischer und didaktischer Sicht. in: Issing, L.J. & Klimsa, P. (hrsg): *Information und Lernen mit Multimedia*, 2. Aufl., Beltz Psychologie Verlags Union: 7-24.
- 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.
- MANDL, H., GRUBER, H. & RENKL, A. (1997): Situiertes Lernen in multimedialen Lernumgebungen. in: Issing, L.J. & Klimsa, P. (hrsg): *Information und Lernen mit Multimedia*, 2. Aufl., Beltz Psychologie Verlags Union: 167-178.
- SCHIEWE, J. (2001): *Geoinformatik-Ausbildung durch Telelearning - Anwendungsbeispiele aus der Hochschule Vechta*. Materialien Umweltwissenschaften Vechta (in Vorbereitung).
- SCHREMMER, C. & EFFELBERG, W. (1999): *Multimediales TeleSeminar*. Proceedings der Fachtagung "Lehren und Lernen mit neuen Medien", Hildesheim: 35-42.

# Diskussion eines Konzeptes zur Methoden-Kopplung für die Auswertung von Fernerkundungsdaten

JOCHEN SCHIEWE<sup>1</sup>

*Zusammenfassung: Sowohl die Anzahl als auch die Komplexität der beteiligten Software-Komponenten im Rahmen von Fernerkundungs-Auswertungen steigen ständig an. Hiermit ergibt sich die Notwendigkeit einer effektiven Integration der Komponenten. Exemplarisch werden typische Problembereiche konventioneller Verfahrensweisen aufgezeigt und konzeptionelle Lösungsansätze aus dem Bereich des Software-Engineerings für zeitnahe wie auch zukünftige Realisierungen diskutiert.*

## 1 Einführung

Fortschritte in der Datenerfassung und -verarbeitung wirken bekanntlich auch als Katalysatoren für die Entwicklung integrierter Auswertansätze zwischen benachbarten Disziplinen (z.B. Fernerkundung, Photogrammetrie, Kartographie und GIS; siehe z.B. EHLERS, 1993). Aber auch intra-disziplinär erhält eine integrative Sichtweise aufgrund der technischen und methodischen Entwicklungen eine immer größere Bedeutung. Im Kontext einer Auswertung von Fernerkundungsdaten soll dieser in der Vergangenheit oft vernachlässigte Aspekt näher betrachtet werden.

Die Entwicklungen zahlreicher neuer Fernerkundungssensoren mit verbesserten geometrischen, spektralen und radiometrischen Eigenschaften sollen dem prognostizierten Bedarf an aktuellen drei-dimensionalen Geodaten Rechnung tragen. Weiterhin ist ein **Trend bei der Datenerfassung** hin zu Multi-Sensor-Systemen zu betrachten, die simultan oder sequenziell aufgezeichnete Bilddaten (multi- oder hyperspektral), Orientierungsdaten (insbesondere GPS und INS) oder Entfernungsdaten (z.B. Laserscanning) erzeugen. Kommen für eine Anwendung außerdem noch thematische oder terrestrische Daten hinzu, so besteht die Aufgabe in der Auswertung von *Multi-Daten-Systemen* (ACKERMANN, 1998).

Solche **Auswertungen** werden konventionell durch eine lineare Aneinanderreihung mehrerer, zweckgebundener Methoden realisiert. Mit der immer stärkeren Verfügbarkeit von Datenquellen wird auch die Anzahl der involvierten Teilauswertungen ständig weiter erhöht. Neben den Tatsachen, dass die automatischen Einzelmethoden noch nicht ausgereift sind und sich fehlerhafte Ergebnisse fortpflanzen, ist insbesondere die Art der Methoden-Integration dafür verantwortlich, dass die Auswerteprozesse oft keine zufriedenstellenden Ergebnisse erzielen können. Hierbei lassen sich drei Problemfelder identifizieren (siehe auch Abb. 1):

- In der Regel basieren die eingesetzten Software-Systeme auf unterschiedlichen Entwicklungskonzepten und Datenmodellen, stellen also abgeschlossene, monolithische Elemente dar, die den Austausch an Geodaten erschweren (STREIT, 2000). Die Folge ist eine redundante Datenhaltung, die einen Verlust an Speicherplatz nach sich zieht und den Zugriff *aller* Methoden auf aktuelle bzw. aktualisierte Daten nicht gewährleistet.

---

<sup>1</sup> Dr.-Ing. Jochen Schiewe, Forschungszentrum für Geoinformatik und Fernerkundung, Hochschule Vechta, Postfach 1553, 49364 Vechta, e-mail: jschiewe@fzg.uni-vechta.de

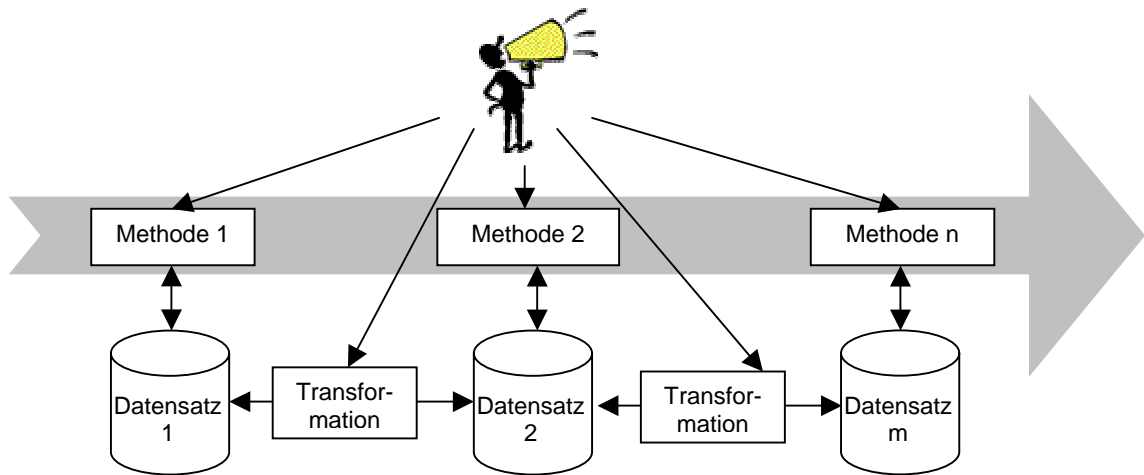


Abb. 1: Konventioneller Ablauf von Fernerkundungsauswertungen: interaktiv initiiert, linear

- Die Initiierung der einzelnen Methoden verlangt i.d.R. jeweils Eingriffe des Benutzers, was zu operationellen Einschränkungen führt.
- Wertvolle Informationen, die erst in späteren Schritten gewonnen werden, werden bei den konventionell linearen bzw. sequenziellen Ansätzen für frühere Komponenten nicht mehr berücksichtigt, obwohl sie dort eine unterstützende Wirkung haben könnten.

Die generelle **Aufgabe** besteht daher in der Weiterentwicklung von integrativen Auswertesystemen, die eine effektive Datenhaltung sowie auch eine nicht-lineare Kopplung der Auswertemethoden ermöglichen sollen. Während es bereits eine Reihe von allgemeinen Ansätzen zur System-Integration gibt (siehe z.B. EHLERS ET.AL., 1989; ABEL ET.AL., 1994), soll in diesem Beitrag ein Konzept für eine intra-disziplinäre Auswertesystem-Architektur diskutiert werden, das Methoden und Daten für *Fernerkundungsanwendungen* integriert. Basierend auf einem typischen Beispiel für eine konventionelle Fernerkundungsstrategie, an der die genannten Problemfelder exemplarisch belegt werden sollen (Kapitel 2) werden die Anforderungen an eine solche Architektur definiert und verschiedene konzeptionelle Modelle, die dem Bereich des Software-Engineerings entliehen sind, hinsichtlich ihrer Eignung diskutiert (Kapitel 3).

## 2 Status von Fernerkundungs-Auswertesystemen

Anhand einer konkreten Anwendung - der Extraktion von Waldgebieten auf Basis multisensoraler Daten (Laserscanning-Höhen sowie optischen Bilddaten) - sollen die in Kapitel 1 genannten Problemfelder bei der Auswertung von Fernerkundungsdaten exemplarisch belegt werden.

Prinzipiell sieht unser **Ansatz** (siehe auch Abb. 2) nach einer Grobfehlersuche im Digitalen Oberflächen-Modell (DOM) die Ableitung von Objekthöhen (bzw. die des normalisierten DOMs) vor. Hierbei wird ein regionen-basierter Ansatz verwendet, der homogene Bereiche auf Basis der Gradienten und Krümmungen der Höhen bestimmt und in einer anschließenden Klassifizierung (mittels eines fuzzy-logic Ansatzes) in solche Regionen einteilt, die noch auf Geländeneiveau reduziert werden müssen bzw. solche, die dieses bereits repräsentieren. Aus dem resultierenden geschätzten Digitalen Gelände-Modell (gDGM) können durch Subtraktion

vom DOM die Objekthöhen (bzw. das nDOM) berechnet werden (SCHIEWE, 2001). Diese geometrischen Informationen gehen gemeinsam mit den Bildinformationen in eine weitere Segmentierung ein, die homogene Bereiche auf Basis typischer Waldeigenschaften (Höhen, Höhenvariationen, NDVI-Werte, spektrale Texturen) erzeugt. Für diese Regionen wird abschließend wieder die Klassenzugehörigkeit ("Wald" oder "Nicht-Wald") ermittelt.

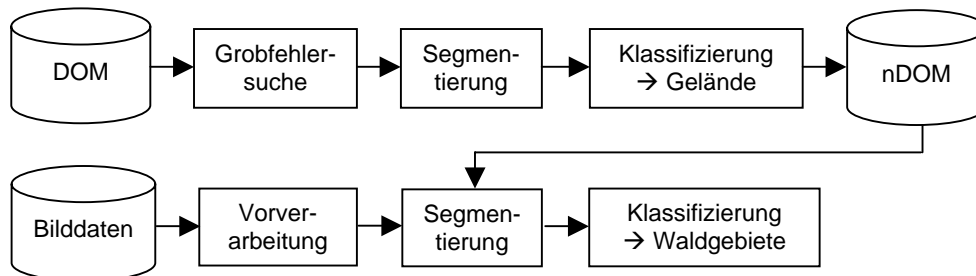


Abb. 2: Schematischer Auswerteablauf für automatisierte Erfassung von Waldgebieten

Die praktische **Umsetzung** dieses Gesamtauswerteablaufes geschieht durch zwei kommerzielle Software-Pakete (*eCognition* für die Segmentierung bzw. *Erdas Imagine* für Grobfehlersuche und Visualisierung) sowie selbst entwickelte C-Programme (für Klassifizierung, Datenaufbereitung und -Konvertierung).

Erfahrungen bei der Anwendung dieser teilweise monolithischen Systeme belegen die in Kapitel 1 genannten typischen **Problemfelder**:

- Die verwendeten heterogenen Systeme (mit unterschiedlichen Datenstrukturen und limitierten Im- und Export-Funktionalitäten) verlangen nach diversen Datenkonvertierungen (z.B. muss das Höhenmodell neben der originalen ASCII-Darstellung im IMAGINE- und BIL-Rohdatenformat vorliegen);
- Alle Methoden (inklusive der Transformationen) müssen interaktiv vom Benutzer aufgerufen werden. Eine Stapelverarbeitung ist wegen der eingeschränkten Batch-Fähigkeit einer Komponente nur sehr schwer zu realisieren. Es zeigt sich auch, dass die Informations-Generierung in den verschiedenen Schritten oftmals redundant ist (z.B. bei den hier angewendeten Segmentierungsverfahren).
- Aufgrund des großen Aufwandes für die repetitive Nutzung einer Komponente (die u.U. erneute Datenkonvertierungen bedingt) wird aus pragmatischen Gründen i.d.R. nur eine lineare Abfolge der genannten Operationen durchgeführt.

Hinsichtlich des letztgenannten Punktes hat sich aber auch gezeigt, dass Verbesserungen der Ergebnisqualität durch eine Vernetzung der Methoden möglich ist, wenn Hypothesen, die in späteren Schritten gewonnen werden, auch für frühere Verarbeitungsschritte eingeführt werden. Schon Informationen über den globalen Kontext (siehe z.B. die Arbeiten von EBNER ET.AL., 1998), insbesondere aber die Hypothesen der Objektextraktion können die Qualität der Höhendaten nachträglich verbessern. Zum einen können punktuelle Datenlücken oder in der Segmentierung erkannte Inselregionen im DOM bzw. nDOM sinnvoll aufgefüllt bzw. verifiziert werden. Geht man über diesen Anwendungsfall der Waldgebiets-Extraktion hinaus, kann ferner für bestimmte Objekte ein Höhenverhalten präzisiert werden und dies mit den vorhandenen Höhendaten abgeglichen werden:

- Für einige Regionen (z.B. flächenhafte Gewässer, Watt- oder Mooregebiete) kann von einer konstanten Höhe ausgegangen werden. Abb. 3 gibt ein einfaches, aber typisches Beispiel für das Höhenprofil eines Inland-Gewässers (abgeleitet aus SPOT-Daten), das bedingt durch Matching- und Interpolations-Probleme einen unerwünschten Höhenanstieg im Bereich des Gewässerkörpers zeigt. Die Objekterkennung auf Basis der Bilddaten kann diesen Fehler nachträglich erkennen (SCHIEWE, 2000).
- Andere Regionen (z.B. Flughäfen, Grünland, Äcker) können darauf hin überprüft werden, ob tatsächlich nur sehr geringe Höhengradienten vorliegen.
- Schließlich kann die Prädiktion einer nahezu konstanten Höhe quer zur bzw. ein sehr geringer Gradienten in Längsrichtung für einige lineare Objekte (Straßen, Flüsse) als Resultat von Objekt-Hypothesen zur Überprüfung der Höhendaten herangezogen werden.

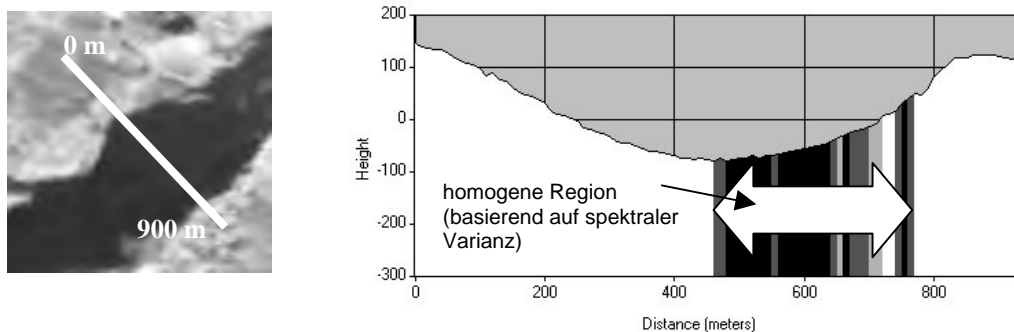


Abb. 3: Erkennung fehlerhafter Höhenwerte im Bereich eines Gewässers

Bei einer solcher Rückwärts-Strategie muss natürlich auch beachtet werden, dass die Hypothesen bereits von den (u.U. fehlerhaften) Ergebnissen vorheriger Auswerteschritte beeinflusst werden. Ferner bedingt eine nachträgliche Änderung in den Ausgangsdaten (z.B. Höhendaten) eine erneute Objektextraktion - es entsteht ein iterativer Prozess.

### 3 Integration von Fernerkundungs-Auswertekomponenten

Basierend auf den allgemein beschriebenen sowie exemplarisch belegten Problemen konventioneller Fernerkundungs-Auswertungen besteht die **Zielsetzung** nun in einer für den Anwendungszweck optimierten Kopplung vorhandener Komponenten, die eine objektiv begründbare Steuerung vorsieht und die Interaktion mit dem Benutzer auf ein Minimum reduziert. Hierfür werden im folgenden weniger die entsprechenden Aspekte der Datenmodellierung als vielmehr die der System-Architektur betrachtet werden. Aufbauend auf die Anforderungen an Funktionalitäten und Verbindungselemente einer solchen Architektur (Abschnitt 3.1) werden in Abschnitt 3.2 mögliche Konfigurationen diskutiert.

#### 3.1 Anforderungskriterien

Da zu erwarten ist, dass sich System-Integrationen nicht schlagartig, sondern nur in einem längerfristigen Prozess umsetzen lassen (siehe auch EHLERS ET.AL., 1989; FEDRA, 1994), sollen im folgenden Anforderungskriterien definiert werden, die für zeitnahe, aber auch für zukünftige Realisierungen gelten sollten.



Für **zeitnahe Realisierungen** muss aus pragmatischen Gründen von einer Integration vorhandener, in sich *geschlossener Komponenten* ausgegangen werden. Diese Voraussetzung beruht auf der Erfahrung, dass es nicht möglich ist, in die konzeptionellen Schemata bestehender Systeme (wie den in Kapitel 2 beschriebenen) einzugreifen bzw. diese zu verändern. Hiermit ist auch eine Optimierung der Datenhaltung - im Idealfall über den Zugriff auf eine gemeinsame Datenbank (siehe z.B. BREUNIG ET.AL., 2000) - nur eingeschränkt oder gar nicht möglich.

Das Design einer Auswertesystem-Architektur besteht in erster Linie in der Definition ihrer Verbindungselemente. Hinsichtlich ihrer Funktionalitäten ist hierbei zum einen der reine Austausch von Daten zwischen den Komponenten (z.B. über Import- und Export-Routinen) vorzusehen (*transformation operations*; nach ABEL ET.AL., 1994). Zum anderen ist es im Hinblick auf die Steuerung des gesamten Auswerteablaufes notwendig, innerhalb einer oder mehrerer Komponenten Steuerungskommandos (automatisch) generieren zu lassen (*constructor operations*) und diese zur Ausführung zu bringen (*accessor operations*).

Hinsichtlich der Gestaltung der Verbindungselemente, muss den Prinzipien der Stetigkeit sowie der Geschütztheit entsprochen werden. Hierzu sind zum einen die Größen der intermodularen Verbindungen so klein wie möglich zu halten, d.h. es sind so wenig Informationen wie möglich auszutauschen. Dies entspricht dem Prinzip der *losen Kopplung* von Komponenten. Zum anderen sollte auch die *Anzahl der Schnittstellen* so gering wie möglich gehalten werden. Hier erweist sich eine Vernetzung aller Komponenten untereinander (Anzahl der Ordnung  $O(n^2)$  bei  $n$  Komponenten) als sehr aufwendig und fehleranfällig.

Um den Konsequenzen der sequenziellen Aneinanderreihung der Komponenten zu begegnen, sollte ein wesentliches Ziel im Design einer Architektur darin bestehen, auch *nicht-lineare Vorgehensweisen* zwischen den Elementen zu ermöglichen.

Für **zukünftige Realisierungen** ist unbedingt zu beachten, dass ein (u.U. offener) Zugriff auf Daten und Methoden von verschiedenen Benutzern von heterogenen, verteilten Plattformen aus gewährleistet ist.

## 3.2 Diskussion konzeptioneller System-Architekturen

In Anlehnung an den in Abschnitt 3.1 beschriebenen Anforderungen sollen nun konzeptionelle System-Architekturen - sowohl für zeitnahe, als auch zukünftige Realisierungen - hinsichtlich ihrer Eignung für Fernerkundungsauswertungen diskutiert werden.

Für **zeitnahe Realisierungen** - d.h. die Integration mehrerer geschlossener Komponenten durch den Austausch von Daten und Kommandos - schlagen ABEL ET.AL. (1994) eine Konfiguration mit einem gemeinsamen Datenbank-Managementsystem vor. Hierbei muss jede einzelne Komponente die notwendigen Verbindungsoperationen (*transformation, constructor, accessor*) beinhalten. Aufgrund der heterogenen Datenstrukturen der vorhandenen Komponenten ist eine gemeinsame Datenhaltung aber als utopisch anzusehen. Noch schwieriger stellt sich die Einbindung der genannten Verbindungsoperationen in die bestehenden Module dar.

Aus diesem Grund erscheint für aktuelle Realisierungen eine Konfiguration mit einer *gemeinsamen Schnittstellen-Komponente* als die beste Lösungs-Möglichkeit. Diese zentrale Komponente vereinigt eine einheitliche Benutzerschnittstelle sowie alle Verbindungsoperationen. Die Anzahl der Schnittstellen wird auf ein Minimum reduziert (Ordnung  $O(n)$ ). Ferner ist eine beliebige Sequenz bei der Ausführung der Methoden möglich.

Exemplarisch für das Design und die Entwicklung solcher zentraler Komponenten, die bereits für spezielle Anwendungen außerhalb der Fernerkundung konzipiert worden sind, seien genannt

- das System SISKIT zur Entscheidungsunterstützung für Umweltfragen (ABEL ET.AL., 1992);
- das GEOLINK-System zur Integration von vier Teilsystemen (WAUGH & HEALEY, 1986);
- diverse photogrammetrische und kartographische Module (z.B. zur Messung der inneren Orientierung, Orthobildberechnung oder Orthobildkarten-Generierung), die vom GIS-Produkt Arc/Info als zentrale Komponente aus gesteuert werden (SCHIEWE, 1997).

Für die in Kapitel 2 beschriebenen Anwendungen werden derzeit die Transformations- und Steuerungsoperatoren definiert, sodass auch in Kürze mit einer prototypischen Entwicklung eines integrierten Fernerkundungs-Auswertesystems zu rechnen ist.

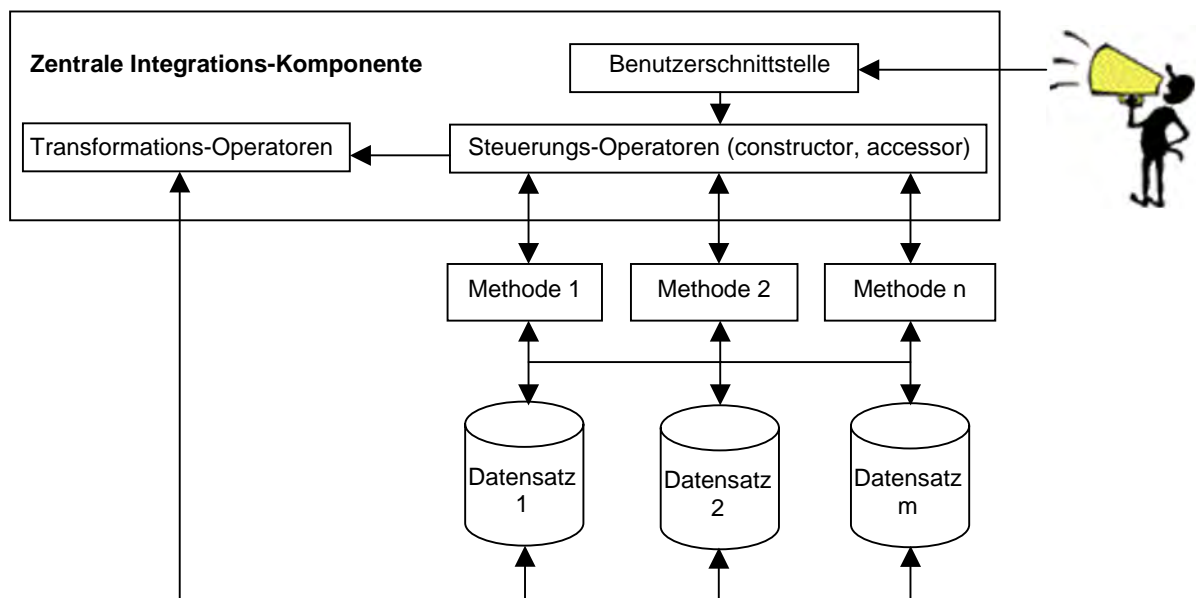


Abb. 4: Schema eines Auswertesystems mit einer zentralen Integrations-Komponente

Betrachtet man **zukünftige Realisierungen**, so wird deutlich, dass durch die Existenz lokaler, geschlossener Systeme die Forderung nach Interaktionen zwischen heterogenen Plattformen (z.B. verschiedenen Betriebssystemen) und Software-Komponenten noch nicht möglich erscheint. Andererseits ist auch die Zusammenfassung von Funktionalitäten zu einem, immer unüberschaubareren "Super-System" ist aufgrund der Komplexität der Einzelkomponenten kein sinnvoller Lösungsansatz.

Eine Realisierungsmöglichkeit für die geforderte Client-Server-Lösung besteht im Kopieren des Software-Codes (z.B. von Java Applets) auf den lokalen Rechner. Dies bewirkt zwar schnelle Ausführungszeiten, andererseits aber auch große Ladezeiten sowie lizenzrechtliche Probleme. Alternativ kann eine Kommunikation zwischen den Software-Komponenten, die auf verteilten und heterogenen Plattformen abgelegt sind, durch eine standardisierte Infra-

struktur geschaffen werden. Der Vorteil dieses Ansatzes - im Gegensatz zur o.g. Software-Spiegelung - besteht in den kürzeren Ladezeiten sowie geringeren lizenzrechtlichen Problemen. Andererseits kann aber der Austausch an Kommandos und Daten u.U. zu langsam sein.

Ein Beispiel für eine solche standardisierte Infrastruktur stellt die *Common Object Request Broker Architecture (CORBA)* der Object Management Group (OMG, 1998; BREUNIG, 2000) dar. CORBA besteht aus einem Steuerungsmodul - dem *Object Request Broker (ORB)* - sowie Schnittstellen zum Aufruf und Empfang von Informationen von den verteilten Ressourcen. CORBA wird mit einer eigenen Programmiersprache, der *Interface Definition Language (IDL)*, entwickelt. Ein erfolgreiches Anwendungsbeispiel für eine CORBA-basierte Integration beschreiben BALOVNEV ET.AL. (1998) bzw. BREUNIG ET.AL. (2000), die geologische und geophysikalische Modellierungstools zum Zweck geologischer Kartierungen kombinieren.

Abschließend bleibt aber festzuhalten, dass die angedachten Client-Server-Architekturen für die Kombination von Fernerkundungs-Softwarekomponenten derzeit noch nicht realisierbar erscheint, da i.d.R. heterogene, nicht objekt-orientierte Datenstrukturen vorliegen, die vorhandenen Komponenten nicht klein genug sind und keinerlei konzeptionellen oder realen Anbindungsmöglichkeiten an eine zentrale Schnittstelle existieren.

## 4 Schlussfolgerungen

Sowohl die Anzahl als auch die Komplexität der beteiligten Software-Komponenten im Rahmen von Fernerkundungs-Auswertungen steigen ständig an. Hiermit ergibt sich die Notwendigkeit einer effektiven Integration der Komponenten. Exemplarisch wurden typische Problembereiche konventioneller Verfahrensweisen aufgezeigt: Redundante Datenhaltung mit Zwang zu vielen Datenkonvertierungen, hoher interaktiver Aufwand sowie keine Möglichkeit bzw. keine Nutzung einer nicht-linearen Vorgehensweise.

Um diesen Problemen zu begegnen, wurden konzeptionelle Lösungsansätze aus dem Bereich des Software-Engineerings diskutiert. Für zeitnahe Realisierungen - d.h. basierend auf in sich geschlossenen Komponenten - zeigte sich, dass eine System-Architektur mit einer zusätzlichen, zentralen Schnittstellen-Komponente, die Transformations- und Steuerungsaufgaben übernimmt, die sinnvollste Lösung darstellt. Für die vorgestellte, exemplarische Fernerkundungs-Anwendung wird in Kürze eine entsprechende prototypische Entwicklung eines integrierten Auswertesystems vorgestellt werden.

Langfristiges Ziel muss es aber sein, einen flexiblen Zugriff auf Daten und Methoden von verschiedenen Benutzern von heterogenen, verteilten Plattformen aus zu gewährleisten. Im Hinblick auf die hierfür notwendigen Infrastrukturen (z.B. CORBA-basierten Architekturen) ist es zwingend notwendig, die Software-Komponenten wesentlich kompakter bzw. stärker modularisiert als bisher zu entwickeln. Zum anderen ist es aber auch unabdingbar, dass der - in diesem Beitrag nicht näher behandelte - Aspekt einer Harmonisierung der zugrunde liegenden Datenstrukturen eine wesentliche stärkere Beachtung finden wird.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Idee einer Methoden-Kopplung, die im Kontext der Auswertung von Fernerkundungsdaten bisher erst wenig Beachtung gefunden hat, auf Grundlage der hier demonstrierten Beispiele einen signifikanten Qualitätsgewinn sowie einen entsprechenden Einfluss auf künftige Software-Entwicklungen erwarten lässt und somit schon in naher Zukunft ein interessantes, inter-disziplinäres Arbeitsfeld darstellen wird.

## 5 Literatur

- ABEL, D.J. ET.AL. (1992): Environmental decision support systems project: an exploration of alternative architectures for geographical information systems. *International Journal of Geographical Information Systems*. 6(3): 193-204.
- ABEL, D.J., KILBY, P.J. & DAVIS, J.R. (1994): The systems integration problem. *International Journal of Geographical Information Systems*. 8(1): 1-12.
- ACKERMANN, F. (1998): Photogrammetrie im Wandel - Neue Anforderungen an das Hochschulstudium. *PFG - Photogrammetrie-Fernerkundung-Geoinformation*. 2: 69-79.
- BALOVNEV, O. ET.AL. (1998): A CORBA-based Approach to Data and Systems Integration for 3D Geoscientific Applications. *Proceedings of the 8<sup>th</sup> Int. Symposium on Spatial Data Handling*, Vancouver: 396-407.
- BREUNIG, M. (2000): *On the Way to Component-Based 3D/4D Geoinformation Systems*. Lecture Notes in Earth Sciences, Nr. 94, Springer-Verlag.
- BREUNIG, M. ET.AL. (2000): Geological Mapping based on 3D models using an interoperable GIS. *GIS- Geo-Informationssysteme*. 13(2): 12-18.
- EBNER, H., BAUMGARTNER, A. UND STEGER, C. (1998): Automatische Extraktion von Straßen aus Luftbildern. *Österr. Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation*. (85)3: 177-186.
- EHLERS, M., EDWARDS, G. & BEDARD, Y. (1989): integration of remote sensing with geographic information systems: a necessary evolution. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 55(11): 1619-1627.
- EHLERS, M. (1993): Integration of GIS, remote sensing, photogrammetry and cartography: the geoinformatics approach. *GIS - Geo-Informationssysteme*. 6(5): 18-23.
- FEDRA, K. (1994): GIS and Environmental Modeling. in: Goodchild, M.F., Parks, B.O. & Steyart, L.T. (Hrsg.): *Environmental Modeling with GIS*. Oxford University Press: 35-50.
- OMG (1998): CORBA 2.0/IIOP Specification. Object Management Group formal document 98-07-01.
- SCHIEWE, J. (1997): *Geo-Modellierungen mit Daten des Weltraumsensors MOMS-02*. Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover, Nr. 222 (Dissertation).
- SCHIEWE, J. (2000): Combining geometrical and semantical image information for the improvement of Digital Terrain Models. in: Buchroithner, M.F. (Hrsg.): *A Decade of Trans-European Remote Sensing cooperation*, Proceedings of the 20th EARSEL-Symposium, A. A. Balkema Publishers: 175:180.
- SCHIEWE, J. (2001): Ein regionen-basiertes Verfahren zur Extraktion der Geländeoberfläche aus Digitalen Oberflächen-Modellen. *Photogrammetrie - Fernerkundung - Geoinformation*, 2: 81-90.
- STREIT, U. (2000): Interoperable, Offene Geowissenschaftliche Informationssysteme. *GIS-Geo-Informationssysteme*. 13(2): 2-3.
- WAUGH, T.C. & HEALEY, R.G. (1986): The Geolink system, interfacing large systems. *Proceedings of AutoCarto London*: 76-85.

# Einsatz digitaler Kameras im Auflösungsbereich von 5 cm bis 1 m - Die neue HRSC-AX Kamerageneration in der geometrischen Analyse

FRANK SCHOLTEN<sup>1</sup>, SERGEJ SUJEW<sup>2</sup>, FRANZ WEWEL<sup>3</sup>

*Abstract: Since 1997 the High Resolution Stereo Camera - Airborne (HRSC-A) is operated as the first digital stereo-photogrammetric camera.. In spring 2000 the HRSC-AXW, a derivative of the HRSC-A, started operation, It is the wide-angle version (47 mm) of the new HRSC camera generation using 12k-CCD line technology. Now, since spring 2001, the HRSC-AX (150 mm) has been completed and was tested extensively. The HRSC-AX is the successor of the narrow-angle HRSC-A, but also extended by 12k-technology and other features in order to further improve the quality of the orthoimage- and 3D-products. This paper describes the geometric tests related to the new HRSC-AX camera generation. It will show the efficiency of the system, consisting of camera hard- and software, geometric calibration, direct DGPS/INS georeferencing, and automated photogrammetric processing software. Image resolutions and accuracies down to the sub-decimeter range will be exposed by numerical results of test flights and image examples.*

## 1 Einleitung

Das grundlegende Mehrzeilen-Pushbroom-Prinzip der neuen Kamerageneration mit 5 bzw. 9 Farb- und Stereo-CCD-Zeilen in der Fokalebene einer gemeinsamen Optik ist identisch mit dem bewährten Konzept der HRSC-A (NEUKUM et al., 1995, NEUKUM, 1999). Beide Kameras bieten im Vergleich zur HRSC-A weitere neue Möglichkeiten der digitalen photogrammetrischen Bildaufnahme.

	HRSC-AX	HRSC-AXW	HRSC-A
<b>Focal Length</b>	150 mm	47 mm	175 mm
<b>Total Field of View</b>	41° x 29°	30° x 79°	38° x 12°
<b>CCD Lines</b>	9 (4 colors)	5 (2 colors)	9 (4 colors)
<b>Stereo Angles</b>	±20.5°, ±12.0°	±14.5°, ±12.2°	±18.9°, ±12.8°
<b>Color Off-Nadir</b>	-4.6°/-2.3°/2.3°/4.6°	-7.3°/7.3°	-15.9°/-3.3°/3.3°/15.9°
<b>ImagePixels/CCD Line</b>	12000	12000	5184
<b>Pixel Size</b>	6.5 µm	6.5 µm	7 µm
<b>Radiom. Resolution</b>	12 bit	12 bit	8 bit
<b>Max. Scan Rate</b>	1640 lines/s	1640 lines/s	450 lines/s

Tab. 1: Technische Daten HRSC-AX, -AXW, -A

<sup>1</sup> Frank Scholten, Tel.: 030-67055-326, E-mail: Frank.Scholten@dlr.de

<sup>2</sup> Sergej Sujew, Tel.: 030-67055-343, E-mail: Sergej.Sujew@dlr.de

<sup>3</sup> Franz Wewel, Tel.: 030-67055-428, E-mail: Franz.Wewel@dlr.de

So wurde z.B. durch Verwendung von CCD-Zeilen mit 12000 Bildpixeln (bisher 5184 Pixel/Zeile bei der HRSC-A) eine Vergrößerung der Schwadbreite sowie durch die Verkürzung der minimalen Belichtungszeit auf 0,6 ms (bisher 2,2 ms) eine nochmalige Verbesserung der geometrischen Auflösung ermöglicht.

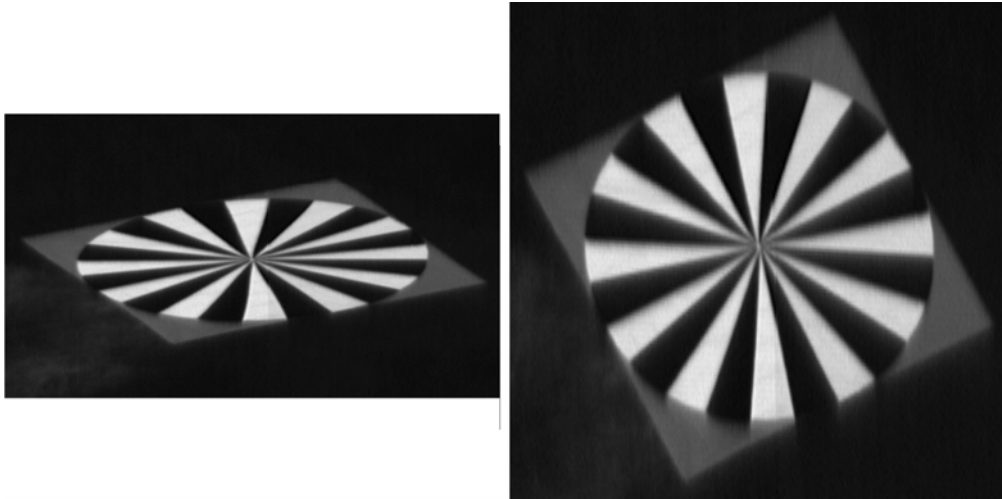


Abb. 1: HRSC-AX: Siemensstern (Durchmesser 6m) mit 24 Sektoren, Flughöhe 500 m  
(links: Rohdaten, rechts: geometrisch korrigiert)



Abb. 2: Fahrender PKW auf Autobahn, Flughöhe 500 m  
(links: Rohdaten, rechts: geometrisch korrigiert, Längenverzerrung durch Eigenbewegung)

Abb. 1 & 2 zeigen das Auflösungsvermögen der neuen Kamerageneration anhand von Daten des panchromatischen Nadirkanals, die am 9. April 2001 bei ungünstigen Wetterbedingungen (Wechsel zwischen dichter Bewölkung und Sonnenschein) mit einer einzigen Kameraeinstel-

lung innerhalb eines Flugstreifen aufgenommen wurden (Flughöhe 500 m, Scanrate 1055 Hz, Fluggeschwindigkeit 70 m/s, Pixelauflösungen am Boden: 2 cm quer bzw. 7 cm in Flugrichtung). Zum Zeitpunkt der Aufnahme lag der Siemensstern (Abb. 1) im Schatten einer dichten Bewölkung. Die Originalgrauwerte liegen zwischen 10 und 2500 (entspricht einer Auflösung von mehr als 11 bit). Abb. 2 zeigt einen Bereich ungetrübter Sonneneinstrahlung (Grauwertbereich 10 - 4050, entspricht einer Auflösung von 12 bit).

Zudem wurde bei der neuen Kamerageneration durch eine veränderte Anordnung der Farb-CCD-Zeilen in der Fokalebene das Erscheinen von Farbsäumen in Farb-Kompositen minimiert (siehe Tab. 1) und, im Gegensatz zur für die Marserkundung entwickelten HRSC-A, die für den Nutzer gewohnten Naturfarben und Infrarot-Komposite durch Anpassung der verwendeten Spektralfilter an die terrestrischen Bedingungen praktisch direkt ableitbar gemacht. Während das durchweg digitale Konzept der HRSC-Bildaufnahme, die Verarbeitung zu Orthobild-Mosaiken und Digitalen Oberflächenmodellen sowie Anwendungsbeispiele bereits mehrfach beschrieben sind (WEWEL et al., 1998, SCHOLTEN et al., 1999, GWINNER et al., 2000), soll nun im Vergleich mit der geometrischen Analyse der HRSC-A (WEWEL & BRAND, 1999) auch näher auf die geometrischen Eigenschaften der neuen Kamerageneration im Zusammenspiel zwischen Kameratechnik, geometrischer Kalibration und direkter Georeferenzierung eingegangen und anhand von Testergebnissen belegt werden.

## **2 HRSC-AX/AXW Laborkalibrierung**

Bei der geometrischen Kalibration von Zeilenkameras wie der HRSC ist im Gegensatz zu analogen Framekameras die Möglichkeit gegeben, jedes einzelne für die Bildaufnahme relevante Position in der Fokalebene (jedes CCD-Pixel einer Zeile) im Labor exakt zu kalibrieren. Hierzu wird auf einem speziell für diese Aufgabe eingerichteten Meßplatz die Kamera so montiert, daß das Licht eines senkrecht zur Objektivenebene angeordneten Kollimators durch eine spezielle Schlitzblende auf die Fokalebene trifft. 2 Rotationen des Meßtisches, bei der die Rotationsachsen sich in der Mitte der Eintrittspupille schneiden, ermöglichen dann die Beleuchtung jedes einzelnen CCD-Elements. Durch präzise Messung der Rotationswinkel werden dann unter der Annahme einer nominellen Brennweite die Positionen der einzelnen CCD-Pixel in der nominellen Bildebene (Kamera-Koordinatensystem) berechnet und als Kalibrationsfiles für die photogrammetrische Prozessierung bereitgestellt (siehe auch OHLHOF, 1996).

## **3 DGPS/INS Datenaufzeichnung und -verarbeitung**

### **3.1 Beschreibung des GPS/INS Systems**

Für die direkte Georeferenzierung der HRSC-Bilddaten wird ein integriertes GPS/Inertialsystem *POS/DG 510* der Fa. APPLANIX CORP. benutzt, welches eine Inertialsensortechnologie mit einem GPS-Empfänger effizient kombiniert (HUTTON et al., 1998). Das System besteht aus drei Teilen, der Inertial Measurement Unit (IMU), einem Steuercomputer mit integriertem GPS-Empfänger und dem Auswertesoftwarepaket *PosPac*. Der IMU-Block ist getrennt von der Ausleselektronik und kann damit direkt auf dem Kamerakopf

angebracht werden. Die IMU-Sensoren (3 Kreisel und 3 Beschleunigungsmesser) realisieren die Messungen von Beschleunigungen und Winkelgeschwindigkeiten der Kamera mit einer Taktrate von 200 Hz. Dies ermöglicht, alle Restbewegungen der Kamera, die nicht von der stabilisierten und gedämpften Plattform ausgeglichen werden können, zu erfassen. Die GPS-Antenne ist direkt über der Kamera installiert, die GPS-Datenaufzeichnung erfolgt mit einer Frequenz von 2 Hz. Die zeitsynchronisierten IMU- und GPS-Daten werden während des Fluges im Steuercomputer auf eine PC-Karte für die weitere Post-Prozessierung gespeichert. Gleichzeitig werden am Boden die Daten von einer oder mehreren stationärer GPS-Bodenstationen mit 1 Hz aufgezeichnet.

### **3.2 GPS/INS Datenverarbeitung**

Die Verarbeitung der aufgezeichneten GPS- und Inertialdaten besteht aus zwei Phasen und wird mit Hilfe der APPLANIX-Software *PosPac* durchgeführt. Die erste Phase beinhaltet die reine GPS-Prozessierung, wobei die GPS-Daten vom Flugzeug zusammen mit der Referenzstation zur einer kinematischen GPS-Trajektorie prozessiert werden. Diese DGPS-Lösung mit 1 Hz beschreibt im WGS84-Koordinatensystem die Position (Latitude, Longitude, Altitude) und die Beschleunigungen ( $V_n$ ,  $V_e$ ,  $V_d$ ) mit sehr hoher absoluter Genauigkeit (5-10 cm für die Position und einige cm/s für die Geschwindigkeit). Allerdings kann diese Genauigkeit wegen vieler verschiedener Faktoren, wie z.B. schlechter Satelliten-Konstellation, Ionosphärenstörungen, großer Entfernung zur Referenzstation, deutlich beeinträchtigt werden. Für die Analyse der Qualität der DGPS-Lösung können neben der Standard-Konfiguration mit einer Basisstation direkt im Testgebiet auch mehrere Referenzstationen mit Entfernungen von einigen hundert Kilometern in Betracht gezogen werden (s. Abschnitt 4.1). Eine wichtige Begrenzung für die Benutzung von weitentfernten Referenzstationen für kinematische Anwendungen ist die Verwendung des KAR-Verfahrens (Kinematic Ambiguity Resolution), das bei Satellitenverlusten und der damit verbundenen Notwendigkeit zur Neulösung die Ambiguitäten bei Distanzen von mehr 30-40 km nicht zuverlässig arbeitet. Deswegen muß für die weiter entfernten Stationen eine statische Initialisierung der DGPS-Trajektorie durchgeführt werden.

Die zweite Phase besteht aus der GPS/INS-Integration. Der auf den IMU-Daten basierte Inertial-Navigationsalgorithmus wird dabei durch die zusätzliche GPS-Positions- und GPS-Geschwindigkeitsinformation gestützt. Aufgrund der Tatsache, daß die typischen Fehler von Inertial-Navigation und GPS-Messungen unabhängig und komplementär sind, wird es möglich, im Rahmen von Kalman-Filterverfahren diese Inertial-Fehler effektiv zu schätzen und zu kompensieren. Die resultierende Genauigkeit der integrierten GPS/INS Lösung wird damit für die Position über die GPS-Positionsgenauigkeit und für die Lage über die Qualität der IMUs bestimmt.

## **4 HRSC-AX Testbefliegung**

### **4.1 Testkonfiguration**

Ein eingehender Geometrie-Perfomancetest der im Frühjahr 2001 fertiggestellten HRSC-AX erfolgte am 9./10. April 2001 über einem südlich von Berlin (Königs Wusterhausen, Ragow)



angelegten Testfeld. Standardgemäß wurde die Kamera in einer ZEISS T-AS Plattform an Bord einer Cessna 208C (Fa. RWE RHEINBRAUN AG) betrieben. Als DGPS/INS-System wurde das POS/DG 510C System der Fa. APPLANIX in Verbindung mit einer L1/L2-GPS-Antenne verwendet. Als DGPS-Referenz wurden Daten folgender Stationen verwendet: Testgebiet Ragow, Bamberg (Distanz ca 330 km) und Düsseldorf (Distanz ca 480 km). Das Testgebiet hat eine Ausdehnung von 20 km in Ost-West Richtung sowie 5 km in Nord-Süd Richtung und umfaßt somit eine Fläche von ca. 100 km<sup>2</sup>. Es besteht aus mehreren Ortschaften mit markanten natürlichen und insbesondere künstlichen Texturen (z.B. Straßenmarkierungen), die als Verknüpfungspunkte (IPs) zwischen den einzelnen Flugstreifen dienen. Zusätzlich wurden Paßpunkte (PPs) in Form von farblich markierten Bodenpunkten sowie weißen, 45 cm • 45 cm großen Markierungsplatten signalisiert und mit Hilfe von DGPS mit cm-Genauigkeit eingemessen. Das Testgebiet wurde am 10. April 2001 wie folgt befliegen:

- Flughöhe: 1000 m über Grund, Fluggeschwindigkeit: ca. 250 km/h, Flugzeit ca. 1 Stunde
- 5 Längsstreifen (Ost-West), 2 Querstreifen (Nord-Süd) (sich überlappende Längsstreifen wurden alternierend von Ost nach West bzw. von West nach Ost befliegen), 40 % Querüberlappung
- Scanrate: 450 Hz (entspricht 2,24 ms Belichtungszeit je Bildzeile)
- alle 5 Stereokanäle in voller Auflösung, d.h. ohne Pixelzusammenfassung.

Aus diesen Daten errechnet sich eine Bodenauflösung von 4 cm/Pixel quer zur Flugrichtung bzw. 16 cm/Pixel in Flugrichtung für alle 5 Stereokanäle.

## 4.2 Analyse- und Auswerteverfahren

Für die Auswertung der Testbefliegung stehen somit folgende Daten zur Verfügung:

- Bilddaten der 5 Stereokanäle der HRSC-AX (Farbdaten wurden hier nicht verwendet) inklusive Zusatzinformation, wie z.B. Aufnahmezeitpunkt,
- Kalibrationsdaten der 5 Stereo-CCD-Zeilen,
- 4 SBET-Files, generiert unter Verwendung der 3 DGPS Referenzstationen, mit 2 Auswertungsvarianten aus der im Testfeld liegenden Referenzstation Ragow,
- WGS84-Referenzkoordinaten der Paßpunkte

Zur Auswertung und Analyse der Testbefliegung wurde folgende Prozedur verwendet, die auch bei der operationellen Prozessierung von anderen HRSC-Daten Anwendung findet.

### DGPS/INS Post-Processing

=> SBET-Files mit UTC-gebundener Information über Position und Lage der Kamera während der gesamten Flugzeit (200 Hz)

### Interpolation in den SBET-Files zu allen Aufnahmezeitpunkten

=> Position<sub>WGS84</sub> und Lage<sub>T</sub> für die Bildzeilen-(Zeiten) der Stereokanäle aller Flugstreifen (Die Position ist im **WGS84**-System definiert. Die die Fluglage bestimmenden Drehwinkel  $\omega, \phi, \kappa$  in den SBET-Files sind die Drehwinkel des aktuellen Kamera-Koordinatensystems<sub>HRSC</sub> zu einem kartesischen Tangentialsystem **T**, das in der jeweiligen aktuellen Kameraposition  $X_T, Y_T, Z_T$  gelagert ist und dessen x-Achse nach Norden, y-Achse nach Osten und z-Achse in Richtung des Nadirs weist).

### Umrechnung der Lagedaten in das erdzentrische kartesische WGS84-System

=> Position<sub>WGS84</sub> und Lage<sub>WGS84</sub> für die Bildzeilen-(Zeiten) der Stereokanäle aller Flugstreifen. (Die Lage bezüglich des **WGS84**-Systems ergibt sich durch eine zusätzliche Drehung des Systems **T**. Diese Drehung ist definiert über die in geographischen Koordinaten ausgedrückte Position<sub>WGS84</sub>).

### Messung von IPs (Identische Punkte mehrerer Flugstreifen) u. PPs (Paßpunkte)

=> Bildkoordinaten aller 22 PPs und 142 IPs in allen 5 Stereokanälen (WGS84-Referenzkoordinaten der Paßpunkte wurden durch DGPS-Messungen im Feld bestimmt)

### Gemeinsame Bestimmung des Boresight-Alignment zwischen Kamera- und IMU-Meßachsen, systematischer Positions-Offsets und -Drifts des GPS-Flugweges sowie etwaiger Zeit-Offsets zwischen den Positions- und Lageinformation einerseits und Bilddaten andererseits mit Hilfe aller vorliegenden Bild- und Referenzkoordinaten der IPs und PPs

Die gemeinsame Bestimmung der o.g. Parameter erfolgt im Rahmen eines heuristischen Optimierungsverfahrens. Dabei werden zunächst die Boresight-Offsets für  $\kappa$  und  $\phi$  sowie ein etwaiger Zeit-Offset zwischen Bild- und Lagedaten durch Optimierung der Strahlenschnitte aller durch die innere und äußere Orientierung definierten Raumstrahlen bestimmt. Anschließend wird der Boresight-Offset für  $\omega$  sowie ein etwaiger Zeit-Offset zwischen Bild- und Positionsdaten über die PPs und IPs zwischen sich überlappenden (entgegengesetzt geflogenen) Parallelstreifen berechnet. Neben Positions-Offsets können dabei auch etwaig auftretende Positions-Driften über die PPs bestimmt werden.

=> Offsets für Boresight-Winkel zwischen Kamera und IMU, Zeit-Offsets, Offsets und Driften des GPS-Flugweges

## 4.3 Ergebnisse der HRSC-AX Testbefliegung

### 4.3.1 Ergebnisse ohne Ansetzung einer Drift des GPS-Flugweges

Es wurde zunächst mit Hilfe der vorliegenden IPs und PPs eine Optimierung durchgeführt, bei der keine Drift des GPS-Flugweges angesetzt wurde. Die Ergebnisse sind in Tabelle 2 dargestellt (SBET 1: DGPS-Referenzstation im Testgebiet Ragow, SBET 2: DGPS-Referenzstation im Testgebiet Ragow, zusätzliche Modellierung der Lever-Arm Dynamiken (Lageabhängiger Offset der GPS-Antenne zur Kamera), SBET 3: DGPS-Referenzstation in Bamberg, SBET 4: DGPS-Referenzstation in Düsseldorf).

	SBET 1	SBET 2	SBET 3	SBET 4
Boresight $\omega$ [°]	0.022	0.023	0.022	0.023
Boresight $\phi$ [°]	-0.015	-0.014	-0.015	-0.016
Boresight $\kappa$ [°]	0.135	0.134	0.133	0.135
Positions-Offset:				
Offset_x [cm]	12	10	25	19
Offset_y [cm]	-1	-1	9	2

Offset_z [cm]	5	2	17	9
$\Delta t$ Position-Bild [ms]	0.3	0.9	0.4	-0.3
$\Delta t$ Lage-Bild [ms]	-3.0	-3.0	-3.0	-2.0
3D-RMS_rel [cm]	5.8	5.8	5.5	5.6
3D-RMS_abs-IP [cm]	8.9	8.9	11.6	11.5
3D-RMS_abs-PP [cm]	11.6	11.4	16.7	12.3

Tab. 2: Optimierungsergebnisse ohne modellierte Drift des GPS-Flugweges

Die Ergebnisse aus Tabelle 2 sind wie folgt zu beschreiben:

- die erzielten relativen und absoluten Genauigkeiten liegen im Subpixelbereich.
- die berechneten Werte der Boresight- u. Zeitoffsets sind in allen Varianten nahezu gleich
- bei großen Entfernungen der GPS-Referenzstation vom Befliegungsgebiet ist ein größerer Positions-Offset des Flugweges zu erkennen. Die erzielbaren Genauigkeiten liegen etwas niedriger, befinden sich jedoch immer noch im Subpixelbereich.

#### 4.3.2 Ergebnisse mit Ansetzung einer Drift des GPS-Flugweges

Es wurde nun eine Drift des GPS-Flugweges angesetzt. Die Ergebnisse zeigt Tabelle 3.

	SBET 1	SBET 2	SBET 3	SBET 4
Boresight $\omega$ [°]	0.022	0.023	0.022	0.023
Boresight $\phi$ [°]	-0.015	-0.014	-0.015	-0.016
Boresight $\kappa$ [°]	0.135	0.134	0.133	0.135
Positions-Offset:				
Offset_x [cm]	8	6	33	24
Offset_y [cm]	7	7	20	8
Offset_z [cm]	13	11	33	19
Positions-Drift:				
Drift_x [cm/h]	5	7	-18	-10
Drift_y [cm/h]	-1	-1	-10	8
Drift_z [cm/h]	-8	-7	-25	-9
$\Delta t$ Position-Bild [ms]	0.3	0.9	0.4	-0.3
$\Delta t$ Lage-Bild [ms]	-3.0	-3.0	-3.0	-2.0
3D_RMS_rel [cm]	5.8	5.8	5.5	5.6
3D-RMS_abs-IP [cm]	9.3	9.4	10.2	10.6
3D-RMS_abs-PP [cm]	11.7	11.7	12.9	11.3

Tab. 3: Optimierungsergebnisse mit modellierter Drift des GPS-Flugweges

Die Ergebnisse aus Tabelle 3 sind wie folgt zu beschreiben:

- Eine signifikante Drift des GPS-Flugweges bei DGPS-Referenzstationen in der Nähe des Befliegungsgebietes ist nicht zu erkennen.
- Die Modellierung einer Drift des GPS-Flugweges ergibt bei den Varianten mit großer Entfernung der DGPS-Referenzstation zu einer Verbesserung der Genauigkeiten an den Paßpunkten von bis zu 4 cm.

### 4.3.3 Ergebnisse mit/ohne Querstreifen unter Verwendung von IPs und PPs

Im Folgenden wurden nur die IPs und PPs der 5 Längsstreifen (ohne 2 Querstreifen) verwendet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 4 (links) dargestellt.

	Mit IPs und PPs		Nur IPs	
	Mit Querstr.	Ohne Querstr.	Mit Querstr.	Ohne Querstr.
Boresight $\omega$ [°]	0.022	0.022	0.022	0.022
Boresight $\phi$ [°]	-0.015	-0.015	-0.015	-0.015
Boresight $\kappa$ [°]	0.135	0.135	0.135	0.135
Positions-Offset:				
Offset_x [cm]	12	12	12	12
Offset_y [cm]	-1	-1	-1	-1
Offset_z [cm]	5	5	5	5
$\Delta t$ Position-Bild [ms]	0.3	0.3	0.4	0.4
$\Delta t$ Lage-Bild [ms]	-3.0	-3.0	-3.0	-3.0
3D-RMS_rel [cm]	5.8	6.0	5.8	6.0
3D-RMS_abs-IP [cm]	8.9	8.2	8.8	8.2
3D-RMS_abs-PP [cm]	11.6	11.8	-	-

Tab. 4: Vergleich der Optimierungsergebnisse mit bzw. ohne Querstreifen (mit bzw. ohne PPs)

Die Ergebnisse sind wie folgt zu beschreiben:

- Ohne Verwendung von Querstreifen werden praktisch gleiche Ergebnisse erhalten.

### 4.3.4 Ergebnisse mit/ohne Querstreifen unter Verwendung von IPs

Im Folgenden wurden wie in Abschnitt 4.3.3 nur die Längsstreifen und auch nur die IPs verwendet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 4 (rechts) dargestellt und wie folgt zu beschreiben:

- Sowohl ohne Verwendung von Querstreifen als auch ohne PPs werden praktisch gleiche Ergebnisse erreicht.

## 5 HRSC-AXW Testbefliegung

Die im April 2000 fertiggestellte HRSC-AXW wurde ebenfalls über dem Testfeld Ragow getestet. Am 29 April 2000 wurden 6 Streifen aus einer Höhe von 1600 m befliegen ( $v = 85$  m/s, Scanrate 450 Hz, Bodenauflösung 21 cm quer bzw. 20 cm in Flugrichtung). Mit Hilfe von 45 PPs und 75 IPs in 6 Flugstreifen wurden folgende Ergebnisse erzielt werden:

- 3D-RMS\_rel:  $\pm 23,5$  cm, 3D-RMS\_abs:  $\pm 25,1$  cm

Auch die HRSC-AXW liefert somit, obwohl nur mit 3 Stereokanälen ausgestattet, Genauigkeiten im Subpixelbereich. Sie wird von der Fa. ISTAR (Frankreich) seit einem Jahr erfolgreich in den USA für die Generierung von Orthobildmosaiken und Digitalen Oberflächenmodellen im Auflösungsbereich von 0,5 - 1 m eingesetzt.

## 6 Zusammenfassung und Fazit

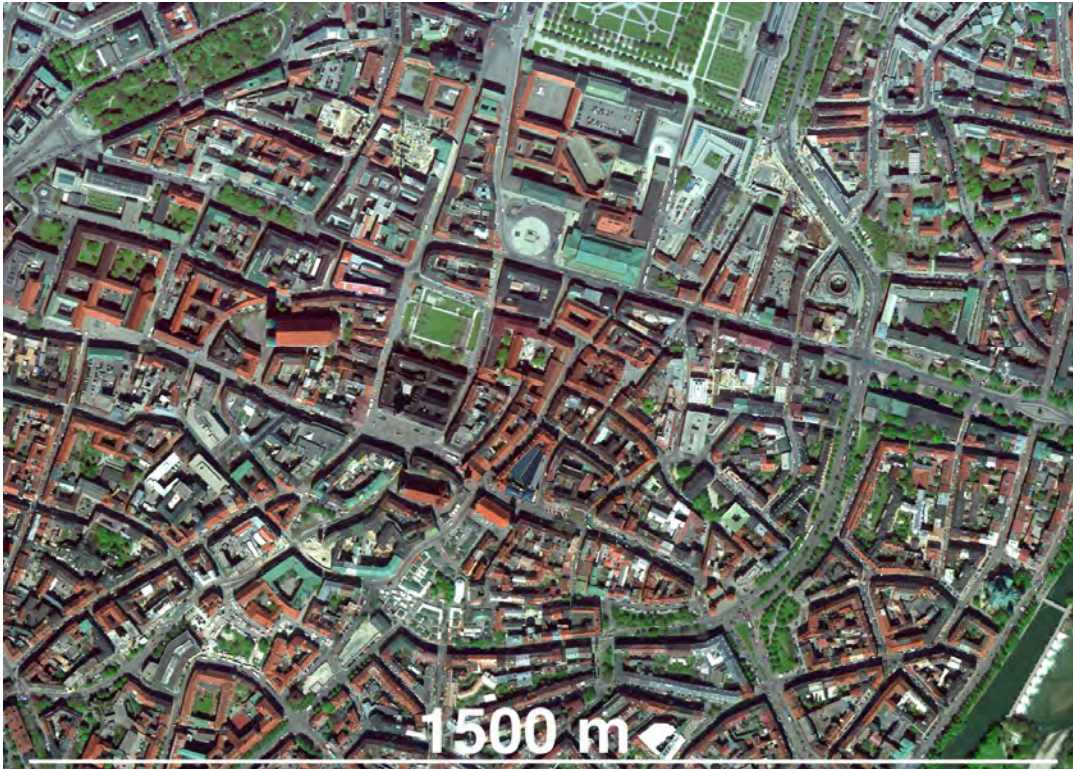


Abb. 3: HRSC-AX Echtfarbe, München 2.5.2001, Flughöhe 5000 m, Originalpixelgröße 20 cm

Durch die konsequent fortentwickelte Technologie des Mehrzeilen-Scanners HRSC liefert die neue HRSC-AX Kamerageneration weitere Fortschritte im Hinblick auf die hochgenaue multipektrale Multistereo-Bildaufnahme. Die Ergebnisse der geometrischen Tests der HRSC-AX und der HRSC-AXW sowie die Erfahrungen der Verarbeitung früherer HRSC-Bilddaten lassen die folgenden Aussagen zu:

- Mit Hilfe der direkten Georeferenzierung werden, wie bei der bisherigen HRSC-A, Genauigkeiten der zu generierenden Datenprodukte im Subpixelbereich ermöglicht.
- Diese Genauigkeiten können nachweisbar ohne Paßpunktinformation auch bei Verwendung weit entfernter DGPS-Referenzstationen erzielt werden.
- Bei DGPS-Referenzstationen mit Entfernungen von mehreren hundert Kilometern kann mit Hilfe von Paßpunkten eine etwaige Flugwegdrift als ein Teil der auftretenden Fehlereinflüsse modelliert werden.
- Zur Höhenanbindung der 3D-Produkten (z.B. Digitale Oberflächenmodelle) an Normal-Null-Höhen sind (wenige) Höhenpaßpunkte notwendig und ausreichend.
- Das Problem von Farbsäumen konnte durch ein neues Kameradesign weitestgehend eliminiert werden.
- Mit der HRSC-AXW werden in Konkurrenz zu hochauflösenden Satelliten-Bilddaten großflächig digitale Bild- und 3D-Produkte in einem Auflösungsbereich von 0,5-1 m erzeugt.
- Die HRSC-AX bestätigt bei den üblichen Flughöhen von 3000 - 5000 m die mit der HRSC-A erzielten Lagegenauigkeit für Orthobild-Mosaik von 10-15 cm sowie für 3D-Produkte (DOMs) eine Höhengenaugigkeit von 15-20 cm.

- Durch die erhöhten Taktfrequenzen wird im Bereich der digitalen Bildaufnahme mit der HRSC-AX der Auflösungs- und Genauigkeitsbereich von 5 cm erschlossen.

## Literatur

- GWINNER, K. et. al. (2000); High-Resolution, Digital Photogrammetric Mapping: A Tool for Earth Science, EOS, Transactions, American Geophysical Union, Volume 81, No. 44, Washington D.C., USA.
- HUTTON, J.J. & LITHOPOPULOS, E. (1998); Airborne Photogrammetry Using Direct Camera Orientation Measurements. - Photogrammetrie - Fernerkundung - Geoinformation, 6, E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart S. 363-370.
- NEUKUM, G. et. al. (1995); The Multiple Line Scanner Camera Experiment for the Russian Mars 96 Mission: Status Report and Prospect for the Future. - Photogrammetric Week'95 (Eds. D. FRITSCH & D. HOBBIIE), 45-61, Wichmann, Heidelberg.
- NEUKUM, G. (1999); The Airborne HRSC-A: Performance Results and Application Potential, Photogrammetric Week '99, Fritsch/Spiller (Eds.), Wichmann Verlag, Heidelberg, S. 83-88.
- SCHOLTEN, F. et. al. (1999); The High Resolution Stereo Camera (HRSC) - Digital 3D-Image Acquisition, Photogrammetric Processing and Data Evaluation. In: International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Proceedings of Joint Workshop "Sensors and Mapping from Space 1999", Veröffentlichungen des Instituts für Photogrammetrie und Ingenieurvermessungen, Universität Hannover, Nr. 18.
- OHLHOF, T., (1996); Lokale, regionale und globale Punktbestimmung mit Dreizeilenbilddaten und Bahninformationen der Mars96-Mission, In: Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Heft 445.
- 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.
- WEWEL, F. & BRAND, M. (1999); Geometrische Validierung des hochauflösenden multispektralen MehrzeilenStereoscanners HRSC-A. Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung, Berlin, Band 7, S. 245-252.
- WEWEL, F., SCHOLTEN, F., GWINNER, K. (2000); High Resolution Stereo Camera (HRSC) – Multispectral 3D-Data Acquisition and Photogrammetric Data Processing. Canadian Journal of Remote Sensing, Vol. 26, No. 5, S. 466-474.

# Ableitung von Wasserinhaltsstoffen zur Überwachung des Bodensees aus Fernerkundungsdaten

N. STAHL\* & P. GEGE†

*Grundlage für eine effektive Überwachung aquatischer Ökosysteme sind fundierte Kenntnisse der Prozesse im See und der Seedynamik. Wichtige limnologische Leitparameter wie Chlorophyllgehalt, organische gelöste Stoffe und Schwebstoffe sind optisch detektierbar und können aus Fernerkundungsdaten abgeleitet werden. Die flächenhafte Bestimmung der Gewässerinhaltsstoffe für die Gewässeroberfläche bietet im Vergleich zum konventionellen limnologisch-chemischen Meßprogramm viele neue Aspekte.*

*Der Informationsgewinn, den die Fernerkundung zum Umweltmonitoring des Bodensees bietet, wird bei Satellitendaten dadurch verstärkt, daß sie automatisiert und zeitlich hochauflösend zur Verfügung stehen. Für den Sensor MOS wurden Algorithmen zur Ableitung von Chlorophyll-, Gelbstoff- und Schwebstoffkarten entwickelt. Die praktische Anwendbarkeit eines für den Ozean entwickelten und auf Binnengewässer angepaßten Modells wird anhand von in-situ Daten am Bodensee überprüft. Als Ergänzung werden hyperspektrale Flugzeugdaten des abbildenden Spektrometers ROSIS verwendet, die durch die spektral (115 Kanäle) und räumlich (2m) hohe Auflösung zusätzliche Information bieten. Hierbei steht im Vordergrund, neue Methoden zur Auswertung flugzeuggetragener Gewässersensoren zu prüfen.*

*Die Ergebnisse dieser Arbeit sollen dazu beitragen, integrierte Konzepte zur Gewässerüberwachung zu entwickeln, die die Vorteile aller Methoden kombinieren, der chemischen sowie der fernerkundlichen und damit zu kontinuierlicheren und detaillierteren Erkenntnissen führen als in der heutigen Praxis.*

## 1 Einleitung

Die Ableitung von Wasserinhaltsstoffen aus Fernerkundungsdaten über den Ozeanen ist für Chlorophyll-, Schwebstoff- und Gelbstoffgehalte bereits validiert worden und die Ergebnisse der Modellierungen sind als Konzentrationskarten für viele Regionen operationell verfügbar. Die Übertragbarkeit dieser Algorithmen auf Binnengewässer ist jedoch noch nicht untersucht worden. Der Bodensee ist mit einer mittleren Oberfläche von 571 km<sup>2</sup> eines der größten Binnengewässer in Europa und auf Grund seiner Größe auch für Satellitenfernerkundung geeignet. Deshalb, aber auch wegen der langen Forschungstradition am Bodensee bietet er sich als Testgebiet für die Anwendbarkeit dieser Algorithmen auf Binnengewässer an. Schwerpunkt vorangegangener Arbeiten war die Erhebung der regionalen spezifischen optischen Eigenschaften der Wasserinhaltsstoffe für den Bodensee zur Optimierung der Algorithmen. Als Beispiel wurde ein Algorithmus für den Bodensee angepaßt. Zur Validierung wurden für 5 Meßstellen im See an acht Tagen im Jahr 2000 zeitnah zu Überflügen des Satellitensensors MOS in-situ Daten erhoben. An zwei Tagen im Mai wurden zusätzlich Befliegungen mit dem hyperspektralen Sensor ROSIS durchgeführt. Für diese Tage liegen jeweils für vormittags und nachmittags Flugzeugdaten der 5 beprobten Gebiete vor. Anhand dieser Daten werden experimentell die Möglichkeiten des ROSIS für die Binnengewässerfernerkundung aufgezeigt. Durch Vergleich dieses unabhängigen Datensatzes mit den Satellitendaten kann eine gegenseitige Kontrolle der Ergebnisse erfolgen und die Validierung durch die in-situ Messungen ergänzen. Ziel der Arbeit ist es, die Übertragbarkeit vorhandener Algorithmen für die Anwendung zur Seenüberwachung zu

---

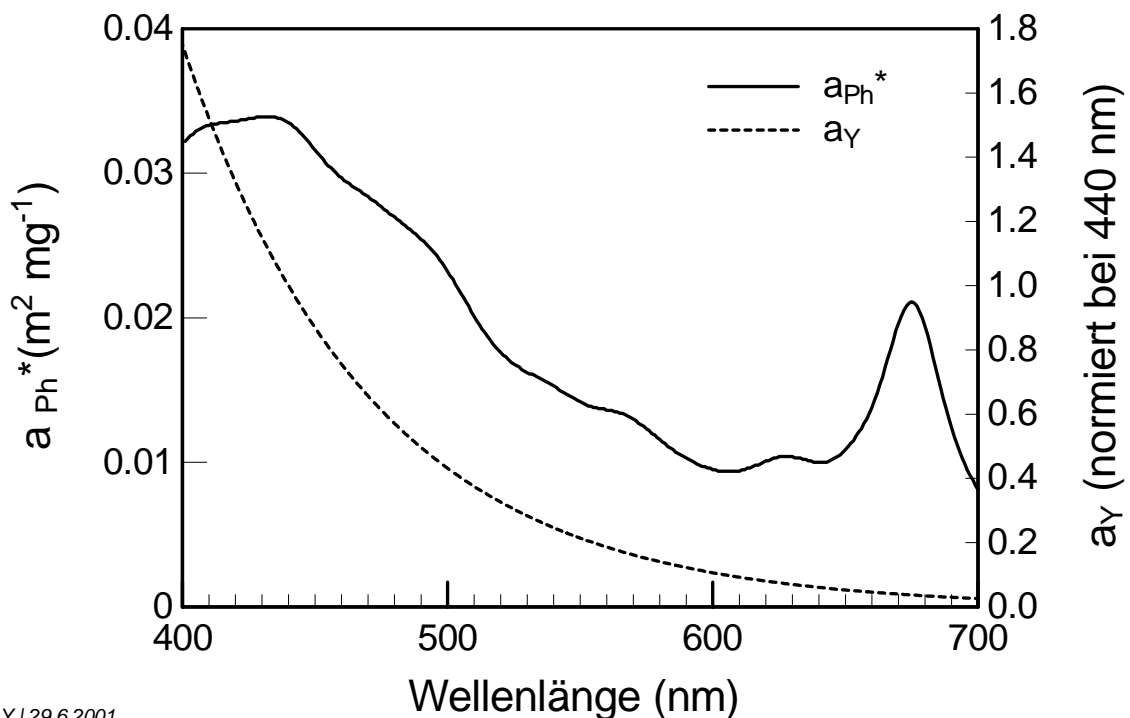
\* Universität Trier, Fachbereich VI, Geographie/Geowissenschaften, 54286 Trier

† DLR, Institut für Methodik der Fernerkundung - Gewässerfernerkundung, PF 1116, 82230 Weßling

untersuchen und durch die gewonnenen Erkenntnisse Möglichkeiten für Verbesserungen aufzuzeigen, um eine solide Grundlage für die künftige Nutzung in integrierten Seenüberwachungskonzepten zu gewährleisten.

## 2 Spezifische optische Eigenschaften der Wasserinhaltsstoffe

Als optisch meßbare Inhaltstoffe findet man im Bodensee Chlorophyll, Sediment und Gelbstoff. Hauptlieferant des Sediments ist der Alpenrhein. Das dominierende kalkreiche Sediment aus den Alpen sorgt für eine hohe Reflexion im gesamten Spektralbereich. Im bio-optischen Modell des Bodensees wird der Schwebstoff durch einen wellenlängenunabhängigen Rückstreuungskoeffizienten beschrieben. Die Algenkonzentration und Artenzusammensetzung schwankt innerhalb eines Jahres deutlich zwischen den Algenblüten und den Klarwasserphasen. Das mittlere spezifische Absorptionsspektrum von Phytoplankton ist in Abbildung 1 dargestellt. Es wurde aus 213 Messungen der Überwasserreflexion berechnet, die an 32 Tagen in den Jahren 1990 und 1991 durchgeführt wurden (Gege 1994). Heege (2000) hat gezeigt, daß dieses mittlere Spektrum in den Jahren 1990-96 gut geeignet war, um aus Flugzeugdaten (Daedalus-Scanner) und Unterwassermessungen der Reflexion (MER-Radiometer) die Chlorophyll-a-Konzentration durch Inversion zu bestimmen. Die Absorption der gelösten organischen Stoffe (Gelbstoff) folgt näherungsweise einer Exponentialfunktion mit einem Exponenten von  $0.014 \text{ nm}^{-1}$ . Sie ist ebenfalls in Abbildung 1 dargestellt.



AP\_AY | 29.6.2001

Abbildung 1 : Spezifische Absorption von Phytoplankton ( $a_{Ph}^*$ ) und Gelbstoff ( $a_Y$ ) im Bodensee.



### 3. Auswertung der in-situ Daten

In-situ Daten wurden an 5 Meßstellen für 3 Tiefen erhoben. Die Meßstellen liegen mittig zwischen dem nördlichen und dem südlichen Ufer, damit die korrespondierenden Fernerkundungsdaten nicht von Störeffekten im Flachwasserbereich durch Überstrahlungseffekte vom Land oder Reflexion vom Grund beeinflußt werden. Sie befinden sich im Ostteil des Sees. Meßpunkt A liegt in der Bregenzer Bucht, Meßpunkte B und C im Einflußbereich des Alpenrheins und Punkte D und E im Zentrum des Hauptbeckens (vgl. Abb.2).

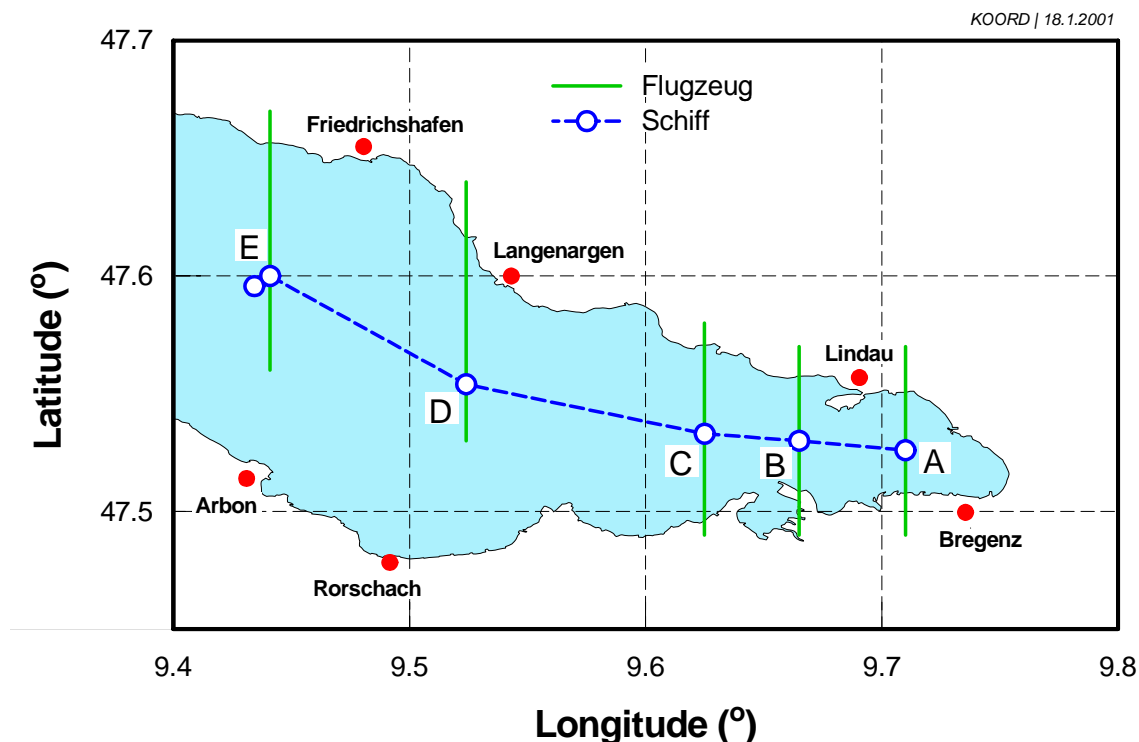


Abbildung 2: Übersicht Lage der in-situ Meßpunkte und der ROSIS Flugstreifen.

Die bio-chemischen Meßdaten sind auf Grund der unterschiedlichen Meßtechnik nicht direkt mit den Fernerkundungsdaten vergleichbar. Die Gewässerproben sind jeweils Punktmessungen, die Fernerkundungsdaten beziehen sich auf ein Tiefen- und Flächenintegral. Für die Vergleichbarkeit der Daten bedeutet das, daß aus den bio-chemischen Werten der einzelnen Tiefen eine Integralgröße abgeschätzt werden muß, die der Tiefenabhängigkeit des Fernerkundungssignals entspricht. Die Signaltiefe ist nicht konstant, sondern variiert in Abhängigkeit von der Konzentration der Wasserinhaltsstoffe. Zur Validierung der Fernerkundungsdaten wurden die in-situ Daten daher für jede Probestelle individuell gewichtet aufsummiert. Tabelle 1 vergleicht die berechneten Mittelwerte für den 10. Mai mit dem 15. Mai.

Man erkennt den Übergang von einer hohen Algenkonzentration mit Chlorophyllkonzentrationen um  $4,55 \mu\text{g/l}$  zu einer Klarwasserphase mit Chlorophyllkonzentrationen um nur  $2,63 \mu\text{g/l}$ . Gleichzeitig sinkt auch der Schwebstoffgehalt von  $1,43 \text{ mg/l}$  im Durchschnitt auf  $0,9 \text{ mg/l}$ . Der Gelbstoff erhöht sich geringfügig in der Bregenzer Bucht.

	10.Mai			15.Mai		
Station	Chlorophyll-a [µg/l]	Anorg. Schwebstoff [mg/l]	Gelbstoff [m <sup>-1</sup> ] (440 nm)	Chlorophyll-a [µg/l]	Anorg. Schwebstoff [mg/l]	Gelbstoff [m <sup>-1</sup> ] (440 nm)
A	2.98	1.66	0.30	2.35	1.30	0.34
B	4.90	2.57	0.27	2.06	2.50	0.30
C	4.70	1.93	0.28	2.95	0.39	0.29
D	6.00	0.60	0.29	3.53	0.18	0.29
E	4.21	0.40	0.25	2.26	0.30	0.25
MW	4.55	1.43	0.28	2.63	0.93	0.29

**Tabelle 1: Wasserinhaltsstoffkonzentrationen aus Wasserproben**

Die Werte aus Tabelle 1 werden im Folgenden zur Validierung der Satelliten- und Flugzeugdaten herangezogen werden. Dabei bleibt als Problem erhalten, daß sich die so aufbereiteten in-situ Daten nur auf dasselbe Tiefenintervall, wie die Fernerkundungsdaten, aber nicht auf dasselbe Flächenintegral beziehen. Die horizontale Fläche, aus der sich das Fernerkundungssignal ergibt, ist durch die Auflösung des Fernerkundungssensors gegeben. Bei dem untersuchten Sensor MOS ist dabei die Abweichung von der Punktmessung mit einer Auflösung von 520 m mal 520 m wesentlich höher als beim Flugzeugsensor mit einer Auflösung von 2 m mal 2 m (bei einer Flughöhe von 3000 m). Zieht man die Punktmessung als Vergleich für das räumliche Fernerkundungspixel heran, muß die Konzentration innerhalb des Pixels homogen sein. Davon kann man aber nicht ausgehen. Um die Variabilität der natürlichen Größen innerhalb der horizontalen Fläche des Satellitensensors ermitteln zu können, werden die Flugzeugdaten genutzt. Sie bieten mit ihrer hohen Auflösung die Möglichkeit, die Variabilität der Wasserinhaltsstoffe innerhalb eines Satellitenpixels abzuschätzen. Ein Ziel ist somit die Ableitung der Varianz der Wasserinhaltsstoffe aus den Flugzeugdaten. Bei diesen Daten kann der Fehler durch den unterschiedlichen räumlichen Bezug vernachlässigt werden, da er als geringer anzunehmen ist als der Fehler durch die zeitliche Abweichung der Messungen, die bis zu 2 Stunden betragen.

Bei den Satellitendaten beträgt die Abweichung ebenfalls bis zu 2 Stunden, da die Erhebung der Wasserproben ein großes Zeitfenster beansprucht, das 2 Stunden vor dem Moment des Überfluges beginnt und erst 2 Stunden danach endet. Durch die Seodynamik kann sich innerhalb dieser 2 Stunden ein nicht unerheblicher horizontaler Transport ergeben, so daß sich an der Meßstelle zur Zeit der in-situ Messung bereits ein anderer Wasserkörper befindet als zum Zeitpunkt der Fernerkundungsmessung. Je homogener die umgebene Fläche ist und je niedriger der horizontale Austausch, desto geringer ist der Fehler. Die Größe dieses Fehlers durch Analyse der Windgeschwindigkeiten oder Konzentrationsvergleiche zwischen Anfang und Ende des Messintervalls zu bestimmen, konnte bisher noch nicht erfolgen, ist aber geplant.

## 4. ROSIS-Daten

RODIS ist ein Sensor, der spektral, radiometrisch, sowie räumlich hochauflösende Daten bietet. Gerade für den Anwendungsbereich der Gewässerfernerkundung bietet er damit beste Voraussetzungen, aber auch für andere Bereiche der Umwelt- und Klimaforschung, z.B. für die Untersuchung des Vegetationszustands. Ein wichtiger Aspekt bei der Entwicklung des ROSIS war auch, die Nutzung spektral hochauflösender Satellitendaten vorzubereiten.

ROSIS ist eine Gemeinschaftsentwicklung des Unternehmensbereichs Raumtransportsysteme und Antriebe der Firma MBB (heute: ASTRIUM) in Ottobrunn, dem Institut für Gewässerphysik des GKSS-Forschungszentrums Geesthacht und dem Institut für Optoelektronik (heute: Institut für Methodik der Fernerkundung) des DLR am Standort Oberpfaffenhofen. ROSIS kann in 115 Kanälen von 4 nm Breite im Wellenlängenbereich zwischen 430 und 880 nm aufzeichnen. Im Artikel „Das abbildende Spektrometer ROSIS“ von S. Thiemann et al. in diesem Tagungsband finden sich ausführlichere Informationen zum ROSIS.

Die ROSIS-Daten mit einer Bodenauflösung von 2 m können dazu dienen, etwas über die kleinräumige und kurzzeitige Dynamik der Verteilung der Wasserinhaltsstoffe zu erfahren, da sie für beide Tage in einem zeitlichen Abstand von etwa drei Stunden aufgenommen wurden. Um einen Eindruck vom Ausmaß dieser Variationen innerhalb des Sees im Laufe eines Tages zu bekommen, ist ein erster Schritt, die 20 Flugstreifen der beiden Meßtage auf Muster im Wasserkörper hin zu untersuchen. Um dabei die Information aus den 115 Kanälen optimal nutzen zu können und Störeffekte in einzelnen Spektralkanälen zu vermindern, werden die Flugstreifen durch digitale Bildverarbeitung in ein dreikanaliges Echtfarbenvbild transformiert, wobei Rauschen durch Mittelung oder Ausschluß von einzelnen Kanälen verringert wird. Die Bildtransformation erfolgt auf Grundlage der optischen Wahrnehmung des Auges (response Funktion) (M.DETTLING, 1998).



**Abbildung 3: Echtfarbbilder aus ROSIS Daten: Rheinvorstreckung und Schussenmündung.**

Die Interpretation dieser optisch bearbeiteten Daten kann durch die Meßwerte belegt werden. So erkennt man eine Abnahme des Chlorophylls vom 10. bis zum 15. Mai durch die Umfärbung des Wasser, die sich durch die in-situ Daten bestätigen läßt (vgl. Tabelle 1: Abnahme von 4,6  $\mu\text{g/l}$  auf 2,6  $\mu\text{g/l}$ ). Die Gehalte an anorganischen Schwebstoffen, die

hauptsächlich durch den Alpenrhein in den See eingetragen werden, sind im Rhein und in seinem Mündungsgebiet höher als in vom Rhein unbeeinflussten Seebereichen. Ein weiteres interessantes Detail in den ROSIS Daten, das aus den anderen Daten nicht ersichtlich ist, zeigt die Dynamik der Schussenmündung im Zeitvergleich. Das Einströmen wird durch die erhöhte Konzentration von Gelbstoffen sichtbar und zeigt innerhalb von 2 Stunden eine deutlich verändertes Verhalten. Die Untersuchung der Schussen ist von Interesse, da sie nicht nur Gelbstoffe, sondern auch Schadstoffe einbringt.

Diese optischen Auswertungen geben einen ersten Hinweis auf die Möglichkeiten, die der Flugzeugsensor für die Nutzung zur Gewässerfernerkundung bietet. Um neben dieser qualitativen Auswertung eine quantitative Analyse zu ermöglichen, müssen Wasserinhaltsstoffkarten abgeleitet werden. Es steht aber noch kein Programm zur Verfügung, das die volle spektrale Information des ROSIS nutzen kann, um Wasserinhaltsstoffkarten zu erstellen. Daher wurde das Programm MIP (Modular Inversion Programm) benutzt, das für den Sensor Daedalus operationalisiert wurde (T. HEEGE, 2000). Da ROSIS eine größere Anzahl von Kanälen besitzt, kann das Programm nicht direkt auf ROSIS-Daten angewendet werden. Viele Programmteile sind außerdem auf Grund des kleineren Blickwinkels und des eingeschränkten Infrarotbereichs nicht direkt übertragbar. Dies betrifft vor allem die Bestimmung der Aerosolparameter. Um das Programm nutzen zu können, wurden daher aus den hyperspektralen ROSIS-Daten sechs künstliche Kanäle berechnet, die als Eingabe für das Programm MIP dienen (siehe Tabelle 2). Damit geht ein Teil der spektralen Information des ROSIS verloren.

Tabelle 2: Eingabekanäle für das Atmosphären - und Inversionsprogramm MIP

Künstliche Kanäle	1*	2	3	4	5	6*
Wellenlänge [nm]	447-480	490-510	532-568	614-634	654-700	700-720

\* Kanäle die nur für die Atmosphärenkorrektur genutzt werden, nicht zur Inversion

Da der Programmteil der Atmosphärenbestimmung nicht übertragen werden konnte, werden die Aerosolparameter für die Atmosphärenkorrektur als a priori Wissen vorgegeben. Da es keine Messungen dazu gibt, müssen sie geschätzt werden. Die Atmosphärenkorrektur wurde daher auf jenen Bildstreifen optimiert, der den geringsten zeitlichen Versatz zur in-situ Messung hat, um dort die Varianz der Konzentrationen im Vergleich zur in-situ Messung innerhalb des Satellitenpixels zu bestimmen. Auch die anderen Flugstreifen wurden mit diesen Aerosolparametern gerechnet. Damit ergeben sich Fehler in den Absolutwerten der Konzentrationen, da sich die Atmosphäre innerhalb des Tages verändert und eigentlich für jeden Flugstreifen eine andere Anpassung nötig wäre. Ein absoluter Vergleich ist jedoch nicht Ziel der Arbeit, sondern die relative Variabilität der Inhaltsstoffe zu untersuchen. Aus den atmosphärenkorrigierten Werten erfolgt die Berechnung der Wasserinhaltsstoffe über Inversion der Spektren. Die Inversion erfolgt dabei mittels SIMPLEX-Algorithmus (downhill simplex method nach Nelder und Mead, 1965, als FORTRAN-Routine aus Press et al., 1989) durch Anpassung von aus den spezifischen optischen Eigenschaften der Wasserinhaltsstoffe simulierten diffusen Reflexionsspektren an die aus den Fernerkundungsdaten berechneten Spektren (diffuse Reflexion unterhalb der Wasseroberfläche). Damit der Algorithmus stabiler und schneller läuft, wird dem SIMPLEX eine Näherungsrechnung vorgeschaltet, die die Schwebstoffe als Linearkombination aus den Reflexionswerten und das Phytoplankton und die Gelbstoffe über die Absorption basierend auf der umgeformten Gordon-Formel (Gordon et al. 1975) aus einer multivariaten Optimierung der Kanalkombination schätzt. Mit diesen Werten als Startwerte wird dann im SIMPLEX-Algorithmus über Least-Squares-Fit die Anpassung der modellierten an die gemessenen Spektren durch Variation der

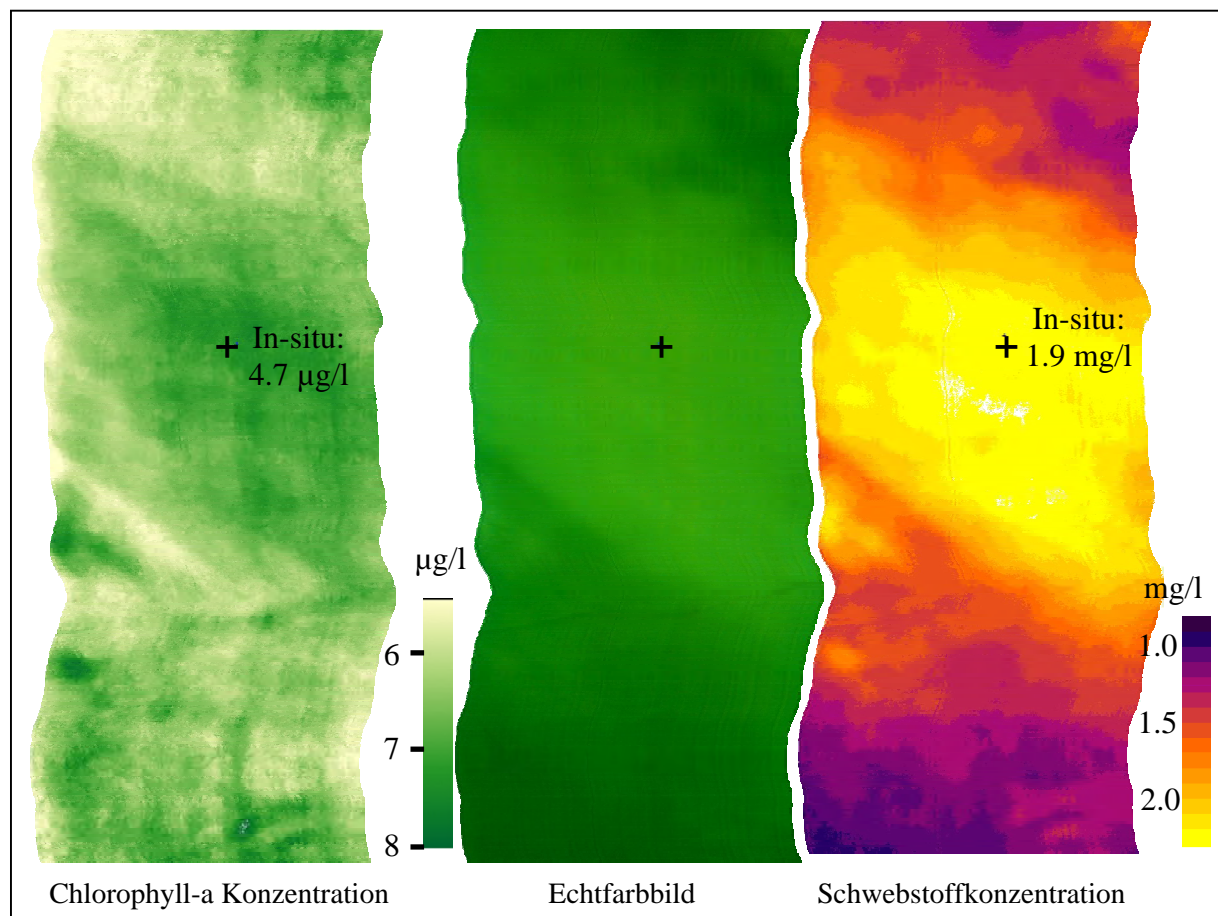
Wasserinhaltsstoffe iterativ optimiert, bis sich keine weitere Verbesserung erzielen läßt. Die so aus den Fernerkundungsspektren ermittelten Konzentrationen werden für jeden Inhaltsstoff getrennt in einer Bilddatei abgelegt.

Für den Bereich der Bregenzer Bucht, in dem der erste Meßpunkt liegt, lassen sich aus der so ermittelten Chlorophyll- und Schwebstoffkonzentrationskarte Varianzen von 0,16  $\mu\text{g/l}$  für Chlorophyll und von 0,0042  $\text{mg/l}$  für Schwebstoff ableiten (innerhalb 600 m x 600 m). Die ermittelten absoluten Chlorophyll-Konzentrationen liegen mit etwa 2,9  $\mu\text{g/l}$  (Tabelle 3) im Bereich der in-situ Konzentration von 3,0  $\mu\text{g/l}$  (Tabelle1), die Schwebstoffkonzentrationen überschätzen mit etwa 0,8 $\text{mg/l}$  den in-situ Wert von 0,4  $\text{mg/l}$ . Ein direkter Vergleich mit dem Meßpixel selbst ist leider nicht möglich, da am Meßpunkt auf den Flugzeugaufnahmen das Forschungsschiff und nicht der Wasserkörper zu sehen ist.

Meßareal (MW)	Chlorophyll		Sediment	
	MW	Sigma	MW	Sigma
600 m x 600 m	2.87	0.40	0.82	0.06

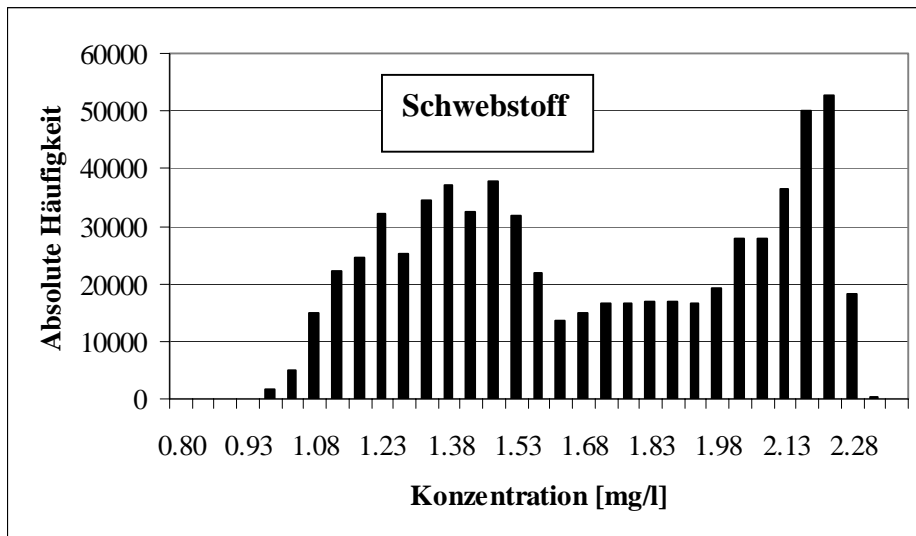
**Tabelle 3: Varianz der Wasserinhaltsstoffe innerhalb von 360.000 m<sup>2</sup> aus ROSIS-Daten**

Die Dynamik innerhalb der Bregenzer Bucht ist nicht besonders groß, daher zeigt Abbildung 4 die Chlorophyll- und Schwebstoffkarten für den dritten Meßpunkt, der im Einfluß des einströmenden Rheinwassers liegt. Es läßt sich ein Unterschied zwischen dem vom Rhein mit Schwebstoffen angereicherten Seewasser und dem umgebenden Seewasser erkennen.



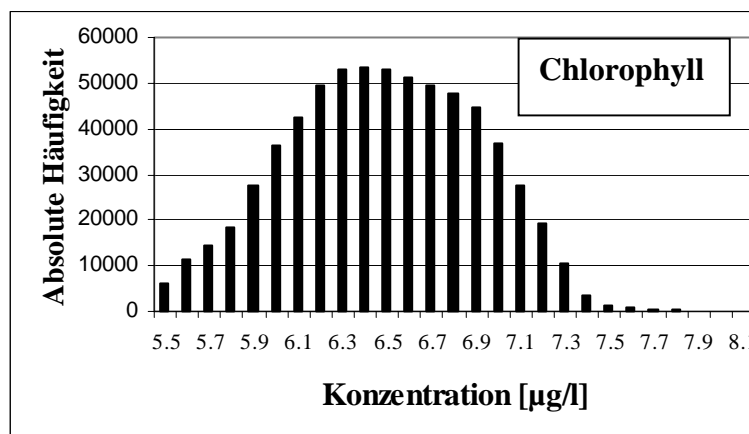
**Abbildung 4 : Vergleich Echtfarbbild und Wasserinhaltsstoffkonzentrationskarten**

Die Konzentrationswerte des Chlorophylls liegen mit etwa 7  $\mu\text{g/l}$  etwas zu hoch (4,7  $\mu\text{g/l}$  in-situ), da die Atmosphärenkorrektur nicht optimal ist, aber es lassen sich eindeutig Strukturen im Wasserkörper erkennen. Obwohl Fehlerquellen beim Erstellen der Konzentrationskarten in Kauf genommen wurden, lassen sich Details und Informationen aus den Karten herauslesen, die aus dem reinen Echtfarbbild nicht hervorgehen. Es handelt sich dabei um physikalisch erklärable Strukturen. Die erhöhte Konzentration an Schwebstoffen wird durch einfließendes Rheinwasser verursacht. Dieses Phänomen zeigt sich auch im zugehörigen Histogramm, das eine zweigipflige Verteilung zeigt, die sich aus den zwei Grundgesamtheiten Seewasser (um 1,38 mg/l) und Rheinwasser (um 2,2 mg/l)(in-situ 1,9 mg/l) zusammensetzt (Abbildung 5a).



**Abbildung 5a : Häufigkeitsverteilung der Konzentrationen für den Bildausschnitt in Abb.3**

Somit kann man im Streifen 3 auch in 2,5 km Entfernung von der Mündung noch den Verlauf des Rheinwassers bestimmen, das sich mit Konzentrationen von 2,2 mg/l vom umgebenden Wasser mit 1,38 mg/l deutlich abhebt. Das liegt daran, daß sich das Rheinwasser generell mit Konzentrationen von 11,4 mg/l im Bereich der Vorstreckung und in Mündungsnähe mit immer noch 5,5mg/l deutlich vom restlichen Seewasser unterscheidet. (vgl. Abb.3, ist durch hellere Färbung zu erkennen). Dies zeigt, welche Möglichkeiten der Sensor ROSIS für die Gewässerfernerkundung bietet. Die Strukturen im Chlorophyll sind weniger auffällig, was sich auch in dem ausgeglichenen Histogramm widerspiegelt.



**Abbildung 5b : Häufigkeitsverteilung der Konzentrationen für den Bildausschnitt in Abb.3**

Probleme des vorgestellten Inversionsverfahren sind einerseits, daß für den ROSIS keine automatische Atmosphärenkorrektur als Modul vorhanden ist und andererseits, daß die Kalibration des ROSIS im Blauen fehlerhaft ist. Der Rekalibrationsfaktor, durch den das korrigiert wird, ist nur ungenau bestimmt. Wünschenswert wäre außerdem eine volle Ausnutzung der spektralen Information, die den ROSIS eigentlich besonders für die Gewässerfernerkundung auszeichnet und in diesem Verfahren nicht genutzt werden konnte. Ein eigenständiges für den ROSIS entwickeltes Inversionsprogramm könnte diese Probleme lösen. Der Sensor ROSIS macht durch seine höhere räumliche Auflösung wesentlich mehr Details sichtbar als der Satellitensensor MOS. Daher wäre er grundsätzlich für die Seenüberwachung zu bevorzugen, praktisch kann er aber die Satellitenfernerkundung nicht ersetzen, da er nicht auf einem operationell einsetzbaren Flugzeug betrieben wird. Jedoch kann er eingesetzt werden, um neue Algorithmen für neue Anwendungen der Fernerkundung zu erproben, z.B. die Unterscheidung von Algenklassen unter Auswertung der hohen spektralen Auflösung.

## 5. MOS-Daten

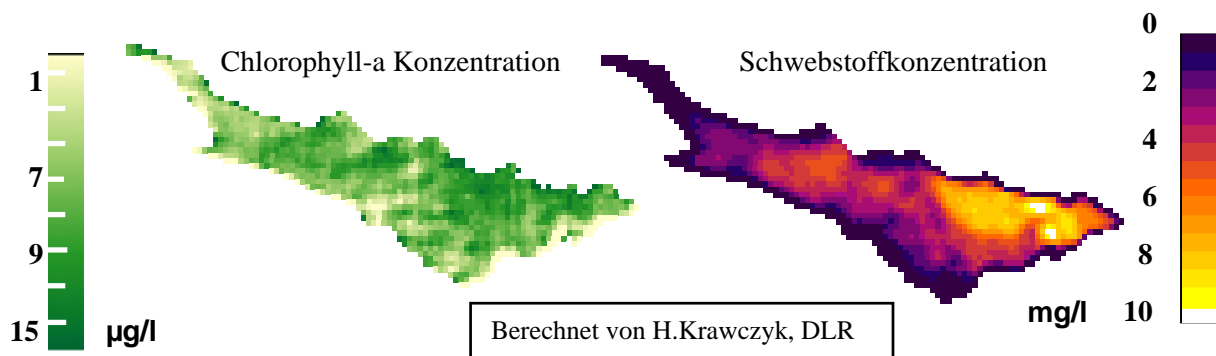
MOS ist ein abbildendes Spektrometer, das vom DLR-Institut für Weltraum-Sensor-Technik im März 1996 in 817 km Höhe in Umlauf gebracht wurde. Es wurde speziell für die Fernerkundung von Ozean-Atmosphären Systemen entwickelt. Es hat 17 Spektralkanäle, vier im Bereich der Sauerstoffabsorptionsbanden um 760 nm (1,4 nm Breite) für die Atmosphärenuntersuchung (MOS-A) und 13 Kanäle im sichtbaren Licht und nahen Infrarot von 408 nm bis 1010 nm (10 nm Breite) für die Gewässerfernerkundung (MOS-B). MOS-B hat eine Bodenauflösung von 520 m mal 520 m. Da dieser Sensor speziell für die Fernerkundung über den Ozeanen angepaßt wurde, sind mehrere Algorithmen entwickelt worden, um aus den MOS-B Daten die Wasserinhaltsstoffe (Chlorophyll-a, Schwebstoff und Gelbstoff) im Ozean zu bestimmen.

Ein Ansatz dazu ist die Hauptkomponenteninversion, kurz PCI (Principal Component Inversion). Der PCI Algorithmus wurde von H. Krawczyk et al. (1993) für den Ozean entwickelt und hauptsächlich für die Ostsee validiert und optimiert. Die mathematische Motivation für die Nutzung des PCI ist, einen einfachen und stabilen Ansatz für die Berechnung von Wasserinhaltsstoffen aus dem Strahlungsspektrum zu entwickeln, der leicht an regionale oder saisonale Besonderheiten angepaßt werden kann. Daher wird eine quasi lineare Beziehung zwischen den Strahlungsdichtespektren und geophysikalischen Werten aufgestellt, welches mittels Strahlungstransfermodellierung, Informationstheorie und Multivariater Statistik mathematisch formuliert und physikalisch parametrisiert wird.

Eine Besonderheit des PCI im Vergleich zu anderen Ansätzen ist, daß er das gekoppelte System Atmosphäre-Wasser gleichzeitig zu lösen versucht. Die Überlegung entstand aus der Problematik heraus, daß die traditionellen Ansätze, die eine vorherige Atmosphärenkorrektur voraussetzen, nicht angewendet werden können, da sie auf der Bestimmung der Aerosole im Infrarot beruhen. Diese Rechnung setzt voraus, daß im Infrarot das Fernerkundungssignal auf Grund der hohen Wasserabsorption in Wellenlängen über 700 nm als reines Atmosphärenstreulicht aufgefaßt werden kann. Bei Gewässern mit hohen Anteilen an streuenden Teilchen, wie in Küsten- und Binnengewässern oft der Fall, ist dieser Ansatz jedoch nicht gültig.

Im Modell werden die in Kapitel 2 beschriebenen Bodensee-spezifischen optischen Eigenschaften der Wasserinhaltsstoffe verwendet. Diese Anpassung des Programms ist einfach durchzuführen, da die Inversion mit einer look-up Tabelle arbeitet. Diese wird im ersten Schritt des Programmes durch eine Vorwärts-Modellierung generiert, die aus den spezifischen optischen Eigenschaften der Wasserinhaltsstoffe für den in der Region auftretenden Konzentrationsbereich Spektren für die Kanäle des Sensors generiert. Die Wellenlängenabhängigkeit der Aerosolstreuung wird dabei über den Angström-Koeffizienten modelliert. Der zweite Schritt ist die Inversion des gemessenen Signals in die Konzentrationen der Wasserinhaltsstoffe und der atmosphärischen optischen Dicke. Die Bestimmung der optimalen Kanalkombination für die einzelnen Wasserinhaltsstoffe für die Inversion erfolgt über die Hauptkomponentenanalyse. Da die für die Modellierung der Wasserinhaltsstoffe optimale Kanalkombination von den Konzentrationen der Stoffe selbst abhängig ist, ist eine solche Untersuchung nötig, um eine für die jeweils vertretenen Komponenten optimierte Vorgehensweise zu bestimmen. Als mathematischer Ansatz eignet sich die Hauptkomponentenanalyse in diesem Zusammenhang vor allem deshalb, da sie die voneinander unabhängigen Faktoren, welche den Informationsinhalt einer Szene bestimmen, separiert.

In einer ersten Untersuchung der erstellten Wasserinhaltsstoffkarten zeigte sich die enorme Empfindlichkeit der Berechnung gegenüber den Atmosphärenbedingungen. Die Erfahrungswerte über der Ostsee waren nicht geeignet für die vorliegenden Szenen vom Bodensee. Die Extinktion durch die Atmosphäre wurde mit dem Ostseemodell unterschätzt, was zu einer Überschätzung der Gelbstoffkonzentrationen führte. Die dickere Atmosphäre schwächt insgesamt das Signal aus dem Wasserkörper, so daß die Trennung in die Komponenten schwieriger wird. Außerdem liegen die Konzentrationen der Wasserinhaltsstoffe unter denen in der Ostsee und weisen eine kleinere Variabilität auf. Auch aus diesem Grund sind die Anforderungen an die Nachweisempfindlichkeit des Algorithmus über Binnengewässern wesentlich höher als über dem Ozean. Deshalb bereitet auch nach der Anpassung des Algorithmus an die Verhältnisse im Bodensee die Bestimmung des Gelbstoffes Probleme. Er konnte für das Beispiel am 10.5.2000 nicht aus den MOS-Daten ermittelt werden.

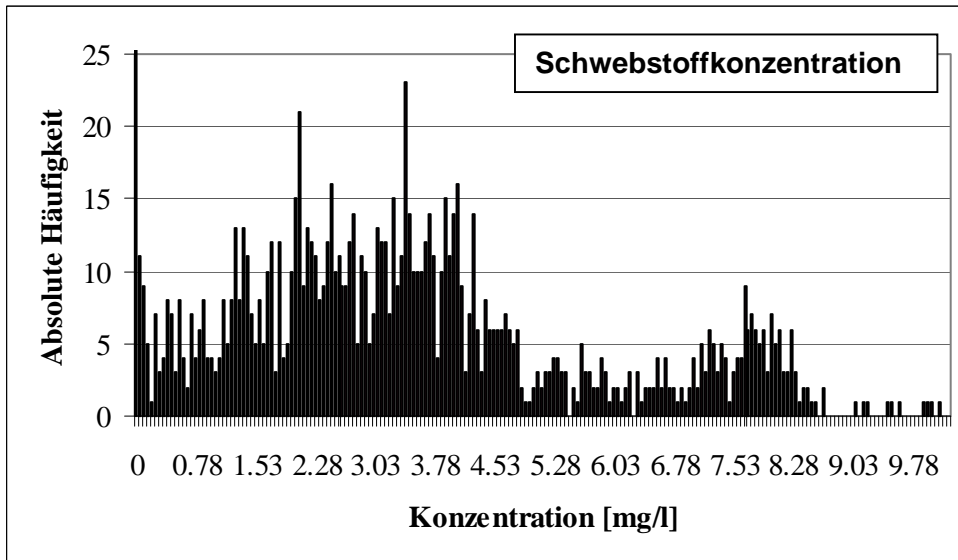


**Abbildung 6. Konzentrationskarten aus MOS-Daten für den gesamten See 10.5.2000**

In den Schwebstoffkarten erkennt man deutlich das Einströmen des Rheins in den Bodensee. Die höchsten Konzentration sind direkt im Mündungsbereich, aber auch in der Nähe des nord-östlichen Ufers von Lindau bis Langenargen zu finden. Somit liegen sie außerhalb der üblichen Meßstelle der biochemischen Probenahme und werden nicht erfaßt. Die Auswertung dieser Struktur ist somit nur in den Fernerkundungsdaten möglich. Gleichzeitig zeigen die Konzentrationskarten, daß die Meßpunkten A, B und C im Bereich der Schwebstoffwolke liegen und in den Punkten D und E außerhalb. Man findet diese zwei Grundgesamtheiten,

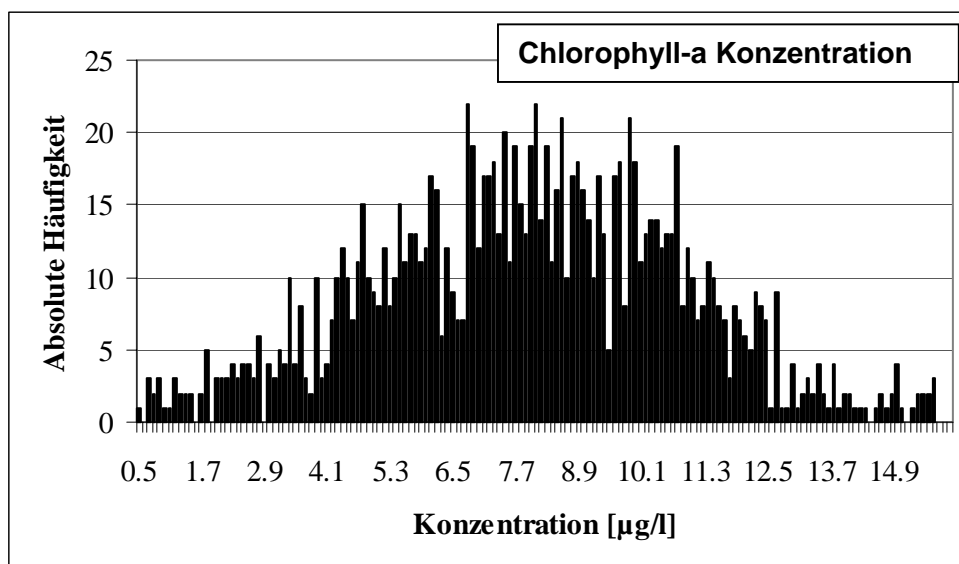


genau wie in dem ROSIS Ausschnitt um Meßpunkt C herum, auch in dem Histogramm der MOS-Daten über die gesamte Seefläche wieder. Die Konzentrationen um 8 mg/l sind in der direkten Mündungsnähe zu finden und gehen dann über ein kleines Plateau bis 5 mg/l langsam in den restlichen Seekörper über, der nochmal ein Nebenmaximum bei etwa 3,5 mg/l im westlichen See hat.



**Abbildung 7a: Häufigkeitsverteilung der Konzentrationen am 10.5.2000 für den gesamten See**

Die Chlorophyllverteilung bietet weniger eindeutige Strukturen und ein ausgeglicheneres eingipfliges Histogramm.



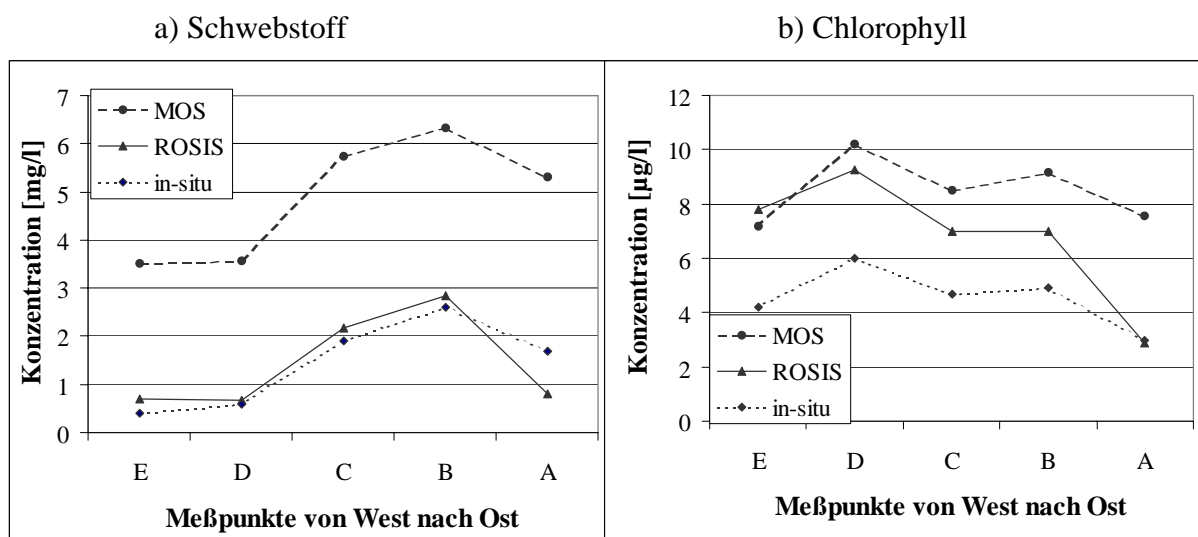
**Abbildung 7b: Häufigkeitsverteilung der Konzentrationen am 10.5.2000 für den gesamten See**

Man erkennt aus den Konzentrationskarten eindeutig physikalisch begründete Strukturen und nicht korrelierte Verteilungen. Die Ergebnisse sind plausibel, liegen aber etwas höher als die in-situ Daten. Dieser Offset ist ziemlich konstant und liegt bei den Chlorophyllkonzentrationen bei 4 µg/l und bei den Sedimentkonzentrationen bei 3 mg/l. Die Ursache dieser Überhöhung der Werte konnte im Rahmen der Arbeit nicht geklärt werden.

und muß durch weitere Detailuntersuchungen noch behoben werden. Ansonsten kann man feststellen, daß der Algorithmus durchaus auf den Bodensee übertragbar ist und eine Menge an Information über die Seedynamik und die Verteilung der Wasserinhaltsstoffe sichtbar macht, die über das normale limnologische Meßprogramm hinausgeht. Auch die Chlorophyllkonzentration zeigt große Variabilität innerhalb des Sees, die zu Fehlern in der Abschätzung der Gesamtbiomasseproduktion des Sees aus nur wenigen limnologischen Meßpunkten führt im Gegensatz zu einer möglichen flächenhaften Auswertung mit Satellitendaten.

## 6. Zusammenfassung

Sowohl aus den ROSIS- als auch die MOS-Daten können Wasserinhaltsstoffkarten abgeleitet werden, aus denen die Verteilungsmuster der Wasserinhaltsstoffe im See deutlich werden. Der große Vorteil der durchgeführten Meßkampagnen liegt in dem gleichzeitigen Einsatz von zwei unterschiedlichen Fernerkundungssensoren und der Anwendung von unabhängigen Verfahren zum Ableiten der Wasserinhaltsstoffe. Aus der Analyse der Daten ergeben sich die gleichen Strukturen, was bestätigt, daß die Strukturen physikalischen Ursprungs sind. Außerdem sind viele der Strukturen auch in den optisch aufbereiteten Daten zu erkennen. Damit kann die Validierung über den reinen Vergleich mit den in-situ Daten hinausgehen, aus denen diese Strukturen nicht erkennbar sind, da fünf Punktmessungen dafür nicht ausreichen. Abbildung 8 zeigt eine zusammenfassende Gegenüberstellung der Daten, aus der hervorgeht, daß trotz Unterschieden in den absoluten Werten alle drei Meßreihen die gleiche Struktur aufweisen. Für den ROSIS könnte man mit einer anderen Atmosphärenmodellierung diese Anpassung wohl noch verbessern.



**Abbildung 8: Vergleich der Ergebnisse der Bestimmung der Konzentrationen für den 10.5.2000**

Zusammenfassend läßt sich sagen, daß man für den Bodensee aus Fernerkundungsdaten mit ausreichender Genauigkeit Wasserinhaltsstoffe bestimmen kann, wobei sie durch die flächenhafte Erfassung ein Erkenntnisgewinn im Vergleich zu dem normalen hydrologischen Punkt-Meßprogramm bieten. Für eine automatische Einbindung in ein Seenüberwachungsprogramm sind jedoch noch weitere Schritte in der Verbesserung der Genauigkeit der absoluten Werte nötig. Dabei muß ein Schwerpunkt in der richtigen Korrektur der Atmosphäre liegen.

## 7. Dank

*Dank an Harald Krawczyk für die Anpassung des PCI Algorithmus und die Bereitstellung der Daten, sowie an Thomas Heege für die Umformung seines Algorithmus.*

## 8. Literaturverzeichnis

**DETLING, M. (1998):** Synthese von digitalen Bildern mit „natürlicher“ Farbdarstellung aus multispektralen und hyperspektralen Bilddaten von flugzeug- und satellitengetragenen Sensoren. Diplomarbeit, Photoingenieurwesen, Fachhochschule Köln.

**GAEDKE, U., BÄUERLE, E. (Hg.):** Lake Constance, Characterization of an ecosystem in transition. *Advanc. Limnol.* 53, p. 179-193, Dezember 1998.

**GEGE, P. (1994):** Gewässeranalyse mit passiver Fernerkundung: Ein Modell zur Interpretation optischer Spektralmessungen. Dissertation. DLR-Forschungsbericht 94-15, 171 S.

**HEEGE, T. (2000):** Flugzeuggestützte Fernerkundung von Wasserinhaltsstoffen am Bodensee. Dissertation. DLR-Forschungsbericht 2000-40, 134 S.  
Harald

**KRAWCZYK, H., NEUMANN, A., HETSCHER, M.:** Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD): MOS-IRS Ocean Colour Level-2 Algorithm. DLR Institute of Space Sensor Technology and Planetary Exploration

**ZIMMERMANN, G., NEUMANN, A. (2000):** The Imaging Spectrometer Experiment MOS on IRS-P3 – Three Years of Experience. *Journal of Spacecraft Technology*, Vol.10, No.1, January 2000.

## 3D-Stadtmodelle mit dem CyberCity Modeler – Generierung und Echtzeitbegehung

Gemeinsame Tagung der DGPF, SGPBF, ÖVG, DLR Konstanz 2001

**FRANZ STEIDLER<sup>1</sup> UND MICHAEL BECK<sup>2</sup>**

**Zusammenfassung.** Virtuelle 3-D Stadt- und Werksmodelle nehmen im Geodatenmarkt eine immer grössere Bedeutung ein. Der an der ETH Zürich ursprünglich begonnene *CyberCity Modeler* wurde von CyberCity AG weiterentwickelt. Mit den Produkten *TerrainView* und *CityView* der ViewTec AG können die mit dem *CyberCity Modeler* generierten Daten in Echtzeit visualisiert werden.

### 1. Einführung

In stark zunehmendem Umfang verlangen viele Disziplinen wie Stadt- und Regionalplanung, Telekommunikation, Umweltwissenschaften, Versicherungswesen, Tourismusindustrie, Denkmalschutz, etc. nach 3-D Daten städtischer und ländlicher Bereiche in digitaler und strukturierter Form. Das System dient Architekten, Stadt- und Verkehrsplanern zur Visualisierung ihrer Objekte in der natürlichen Umgebung und zur Berechnung von Immissionen und damit zur Verhinderung von Einsparungen. Weiterhin hilft es Tourismusmanagern zur Darstellung von Sehenswürdigkeiten, Restaurants und Hotels. Energieversorger benötigen es zur optimalen Ausrichtung von Solarzellenanlagen, Mobilfunkbetreiber zur Bestimmung von Antennenstandorten, Versicherungen zur Beurteilung von Gefahren bei gefährlichen Transporten oder Naturkatastrophen.

Virtual Reality (VR) Systeme werden in der heutigen Zeit zur 'Echtzeit-Visualisierung' dreidimensionaler Sachverhalte in verschiedenen Gebieten wie beispielsweise Chemie, Medizin, Simulation, Konstruktion, Design und Architektur erfolgreich eingesetzt. Nur wenige dedizierte Forschungsprototypen befassen sich mit der interaktiven räumlichen Darstellung grosser geographischer Datenmengen. Diese Systeme sind weder generisch noch portabel und oft nur auf einer wirtschaftlich unrentablen Grafik-Superworkstation lauffähig. Das VR System, das in diesem Beitrag vorgestellt wird, bietet neu die Möglichkeiten der Echtzeitdarstellung grosser Geländedatenbasen auf kostengünstigen Hardware-Plattformen.

Konventionelle Geographische Informationssysteme, welche auf einem Datenbanksystem beruhen, bieten eine Vielzahl von Operationen auf geographischen Daten an, ohne das in einem Virtual Reality System gewünschte 'Echtzeitverhalten' für den Zugriff auf mehrdimensionale Daten zu bieten. Mit dem VR System *TerrainView Cyber Motion GIS* wird neu die Möglichkeit aufgezeigt, intuitiv auf GIS Datenbanken zugreifen zu können.

## 2. Datenfluss des CyberCity Modelers (CCM) [CyberCity01]

Folgende Arbeitsschritte sind erforderlich zur Generierung der 3D-Modelle:

1. Erfassen der Geometrie aus photogrammetrischen Stereomodellen
2. Kontrollieren und ggf. Editieren
3. Verschneiden der Trauflinien mit dem Digitalen Geländemodell
4. Dachüberstände: Verschneiden von Grundrissen mit den Dächern
5. Anbringen der Texturen der Dächer
6. Anbringen der Texturen der Fassaden
7. Anbringen der Texturen des Geländes

Abbildung 1 zeigt den Datenfluss.

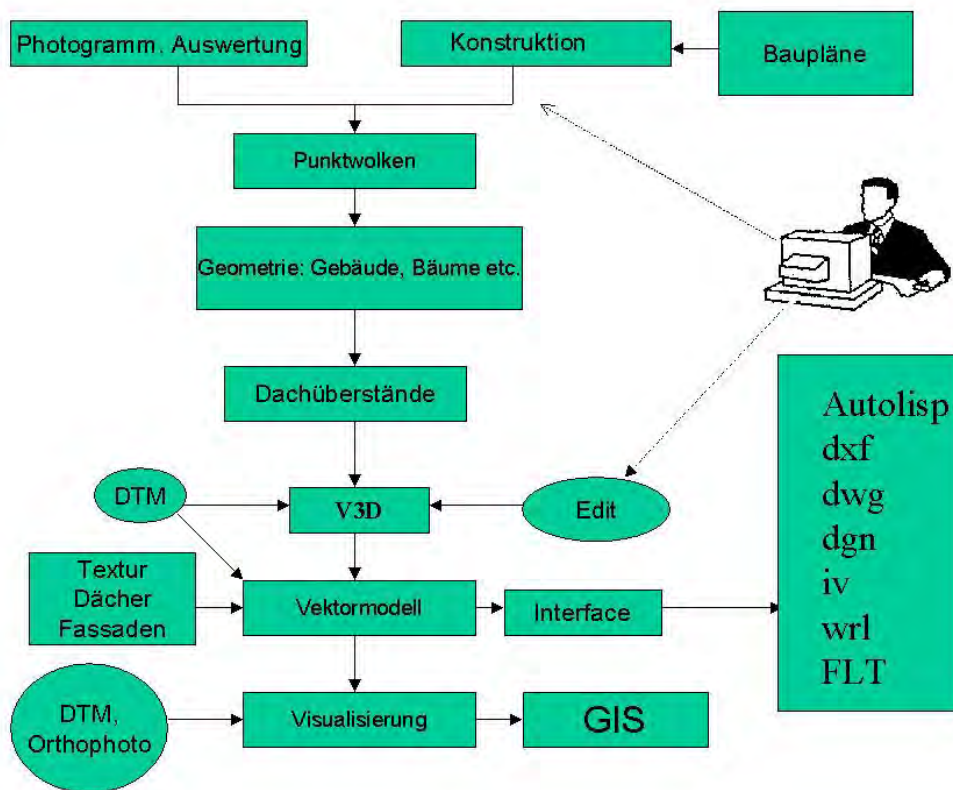


Abbildung 1: Datenfluss zur Generierung und Visualisierung von 3D-Stadtmodellen

### 2.1 Erfassung der Geometrie aus photogrammetrischen Stereomodellen

Dieses Verfahren wurde bereits in Grün, Steidler, Wang (2000) ausführlich beschrieben. Bei der Datenerfassung werden die Einzelpunkte des Objekts nach zwei Typen entsprechend ihrer Funktion und Struktur kodiert: Dachbegrenzungspunkte und innere Punkte. Es liegt in der

Verantwortung des Operators, den Detaillierungsgrad je nach Aufgabenstellung selbst zu bestimmen. Die gemessenen Punkte werden automatisch strukturiert und zu Flächen umgewandelt. Als Ergebnis liefert der *CCM* sämtliche Oberflächenbeschreibungen und speichert die Daten objektweise im internen V3D-Format.

Abbildung 2 zeigt die Benutzeroberfläche des *CyberCity Modeler*.

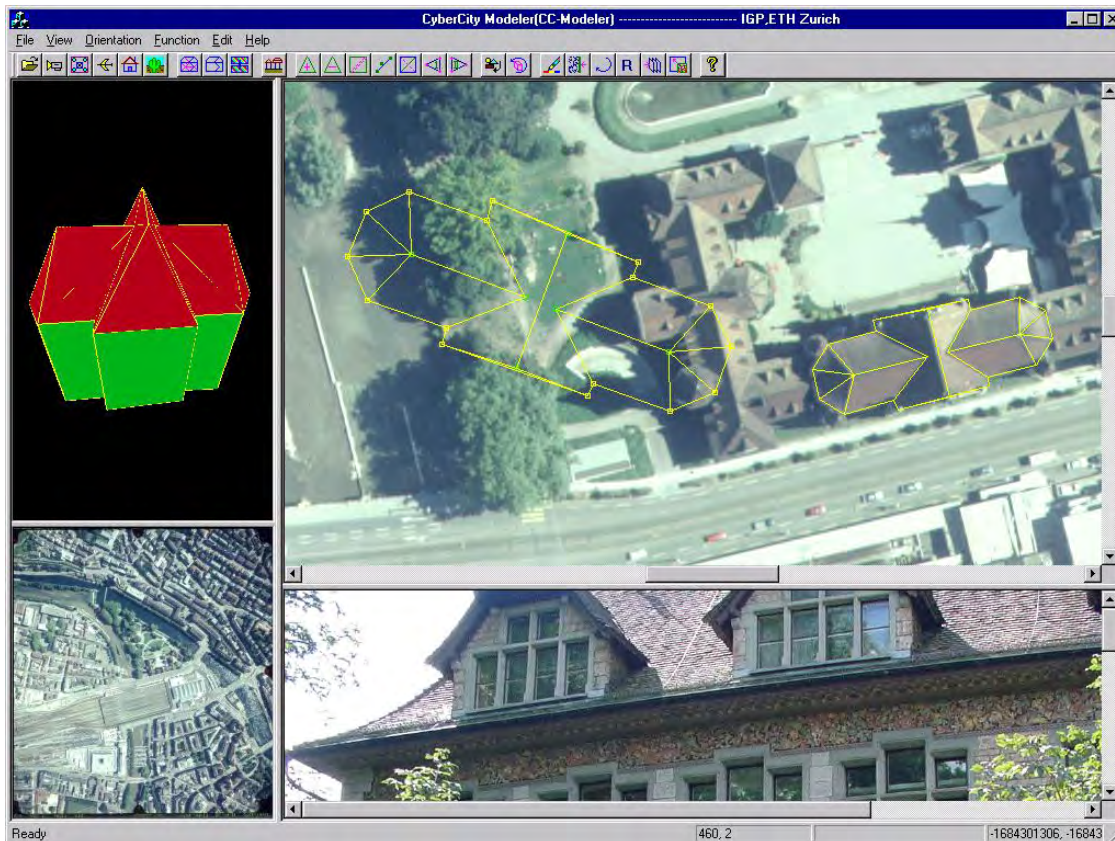


Abbildung 2: Benutzeroberfläche des *CCM*

## 2.2 Kontrollieren und ggf. Editieren

Die 3D-Modelldaten können je nach den Anforderungen auch editiert werden, wobei einige Editierfunktionen auch automatisch ablaufen können. Es stehen über 20 editierfunktionen zur Verfügung. Darunter fallen Funktionen wie Rechtwinkligkeit, Anhalten von gleichen Höhen der Traufen- und Firstlinien, Parallelität von Trauf- mit Firstlinien, Verschieben von sich überschneidenden Objekten und von Einzelobjekten, Einrechnen von Punkten in Linien (2D- oder 3D), Kopieren von Gebäuden, Einrechnen von Kreisen, Idealisierung von Standardformen etc..

## 2.3 Verschneiden der Trauflinien mit dem Digitalen Geländemodell

Als Option können die Trauflinien mit dem Digitalen Geländemodell verschritten werden. Die senkrechten Flächen bilden die Wände. Dieser Schritt wird mit dem *CCM* automatisch durchgeführt.

## 2.4 Dachüberstände: Verschneiden von Grundrissen mit den Dächern

Falls die Grundrisse der Gebäude zur Verfügung stehen, können diese den Dächern zugeordnet und mit ihnen verschritten werden. Dadurch erhält man die Dachüberstände, wie in Abbildung 3 gezeigt. Diese Funktion läuft automatisch oder schrittweise ab.

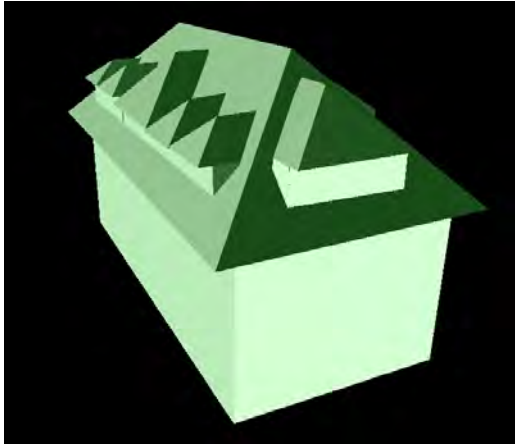


Abbildung 3: Generierung von Dachüberständen.

## 2.5 Anbringen der Texturen der Dächer

Die Dachtexturen können mit Hilfe des *CCM* automatisch angebracht werden. Die Dachumringungspolygone werden hierzu ins Luftbild projiziert und die darin liegenden Texturpixel auf das 3D-Modell transformiert. Die Orientierungsparameter der Luftbilder müssen hierfür bekannt sein.

## 2.6 Anbringen der Texturen der Fassaden

Um der Realität von 3D-Stadt- oder Werksmodellen besonders nahe zu kommen, können Fassadenbilder angebracht werden. *CCM* erlaubt auf einfache Art die Integration der Fassadenbilder. Die notwendigen Arbeitsschritte sind Photographieren, Editieren, Anbringen und Konvertieren.

### 1) Photographieren

Die Fassadenphotos werden mit einer Digitalkamera aufgenommen. Man sollte sich auf ein Bild pro Fassade beschränken und das Photo senkrecht auf die Fassade ausrichten. Auch soll vermieden werden, dass sich so wenig wie möglich Hindernisse wie Bäume, Autos, Menschen etc. zwischen Aufnahmestandpunkt und Fassade befinden. Durch solches Vorgehen kann später hoher Editieraufwand vermieden werden.

Es lässt sich dennoch in der Praxis oft nicht verhindern, dass pro Fassade mehrere Aufnahmen gemacht werden müssen, da der Abstand vor dem Objekt meist begrenzt ist. Diese Aufnahmen

sollten sich so überlappen, dass einige Punkte auf beiden Bildern identisch und leicht wieder erkennbar sind.

## 2) Editieren

Verbleibende Hindernisse im Bild müssen ggf. entfernt werden. Dies geschieht durch Nachbearbeitung mit kommerziellen Bildverarbeitungsprogrammen (*Photoshop*, etc.). Bei "mehrteiligen" Fassaden werden die einzelne Bilder entzerrt, editiert, in der Farbe aufeinander abgestimmt und zusammengesetzt.

Vom gesamten Arbeitsgang zur Generierung der 3D-Stadtmodelle ist dieser Teil der aufwändigste, da hier die manuelle Bearbeitung nicht zu vermeiden ist.

## 3) Anbringen (Mappen)

Liegt nach der Editierung pro Fassade jeweils ein entzerrtes Bild vor, wird dieses auf der entsprechenden Seite des 3D-Modells angebracht. Dies geschieht mit dem *CyberCity Modeler* oder dem *CyberCity Mapper* (Erweiterungsmodul von *CCM*, s. Abbildung 4). Es wird wegen der besseren Uebersichtlichkeit das gesamte 3D-Modell dargestellt. Die zu mappenden Fassaden können frei ausgewählt, bereits gemappte Fassaden angezeigt und abgefragt werden. Die zu mappende Fassade wird angewählt und im Photo durch 4 oder mehrere Punkte (im Perspektivbild oder im Grundriss) identifiziert. Die Entzerrung findet automatisch statt.

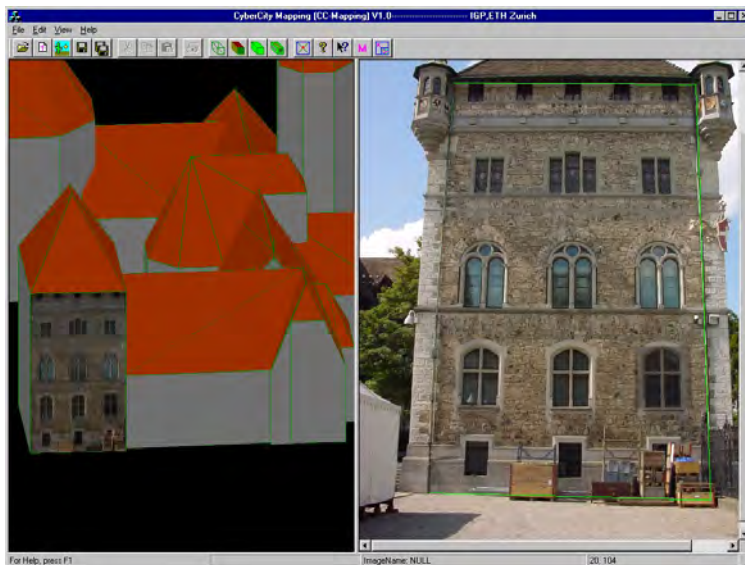


Abbildung 4: Anbringen von Fassadenphotos mit CCM

## 3. Visualisierung

### 3.1 CityView



Zur Konvertierung und optimalen Darstellung von aus *CCM* generierten V3D Daten eignet sich die Software *CityView* [ViewTec01]. Wenn tausende von Gebäuden auf einem Standard PC interaktiv visualisiert werden müssen, so ist eine Optimierung der Objektdarstellung zwingend erforderlich. *CityView* bietet mit speziellen Importwerkzeugen die Möglichkeit für eine Performance-optimierte Darstellung einer Vielzahl von Gebäuden.

*CityView* bietet die Möglichkeit zur Generierung verschiedener Auflösungsstufen (LOD) an, um eine verzögerungsfreie Visualisierung zu ermöglichen. Distanzbezogen werden verschiedene Objektdetails wie Bäume, Texturen, etc. dargestellt. In der Abbildung 5 wird der *CityView* Importdialog für V3D Daten gezeigt.

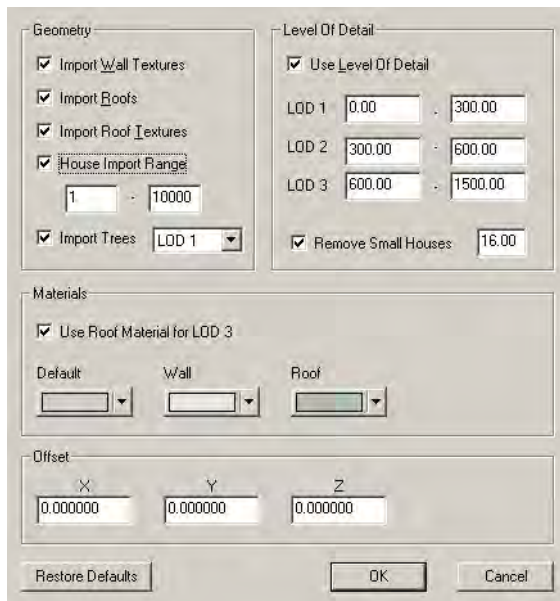
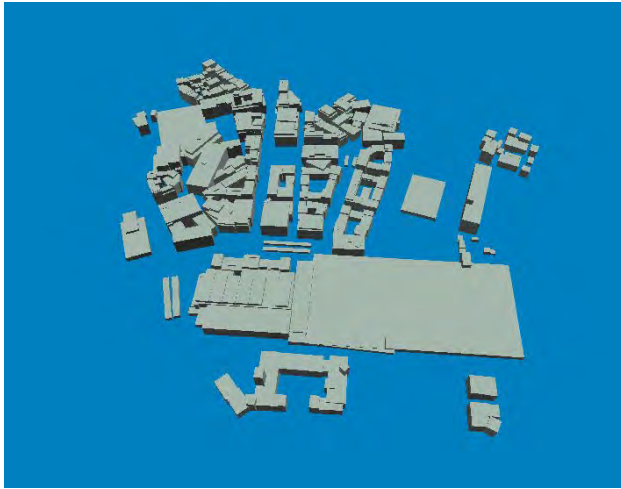


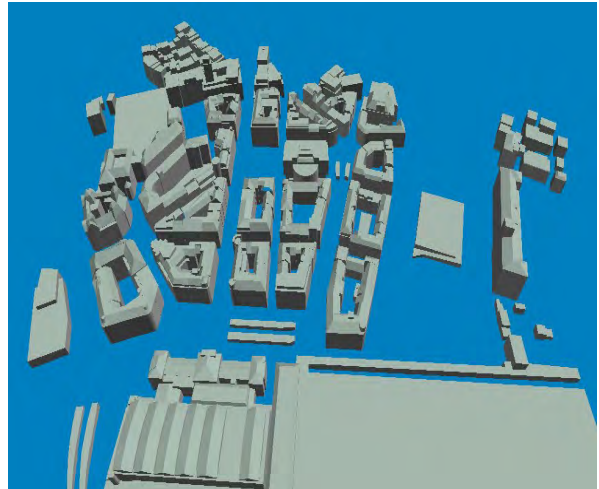
Abbildung 5: Importdialog *CityView* für V3D Daten

Verschiedene Optionen können beim Importieren der V3D ASCII Datei gewählt werden. Bei dem Geometrietool kann bestimmt werden, ob Wand- oder Dachtexturen und die entsprechenden Geometrien importiert werden sollen. Beim LOD Tool können die verschiedenen Distanzen zum Wechseln der Auflösungsstufen angegeben werden. Beim LOD1 erscheinen zum Beispiel alle Texturen und Gebäudedetails bis in eine Entfernung von 300 Metern. Zwischen 300 und 600 Metern werden die Texturen ausgeblendet, aber sämtliche Gebäudedetails gezeigt. Beim LOD 3 werden zwischen 600 und 1500 Metern nur noch untexturierte, stark vereinfachte Gebäudemodelle dargestellt. Ab 1500 Metern werden keine Gebäude mehr dargestellt. Kleine Gebäude können beim LOD 3 zusätzlich ausgeblendet werden. In der Abbildung 6 wird der Hauptbahnhof von Zürich in verschiedenen Auflösungsstufen dargestellt.

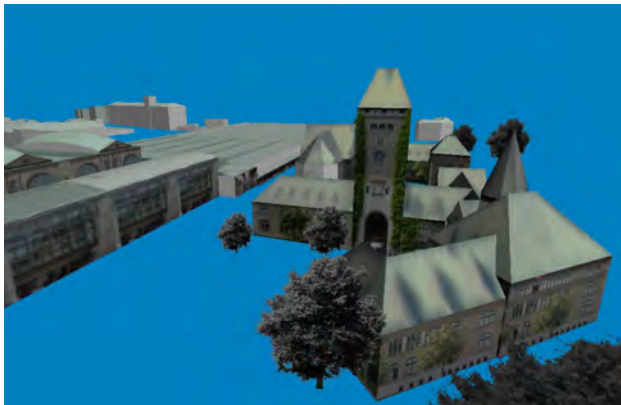
Da *CityView* auch ein Visualisierungswerkzeug ist, können die Gebäudedaten mit verschiedenen Visualisierungsmodi exploriert werden. Flugpfade können einfach editiert, abgespielt und gespeichert werden.



1.) LOD 3: Nur die Bounding Boxes werden dargestellt.



2.) LOD 2: Die Dachstrukturen werden zusätzlich geladen.



3.) LOD 1: Die Texturen werden appliziert und die Bäume werden dargestellt.

Abbildung 6: *CityView*: Hauptbahnhof von Zürich in verschiedenen Auflösungsstufen

Damit die mit *CityView* aufbereiteten Gebäude in einem realistischen Gelände visualisiert werden können, wird eine zusätzliche Visualisierungssoftware benötigt. Im folgenden Abschnitt wird diese näher vorgestellt.

### 3.2 TerrainView

*TerrainView* ist ein Virtual Reality basiertes geografisches Informationssystem (VRGIS), mit interaktiver Benutzerschnittstelle [ViewTec01]. Es erlaubt die freie Navigation des Benutzers innerhalb und ausserhalb eines selektierten geographischen Geländes und bietet Standard GIS-Funktionalität (Anfragen, Analyse) durch eine 3D-Datenbank. Datenbankeigenschaften können direkt durch Klicken in die perspektivische Landschaft dargestellt werden. Die Verwaltung dieser GIS Information wie Gebäudedaten, demografische Werte, Katasterdaten, etc. wurde über eine Schnittstelle zum *Topobase* Produkt [c-plan01] realisiert.

Die Sichtbarkeitsfunktion ist ein natürlicher und integrierter Bestandteil der Benutzerschnittstelle. Auf der Basis der *TerrainView* Anwendung wurden mit geringem Aufwand verschiedene VR Applikationen entwickelt. Die Verwendung von Standardsoft- und Hardwarekomponenten war bei der Realisierung der Virtual Reality Applikation *TerrainView* von zentraler Bedeutung.

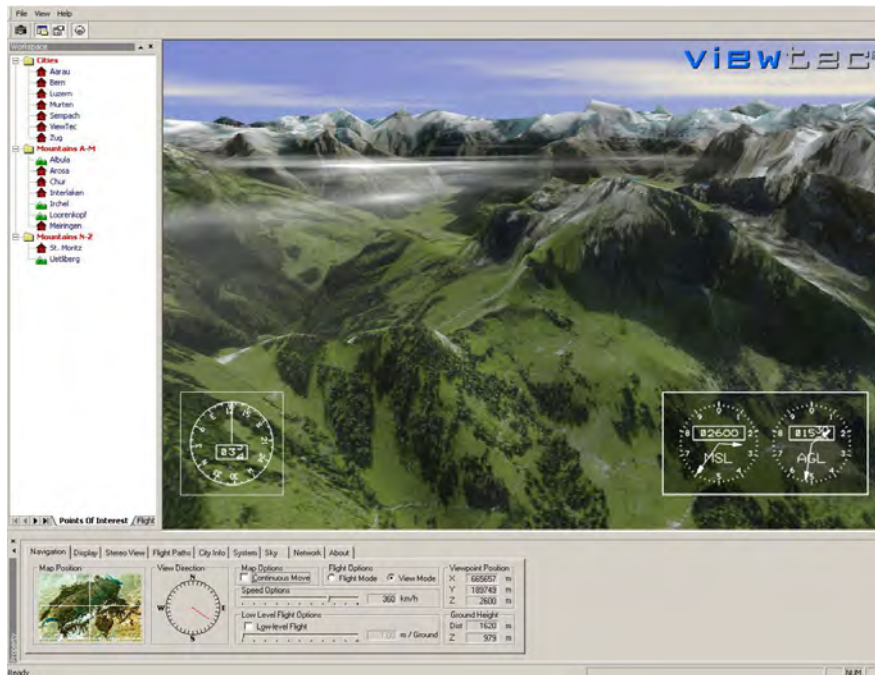


Abbildung 7: TerrainView-Applikation nach dem Aufstarten<sup>1</sup>

Die Architektur von *TerrainView* wurde so ausgelegt, dass das VR System in der Lage ist, grosse geographische Gebiete (Schweiz, Deutschland, Europa, etc.) auf einem PC mit dem Betriebssystem Windows zu explorieren.

Damit eine hohe Interaktivität der VR-Benutzerschnittstelle erreicht wurde, mussten verschiedene Optimierungen durchgeführt werden. Die dynamische Verwaltung des Terrains zur Laufzeit konnte durch eine Aufteilung der Geländedatenbasis in Mosaikteile und deren verzögerungsfreies Nachladen zur Laufzeit realisiert werden.

Die Anzahl Polygone in der zu visualisierenden Szene muss minimal sein und zum anderen darf das Bildmaterial für die Texturierung nicht zu gross sein. *TerrainView* bietet hierzu Unterstützung durch die 'Level of Detail' (LOD) Verwaltung an. Mehrere distanzabhängige Auflösungsstufen können so in Abhängigkeit zum Betrachterstandort verwaltet werden. Je näher man beim Objekt ist, um so detaillierter wird die Szene dargestellt. Damit durch das Wechseln verschiedener LODs die adaptiv triangulierten Mosaikflächen an den Kanten keine Löcher aufweisen, müssen sie entsprechend feinmaschig bleiben. Die Texturdaten werden Wavelet-komprimiert und zur Laufzeit in verschiedenen Auflösungsstufen distanzabhängig geladen.

<sup>1</sup> Datenmaterial (Höhenmodell und Orthophotos) © Endoxon AG, Luzern

Als Geländedatenbasis dienen digitale Oberflächenmodelle weltweit mit einer Maschenweite von bis zu wenigen Zentimetern. Zur Erhöhung des Realitätsgrades des zu visualisierenden geographischen Gebietes wurden verschiedene Texturkonzepte eingesetzt. Satellitenbilder sowie Luftbilder können in sehr hoher Auflösung in *TerrainView* verwendet werden. Damit die Geländedatenbasis verschiedenen Benutzern gleichzeitig zur Verfügung gestellt werden kann, wurde zusätzlich eine Webvariante von *TerrainView* realisiert.

Die Haupteigenschaften von *TerrainView* sind:

- Geländeverfolgung in konstanter Höhe
- Integrierte Fluginstrumente
- Automatisches LOD Switching
- Verschiedene Flugmodi
- Realistische Wetterdarstellung
- Direkte Generierung von Bildsequenzen für Digitalfilme
- Integrierte 2D Darstellung für einfache Navigation
- Netzwerkfähigkeit
- Erweiterbare Benutzerschnittstelle

Damit die in *CityView* aufbereiteten V3D Gebäudedaten dargestellt werden können, bietet *TerrainView* eine einfache Importmöglichkeit.

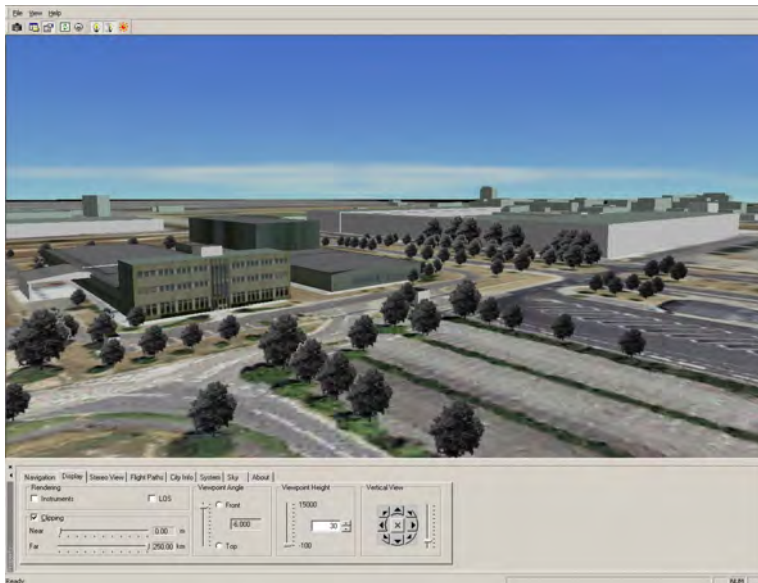


Abbildung 8: Verschiedene mit CyberCity konstruierte und mit *CityView* aufbereitete 3D-Gebäude in *TerrainView*

#### 4. Schlussfolgerungen

Das Softwarepaket *CCM (CyberCity Modeler)* ist sehr gut geeignet zur halbautomatischen Generierung von Stadtmodellen. Durch Anbringen von Texturen für Dächer, Fassaden und

Gelände kommen wir der Realität schon sehr nahe. Mit der *CityView* Applikation können diese Daten für die Darstellung in Echtzeit aufbereitet werden. Das interaktive Visualisierungswerkzeug *TerrainView* bietet komfortable Möglichkeiten zur Echtzeitbegehung von Stadt- und Werkslandschaften und zur Ansteuerung eines GIS.

## 5. Literatur

- Beck M., WorldView - Ein generisches Virtual Reality Framework für die interaktive Visualisierung grosser geographischer Datenmengen, Dissertation in Informatik an der Universität Zürich, Michael Beck, 1999
- Grün A., Steidler F., Wang X., 2000, CyberCity Modeler - ein System zur halbautomatischen Generierung von 3-D Stadtmodellen, Vermessungsingenieur 8-00
- Grün A., Wang X., 1998: CC-Modeler: A topology generator for 3-D city models. Presented Paper ISPRS Commission IV Symposium on "GIS - between Vision and Application", September 7-10, Stuttgart
- Grün A., Wang X., 1999: CyberCity Spatial Information System (SIS): A new concept for the management of 3D city models in a hybrid GIS. Proc. 20<sup>th</sup> Asian Conference on Remote Sensing, November, Hongkong, pp. 121-128

- [ViewTec01] ViewTec AG, Produktinformationen, <http://www.viewtec.ch>, 2001
- [CyberCity01] Cybercity AG Produktinformation, <http://www.cybercity.ch>, 2001
- [c-plan01] C-Plan AG, Produktinformationen, <http://www.c-plan.ch>, 2001

<sup>1</sup> Dr.-Ing. Franz Steidler  
 ICyberCity AG  
 Hohle Gasse 10  
 5454 Bellikon  
 Tel. +41 – 56 - 470 18 63  
 Tel. +41 –1 – 372 03 43  
 Fax: +41 – 1 372 03 91  
[fsteidler@cybercity.ethz.ch](mailto:fsteidler@cybercity.ethz.ch)  
[www.cybercity.ethz.ch](http://www.cybercity.ethz.ch)

<sup>2</sup> Dr. Inform. Michael Beck  
 ViewTec AG  
 Schaffhauserstrasse 481  
 8052 Zürich  
 Tel.: +41 1 305 77 77  
 Fax: +41 1 305 77 00  
[beck@viewtec.ch](mailto:beck@viewtec.ch)  
[www.viewtec.ch](http://www.viewtec.ch)

# Erfahrungen aus 5 Jahren Mission MOS/IRS-P3

K.-H. Sümnich<sup>1</sup>, A. Neumann<sup>2</sup>, H. Schwarzer<sup>1</sup>, G. Zimmermann<sup>2</sup>

## Zusammenfassung

Das erste abbildende Spektrometer MOS (Modularer Optoelektronischer Scanner) für die Erdbeobachtung aus dem Orbit ist seit April 1996 in der Umlaufbahn und hat seither einen umfangreichen Satz von spektral hochaufgelösten Daten über die Erdoberfläche und speziell über die Meeresgebiete geliefert. Es bieten sich viele Möglichkeiten, bestimmte Aspekte des Satellitenexperimentes zu beleuchten: Flugmanagement in internationaler Kooperation, Aufbau eines weltweiten Datenempfangs, Datenbearbeitung und thematische Interpretationen, Kontrolle des Instrumentes und anderes mehr.

Es werden die Erfahrungen mit dem System der In-Orbit-Kontrolle, mit dem die Zuverlässigkeit der Fernerkundungsdaten während der Missionsdauer gesichert werden sollte, behandelt. Es wurden zwei Maßnahmen ergriffen, um solch wesentliche Parameter wie die Stabilität der Messwellenlängen, die aktuellen Dunkelsignale und die Empfindlichkeit aller Sensorelemente und deren jederzeit unter Kontrolle zu halten:

(i) Nutzung interner Lichtquellen für die relative Stabilitätskontrolle der Empfindlichkeit und  
(ii) Verwendung der extraterrestrischen Sonnenstrahlung für eine periodische Nacheichung.  
Beide Methoden konnten 4 ½ Jahre genutzt werden, so dass die Entwicklung der Empfindlichkeit jederzeit im Rahmen einer Unsicherheit von  $\pm 1$  % verfolgt werden konnte. Damit wurde die Vergleichbarkeit der Fernerkundungsdaten während der Missionsdauer gesichert und die Basis für den Vergleich der MOS-Daten mit denen anderer kalibrierter Instrumente im Orbit gegeben.

Im Beitrag werden einige Aspekte der internen Kontrolle mit den Lampen behandelt sowie einige überraschende Erscheinungen genannt.

## Abstract:

Since April 1996 the Modular Optoelectronic Scanner MOS has been working successful on the Indian Remote Sensing Satellite IRS-P3. Two methods are implemented to check the main parameters of the instrument during the orbit mission: (1) the relative check of instrument sensitivity with minilamps and (2) the absolute recalibration with the sun irradiance. In this paper some experiences with the internal recalibration method to safeguard the reliability and accuracy of the remote data will be considered. A continuous variation of parameters like dark current and sensitivity can be demonstrated as well as some surprising effects on the lamp data during the mission time.

## 1. Einleitung

MOS fliegt seit April 1996 auf dem Indischen Satelliten IRS-P3. Es ist das erste abbildende Spektrometer im Orbit, mit dem die spektrale Fernerkundung eine neue Qualität erreichte, denn mit der Vielzahl der Spektralkanäle und ihrer geringen Bandbreite können verbesserte Auswerteverfahren zur Ableitung von Zustandsparametern des untersuchten Ökosystems eingesetzt werden. Die seither mit den Daten erzielten Resultate, besonders auch im Hinblick auf die Entwicklung und Testung von Auswerteargorithmen auf der Basis von Multispektraldaten für künftige Missionen (MERIS auf ENVISAT), sind ein voller Erfolg für eine Experimentalmission.

Die bisherigen Erfahrungen bei einem 5-jährigen Orbiteinsatz sind sehr vielfältig; hier soll auf nur einen Aspekt eingegangen werden: die Maßnahmen zur Kontrolle der Instrumentenparameter während der Mission. Damit sollte sichergestellt werden, dass

- die Messwerte mit der erforderlichen Genauigkeit in physikalischen Einheiten angegeben werden,
- die Messwerte während der gesamten Mission die gleiche Zuverlässigkeit besitzen,
- Änderungen der Geräteparametern erkannt und notwendige Korrekturwerte begründet werden.

<sup>1</sup> Institut für Weltraumsensorik und Planetenerkundung, DLR Berlin

<sup>1</sup> Dr. Karl-Heinz Sümnich, D-12489 Berlin, e-mail: karl-heinz.suemnich@dlr.de

<sup>2</sup> Institut für Methodik der Fernerkundung, DLR Oberpfaffenhofen



Die Sonneneichung erfolgt etwa alle 3 Wochen, während der Satellit die Tag-Nacht-Grenze überfliegt. Die horizontal einfallende Sonnenstrahlung beleuchtet eine weiße Streuscheibe, die vor dem Eingangsobjektiv in das FOV eingeschwenkt wird. Bei bekannten Reflexionseigenschaften liefert die Streuscheibe eine definierte Strahldichte (auf der Basis der Sonnenbestrahlungsstärken nach Neckel & Labs), die zur Neukalibrierung benutzt wird. So werden mit beiden Kontrollmethoden gemeinsam periodisch die aktuellen Empfindlichkeiten bestimmt.

### 3. Ergebnisse der internen Kontrolle

Die folgenden Ausführungen beziehen sich auf die Untersuchungen der Daten der internen Kalibrierungen; es werden die Trends in der Entwicklung der Parameter dargestellt, beginnend mit den Dunkelsignalen aller CCD-Pixel. Sie sind ein wichtiges Kriterium zur Beurteilung des inneren Zustandes besonders der opto-elektronischen Funktionsgruppen von der Zeile bis zum Datenausgang. Die Beispiele in Abb.1 und Abb.2 zeigen, dass die Struktur der Dunkelsignale entlang einer Zeile im wesentlichen erhalten geblieben ist. Beim Kanal A1 (und allen anderen MOS-A-Kanälen) ist zwar ein deutlicher Zuwachs zu vermerken, doch sind alle Pixel etwa gleich betroffen. Etwas anders im Falle MOS-B: insgesamt ist eine geringe Zunahme zu verzeichnen, jedoch zeigen sich über die Zeile deutlichere Abweichungen von gleichmäßiger Erhöhung (extrem im gezeigten Kanal B8).

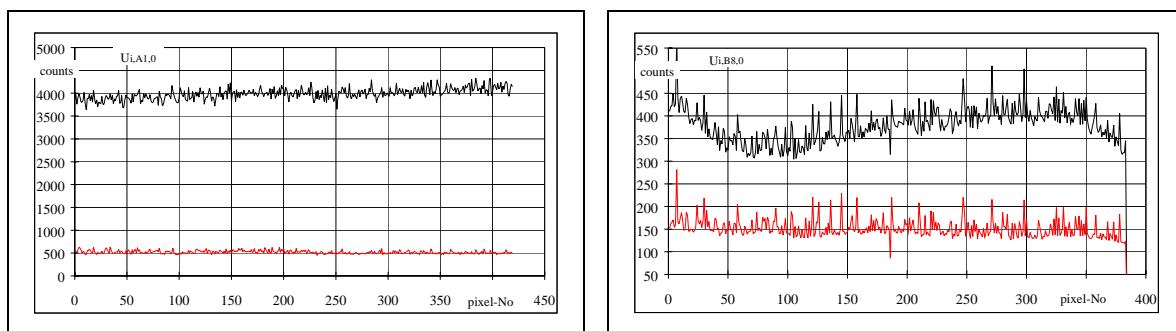


Abb.2 & Abb.3: Dunkelsignale der Kanäle A1 und B8: zu Beginn und nach 4 ½ Jahren im Orbit

Die Mittelwerte  $U_{j0}$  über die Pixelzahl jeder Zeile eignen sich zur Darstellung der zeitlichen Entwicklung der Dunkelsignale in jedem Spektralkanal. Die MOS-A Kanäle zeigen alle den gleichen fast linearen Anstieg auf den 8-fachen Wert (Abb.4), während die MOS-B Kanäle durchaus unterschiedliche Zunahme aufweisen (Abb.5). Bemerkenswert ist dabei eine Schwingung mit einer Jahresperiode, für die bisher eine befriedigende Erklärung fehlt.

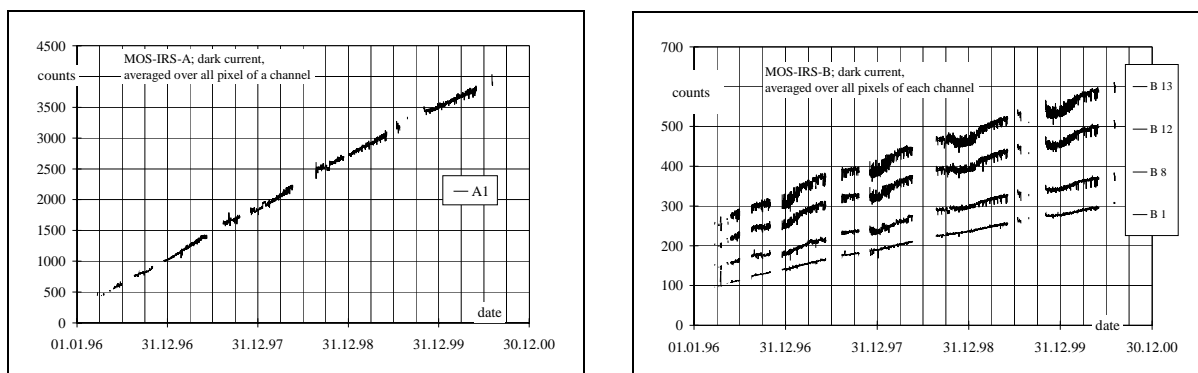


Abb.4 & Abb.5: Dunkelsignale in der zeitlichen Entwicklung während 4 ½ Jahren im Orbit



Die Beurteilung der Empfindlichkeit der einzelnen Pixel und der gesamten CCD-Zeile erfolgt durch die Darstellung der Quotienten  $C_{ijk} = U_{ijk} / U_{ijk}^*$  aus einem aktuellen Datensatz und dem Referenzdatensatz (Abb.6). Im Diagramm sind die Quotienten für alle Kanäle übereinander aufgezeichnet, jeweils links bei Pixel  $i = 1$  beginnend mit dem Wert 1,00; der Abstand zweier horizontaler Linien beträgt jeweils 2,0 %. Die Lampen wurden unterschiedlich oft benutzt: Lampe1 hat eine Gesamtbrennzeit von ca. 260 min (2600 Einschaltungen), für die weniger genutzte Lampe 2 sind ca. 215 min anzusetzen. Die Differenzen zwischen den Ergebnissen beider Lampen (Lampe1: dicke Linien, Lampe2: dünne Linien in Abb.6) können durch die strahlenführenden Elemente (Farbfilter und Primen) sowie die Lampen selbst verursacht sein – letzteres ist wahrscheinlicher. Dabei ist in Betracht zu ziehen, dass die Spektren der Lampenstrahlung auf einer CCD-Zeile, wegen der unterschiedlichen Einstrahlungsrichtung rechts und links neben dem Hauptspalt, um  $\pm 42$  nm gegenüber der Nadirstrahlung verschoben sind.

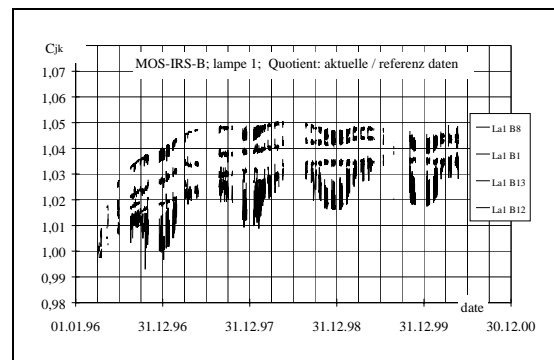
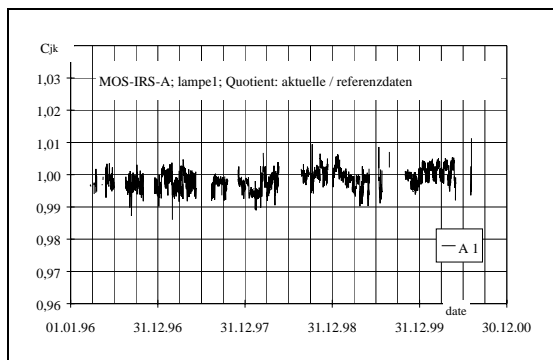


Abb.7 & Abb.8: Empfindlichkeit in der zeitlichen Entwicklung während 4 ½ Jahren im Orbit

Die Gleichmäßigkeit der Empfindlichkeit über alle Pixel einer Zeile ist in der Missionszeit kaum beeinträchtigt

worden, Variationen von  $\pm 1\%$  weisen ein sehr stabiles Verhalten aus. Durch Mittelwertbildung über die Pixel ergibt sich ein charakteristischer Wert ( $C_{jk}$ ) für die relative Empfindlichkeit je Zeile, mit dem die zeitliche Entwicklung dargestellt werden kann. Die Abbildungen 7 und 8 zeigen für MOS-A und MOS-B deutliche Unterschiede in der Entwicklung der Empfindlichkeit. Bei allen MOS-A Kanälen bleibt die Empfindlichkeit über die Missionszeit innerhalb  $\pm 1\%$  erhalten. Bei den MOS-B Kanälen nimmt die Empfindlichkeit unterschiedlich stark zu und erreicht nach 2 Jahren eine stabile Phase mit leichter Tendenz zur Abnahme. Auffallend hier, mehr noch als bei den Dunkelwerten, eine jährliche periodische Schwankung der Kontrollwerte, besonders deutlich im Kanal B12.

Beim MOS-C, der Kameraversion mit einer InGaAs-Zeile und einem Filter um  $1,6 \mu\text{m}$ , zeigt sich eine andere Entwicklung (Abb.9 und Abb.10). Die Dunkelsignale steigen zwar auch um das 3-fache, die Empfindlichkeit dagegen nimmt um etwa 3% ab.

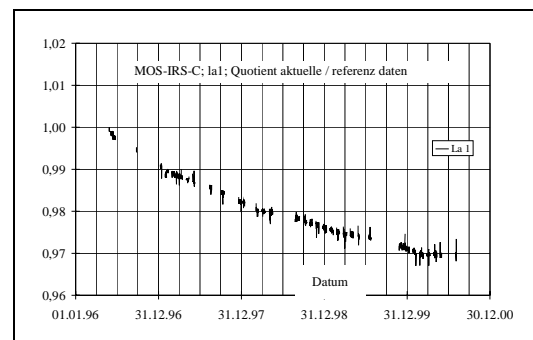
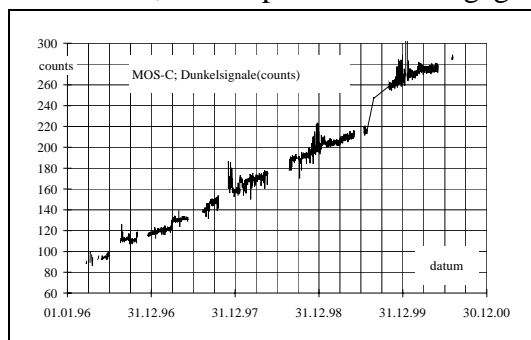


Abb.9 & Abb.10: Dunkelsignale und Empfindlichkeit in der zeitlichen Entwicklung bei MOS-C

Drei Besonderheiten, die im zeitlichen Verhalten sowohl der Dunkelsignale als auch der Kontrollwerte der Lampen zumindest zeitweise beobachtet wurden, sollen noch kurz erwähnt werden, ohne die möglichen Ursachen zu diskutieren:

(1) In der DLR-Bodenstation in Neustrelitz werden täglich die Daten von 2 bis 4 Überflügen empfangen. Es zeigte sich, dass die Kalibrierwerte der ersten Empfangs eines Tages etwas größer sind als die der folgenden Übertragungen. In den Abb.11 und 12 sind solche synchronen Änderungen im Dunkelwert und in der Empfindlichkeit für einige MOS-B Kanäle aufgezeichnet. Verminderungen bis zu 3% (Dunkelsignale) und 0,3% (Empfindlichkeit) sind deutlicher, als es die zufälligen Variationen der Werte erwarten lassen.

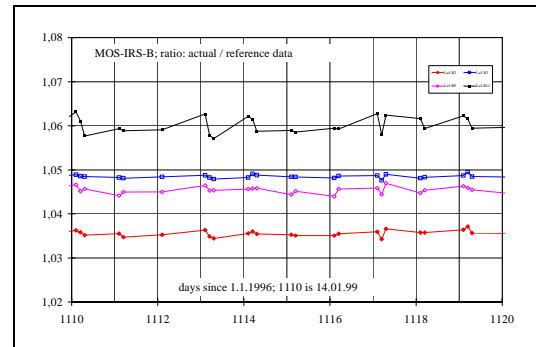
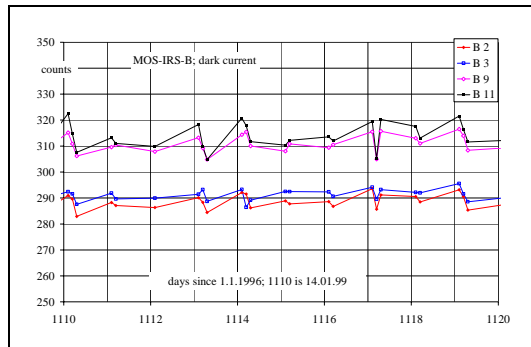


Abb.11 & Abb.12: Dunkelsignale und Empfindlichkeit MOS-B: tägliche synchrone Variationen

(2) In einer kurzen Periode im Jahre 1999 waren die ersten Kontrollwerte nach dem Wechsel der benutzten Lampe deutlich verringert ( $\approx 6\%$ ), während sich danach der vorherige Trend fortsetzte. Der Effekt war nur bei wenigen CCD-Zeilen im infraroten Spektralbereich zu erkennen, die auch hinsichtlich der elektronischen Steuerung eine extra Gruppe bilden. Abb.13 zeigt die Erscheinung bei den Kanälen B8 und B11 dieser Gruppe, jedoch nicht bei B1 aus der anderen Gruppe.

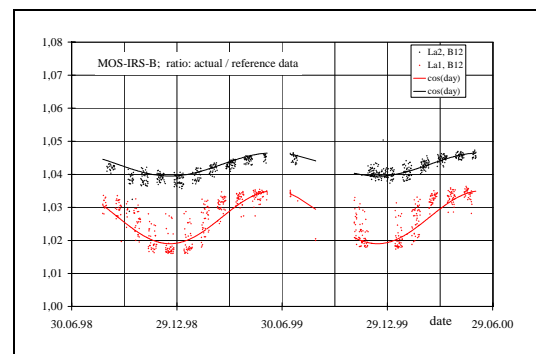
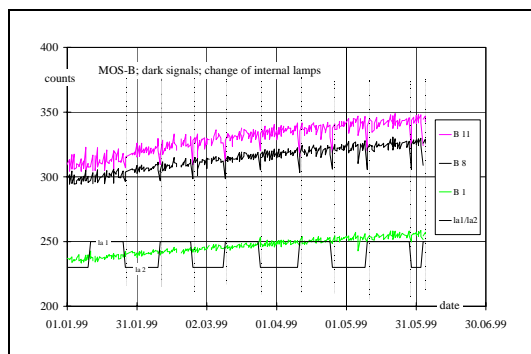


Abb.13: Verringerung der Kontrollwerte direkt nach dem Wechsel der Lampen

Abb.14: Unterschiede in der jährlichen Variation der Kontrollwerte

(3) Die schon erwähnte jahreszeitliche Periode in den Kontrollwerten hat wahrscheinlich ihre Ursache in einer synchron verlaufenden Temperaturvariation um ca.  $0,3^{\circ}\text{C}$ . Allerdings zeigte sie sich in unterschiedlicher Größe bei den beiden Lampen – ein Hinweis darauf, dass neben dem Anteil des Detektorsystems (der sich durch die periodischen Variationen im Dunkelwert offenbart) auch das Lampensystem dabei eine Rolle spielen muss, einschließlich der Tatsache, dass die Kontrollwellenlängen um eben die  $\pm 42\text{ nm}$  verschoben sind. Abb.14

zeigt dieses Verhalten am Beispiel von Kanal B12, wo die cos-Funktionen der Tageszählung die periodischen Variationen für beide Lampen gut beschreiben.

Insgesamt kann konstatiert werden, dass mit dem internen Kontrollsystem eine ausreichende Überprüfung des Meßsystems während der Missionszeit möglich war. Durch die hier nicht behandelte Sonneneichung wird die zeitliche Entwicklung der Parameter bestätigt und zusätzlich mit Voroptik und Streuscheibe weitere wesentliche Elemente der Strahlenführung erfasst.

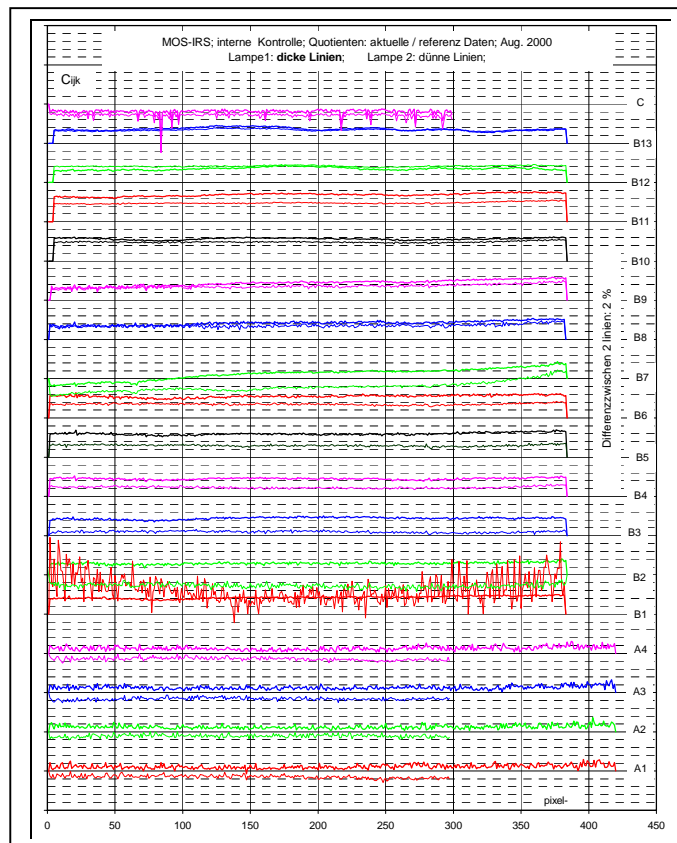


Abb. 6: Quotient der aktuellen Werte und der Referenzwerte der internen Eichung

#### 4. Literatur

SÜMNICH, K.-H., SCHWARZER, H., (1998): In-flight calibration of the Modular Optoelectronic Scanner (MOS), Int. J. Remote Sensing, 1998; Vol.19, No.17, 3237 - 3259

# Das abbildende Spektrometer ROSIS

**S. THIEMANN\*, P. STROBL°, P. GEGE\*, N. STAHL\*, W. MOOSHUBER°  
& H. VAN DER PIEPEN\***

*Abstract: ROSIS (Reflective Optics System Imaging Spectrometer) ist ein abbildendes Spektrometer, das mit seinem Spektralbereich von 430 nm bis 846 nm vor allem für die Gewässerfernerkundung konzipiert wurde. Es wurde 1992 erstmalig eingesetzt und steht seit dem Jahr 2000 nach technischen Änderungen und umfangreicher Rekalibration wieder zur Verfügung. ROSIS ist ein sogenannter "Pushbroom"-Scanner, der über ein CCD-Flächenarray gleichzeitig 512 räumliche und 115 spektrale Pixel erfassen kann. Durch die Neukonzeption von Analog- und Digitalelektronik wurde die radiometrische Qualität und Kalibrierbarkeit erheblich verbessert. Eine neue Datenaufzeichnungsanlage erlaubt eine flexible und operationelle Aquisition der Bilddaten bei gleichzeitiger Echtzeitdarstellung an der Bedienkonsole. Derzeit wird ROSIS im Auftrag der Europäischen Kommission vom DLR im Rahmen einer "Large Scale Facility" Nutzern europaweit angeboten. Neben der Detektion von Vegetation, Schnee und Eis sowie Atmosphären- und Wolkenparametern wird ROSIS in der Gewässerfernerkundung eingesetzt. Aus ROSIS-Daten kann Information über die Konzentration und Verteilung von Wasserinhaltsstoffen, Algenklassen, Sedimenttransport und Strömungen gewonnen werden. Als Demonstrationsbeispiel wird in dieser Präsentation ein Ausschnitt eines Flugstreifens vom Bodensee vorgestellt.*

## 1 Einleitung

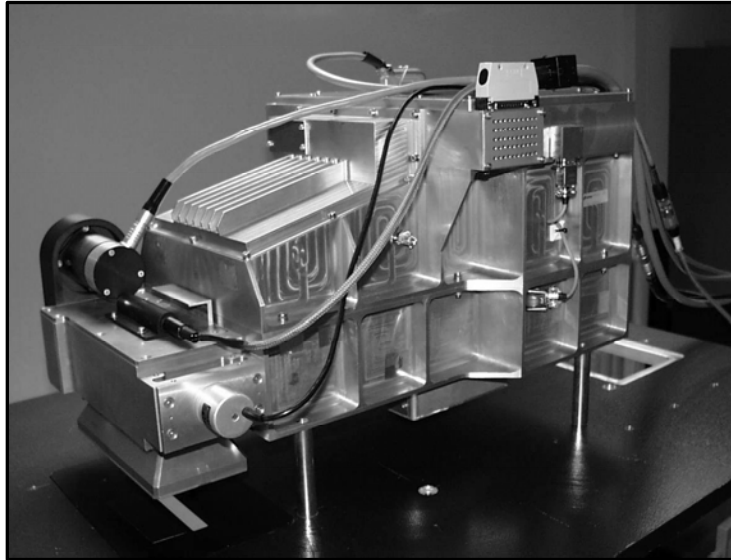
Das Reflective Optics System Imaging Spectroradiometer (ROSI, Sensoreinheit s. Abb. 1) wurde seit 1986 in einer Kooperation zwischen den Forschungseinrichtungen DLR, Oberpfaffenhofen und GKSS, Geestacht sowie MBB (jetzt Astrium), Ottobrunn entwickelt. ROSIS ist mit seinen schmalbandigen Kanälen im sichtbaren und nahen Infraroten Wellenlängenbereich besonders für die Gewässerfernerkundung geeignet (KUNKEL ET AL. 1991; VAN DER PIEPEN, H. & DOERFFER, R., 1993). Ursprünglich war geplant, die Erfahrungen der Flugzeugversion für eine Satellitenmission zu nutzen, die aber nie realisiert werden konnte. ROSIS wurde 1992 erstmalig im Flugzeug erprobt (VAN DER PIEPEN, H. 1995) und erlangte nach weiteren Phasen der Verbesserung seine heutige Konzeptionierung. Bis 1995 wurden der Originalaufbau zunehmend verbessert und erste Kampagneneinsätze durchgeführt. Bis zu diesem Zeitpunkt konnten aber nur wenige Spektralkanäle im abbildenden Modus aufgezeichnet werden. Ab 1997 wurde die komplette Elektronik des Instruments durch eine neu konzipiertes, volldigitales System ersetzt, was vor allem die Genauigkeit der radiometrischen Kalibrierung erheblich verbesserte (GEGE & MOOSHUBER 1997, GEGE ET AL. 1998). Außerdem wurde die Datenaufzeichnung durch ein System ersetzt, welches es erlaubt, für alle 512 räumlichen Pixel sämtliche 115 Spektralkanäle abzuspeichern. Dies war zuvor wegen der hohen Datenraten nicht möglich und machte es erforderlich, zwischen einem abbildenden Mode (alle 512 räumlichen Pixel, ausgewählte Spektralkanäle) und einem Spektralmode (komplettes Spektrum für 167 räumliche Pixel) auszuwählen. 1999

---

\* DLR, Institut für Methodik der Fernerkundung - Gewässerfernerkundung, PF 1116, 82230 Weßling,

° DLR, Institut für Methodik der Fernerkundung - Experimentelle Verfahren, PF 1116, 82230 Weßling

wurden mit der Gründung des Clusters "Angewandte Fernerkundung" am DLR die flugzeuggetragenen abbildenden Spektrometer und sensornahen Arbeiten in einer Abteilung des Instituts für Methodik der Fernerkundung zusammengeführt. Seit 2000 steht das ROSIS als Teil dieser Flugzeugsensorikpalette externen Nutzern wieder zur Verfügung.

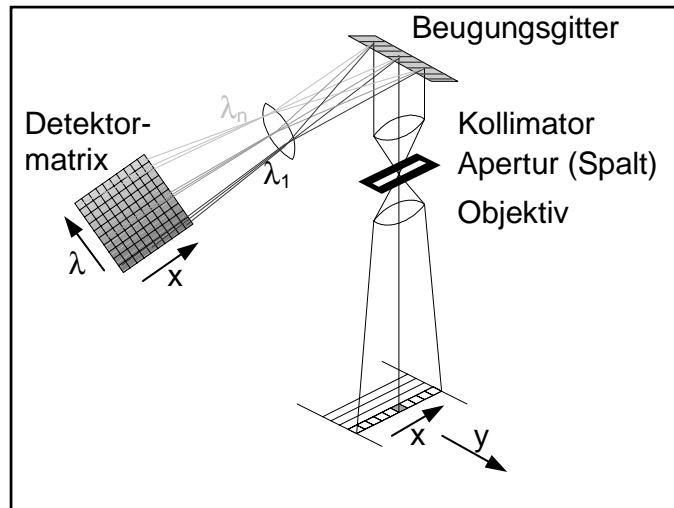


**Abb. 1: ROSIS - Sensoreinheit**

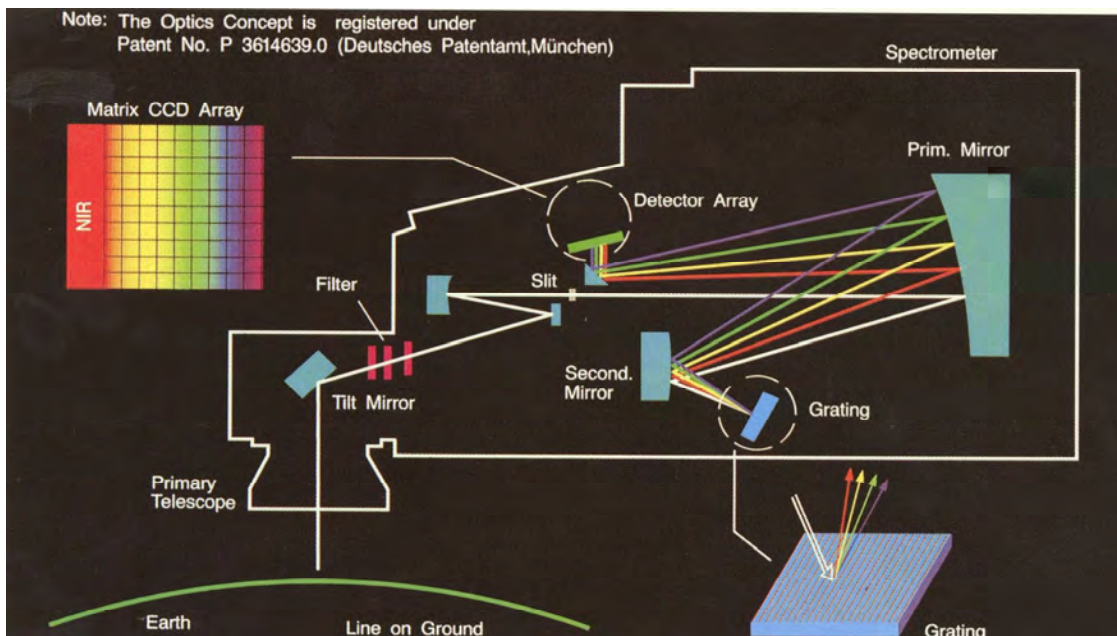
## **2 Beschreibung des Aufnahmesystems von ROSIS**

RODIS ist ein sogenannter "Pushbroom-Scanner", d.h. die Spektralkanäle aller Elemente einer Bildzeile ("Pixel") werden gleichzeitig aufgenommen. Der Bildaufbau erfolgt durch die Vorwärtsbewegung des Trägers. Dieses Prinzip hat den Vorteil der kompakten Bauweise ohne bewegliche Teile und wird deshalb für den Satelliteneinsatz bevorzugt. Wie im optischen Schema (Abb. 2) zu sehen ist, wird eine Szene durch ein Teleskop auf einen Spalt abgebildet, welcher eine einzelne Bildzeile "ausschneidet". Hinter dem Spalt, im Spektrometer, wird das Licht auf ein Gitter fokussiert, von dem jede Wellenlänge unter einem anderen Winkel reflektiert wird. Dieses spektral zerlegte Licht gelangt schließlich auf ein zweidimensionales CCD-Array, welches so justiert ist, dass das Licht von einem festen Ort des Eintrittsspalts eine einzelne Spalte beleuchtet. Diese Spalte bildet damit ein einzelnes Bildelement (Pixel). Die Spalten des CCD-Arrays repräsentieren unterschiedliche Wellenlängen, d.h. sie enthalten das Spektrum des Pixels. Ein Bild entsteht Zeile für Zeile durch die Vorwärtsbewegung des Flugzeugs.

RODIS kann in seiner neuesten Version gleichzeitig 512 räumliche Pixel in 115 spektralen Kanälen erfassen (Tab. 1). Dabei betragen die Abstände zwischen den Zentrumswellenlängen der Spektralkanäle 4 nm. Bei einem IFOV (instantaneous field of view) von 0,59 mrad ergibt sich eine räumliche Auflösung von ca.  $2,8 \times 2,8 \text{ m}^2$  und eine Streifenbreite von ca. 1,5 km bei einer Flughöhe von 5.000 m über Grund (Tab. 1). Eine Besonderheit von ROSIS ist die ausschließliche Verwendung von Spiegeln im Strahlengang, die einen Einsatz in einem sehr breiten Spektralbereich zulassen sowie die zweifache Verwendung desselben Kollimators vor und nach dem Gitter, die eine sehr kompakte Bauweise ermöglicht (Abb. 3).



**Abb. 2: ROSIS - optisches Schema**



**Abb. 3: ROSIS - Implementierung**

**Tabelle 1**

Spektralbereich	<b>430 - 860 nm</b>
Abtastintervall	<b>4,0 nm</b>
Zahl der Spektralkanäle	<b>115</b>
Bildpunkte pro Scanzeile	<b>512</b>
Radiometrische Quantisierung	<b>14 bit</b>
Gesichtsfeld (FOV)	<b>± 8,7°</b>
Blickwinkel eines Pixels (IFOV)	<b>0,59 mrad</b>
Pixelgröße bei 5 km Flughöhe	<b>2,8 m x 2,8 m</b>
Spiegelkipfung in Flugrichtung (Tilt)	<b>± 20°</b>

### 3 Kalibration

Der Einsatz als Messgerät macht es erforderlich, die Bildinformation in physikalische Einheiten und die Position jedes Bildpunktes in geographische Koordinaten umzurechnen. Ersteres ist die Aufgabe der spektralen und radiometrischen Kalibration, letzteres der geometrischen Korrektur und der Georeferenzierung.

Jede Spalte des CCD-Arrays detektiert Licht einer anderen Wellenlänge. Die Zentralwellenlänge und das erfaßte Wellenlängenintervall dieser "Spektralkanäle" werden zur **spektralen Kalibration** durch Labormessungen mit monochromatischem Licht ermittelt (Abb. 4). Dabei wird mit Hilfe eines Kollimators nur ein einzelnes (räumliches) Element der Detektormatrix beleuchtet und durch Variation der Wellenlänge am Monochromator dessen spektrale Empfindlichkeit gemessen.



**Abb. 4: Laboraufbau für die Spektralkalibrierung mit 1 - ROSIS, 2 - Ansteuerung von ROSIS und Datenspeicherung, 3 - Stromversorgung von ROSIS, 4 - Wolframbandlampe, 5 - Monochromator, 6 - 45°-Spiegel, 7 - Kollimator (off-axis), 8 - Drehtisch (Azimuth), 9 - Drehtisch (Elevation).**

Die Umrechnungsfaktoren der Grauwerte jedes Spektralkanals zur strahlungsphysikalischen Größe Leuchtdichte ( $\text{Watt m}^{-2} \text{nm}^{-1} \text{sr}^{-1}$ ) werden ermittelt, indem im Labor Messungen an einer geeichten Lichtquelle durchgeführt werden. Da unter anderem Elektronik, Temperatur und Streulicht das Signal beeinflussen, ist diese **radiometrische Kalibration** sehr aufwendig. Lageschwankungen des Flugzeugs, Geländeunebenheiten und andere Einflüsse führen zu Bildverzerrungen. Bei der Datenprozessierung werden unter Berücksichtigung von Fluglage (Nick-, Roll- und Gierwinkel), Fluggeschwindigkeit, Höhe über Grund und der Brennweite des Teleskops die Pixel des verzerrten Bildes **geometrisch korrigiert**. Über Land benötigt man für optimale Ergebnisse ein digitales Geländemodell, um den Abstand der Bildpunkte vom Sensor korrekt einzurechnen.

Mit Hilfe der GPS-Positionsdaten des Flugführungssystems werden die geometrisch korrigierten Bilder in ein geographisches Koordinatensystem eingepasst. In der Regel erfolgt die **Georeferenzierung** zusammen mit der geometrischen Korrektur.

Die notwendigen Module für die Kalibration und Geokorrektur stehen im Bildverarbeitungssystem Xdibias am DLR zur Verfügung und erlauben einen operationellen Ablauf der Datenaufbereitung für den Nutzer.

## 4 Neukonzeption

Die Überarbeitung des ROSIS war notwendig geworden, um einerseits den gestiegenen Anforderungen der Datennutzer gerecht zu werden und andererseits die neu entwickelten Möglichkeiten der Elektronik auszuschöpfen.

Eine der wesentlichsten Neuerungen war die Anschaffung einer vollständig neuen Elektronik, die alle Teile von der detektornahen analogen Vorverstärkung bis zur digitalen Datenaufzeichnung umfasst. Hauptvorteil dieser Anlage ist die Flexibilität der Datenaufzeichnung, die nun eine gleichzeitige Aufzeichnung aller spektralen Kanäle bei voller räumlicher Auflösung und Abdeckung zulässt. Daneben ist weiterhin ein Zusammenfassen (Binning) von Spektralkanälen möglich, um die Datenqualität auf Kosten der spektralen Auflösung erhöhen zu können. Die Datenaufzeichnungseinheit verfügt über zwei Wechselrahmen-Festplatten. Dies erlaubt die Aufzeichnung von sehr langen Flugstreifen und nach Rückkehr einen schnellen Datentransfer zur Prozessierumgebung. Die Steuerung des ROSIS erfolgt über eine informative und bedienerfreundliche Schnittstelle.

Ein wesentlicher Nachteil des ROSIS Konzepts ist die starke Temperaturabhängigkeit der spektralen Kalibration. Temperaturbedingt treten Verschiebungen der Zentralwellenlängen auf. Nach dem Bau einer Thermalbox, die zur Temperaturstabilisierung des Systems wesentlich beiträgt, wurde zusätzlich eine Quecksilberdampf-Spektrallampe eingebaut, deren Spektrallinien fester und bekannter Wellenlänge als Referenzstandard dienen. Unmittelbar vor und nach jedem Befliegungsstreifen wird dieses Spektrum aufgezeichnet. In der Systemkorrektur kann so jede Szene individuell nachkalibriert werden.

Ein wichtiges und lange Zeit schwer lösbares Problem flugzeuggetragener Scanner war die Georeferenzierung der gewonnenen Bilddaten. Mit der Verfügbarkeit von hochgenauen differentiellen GPS und Fluglagedatensystemen konnte hier Abhilfe geschaffen werden. Dies ist von umso größerer Bedeutung für die Gewässeranwendungen, da hier die bislang mögliche wenn auch umständliche Referenzierung über Passpunkte wegen des häufigen Fehlens von Landmerkmalen meist nicht praktikabel war. Das ROSIS ist mit einem modernen Fluglage- und Navigationssystem gekoppelt, und die Bilddaten können in der Regel bis auf 1-2 Pixel genau automatisch georeferenziert werden.

## 5 Anwendungsbeispiel

Seit dem Jahr 2000 werden von der Abteilung Gewässerfernerkundung am DLR Befliegungen des Bodensees im Rahmen des Projektes MAPP (MERIS Application and Regional Products Project) mit ROSIS unternommen. Dabei werden gleichzeitig aufgenommene Daten des Satellitensensors MOS mit ROSIS-Daten verglichen, um die räumlichen Verteilungsmuster von Wasserinhaltsstoffen und damit die Variationen innerhalb eines Satellitenpixels zu erfassen. Abb. 5 zeigt einen Ausschnitt eines ROSIS-Flugstreifens vom 15.05.2000 in der Bregenzer Bucht. Der Abbildung liegt eine Kanalkombination in Echtfarbandarstellung zu Grunde. Man kann bereits in diesem Ausschnitt die unterschiedliche Wasserfarbe von Bregenzer Aach und Bodensee erkennen. Die Analyse von Wasserinhaltsstoffen aus ROSIS-Daten und ihre multitemporale Interpretation wird in diesem Band in dem Beitrag "Ableitung von Wasserinhaltsstoffen zur Überwachung des Bodensees aus Fernerkundungsdaten" von N. Stahl und P. Gege vorgestellt. Im Landbereich wird der Detailreichtum bei 3.000 m Flughöhe (Pixelgröße 1,7 x 1,7 m<sup>2</sup>) innerhalb einer Szene deutlich.



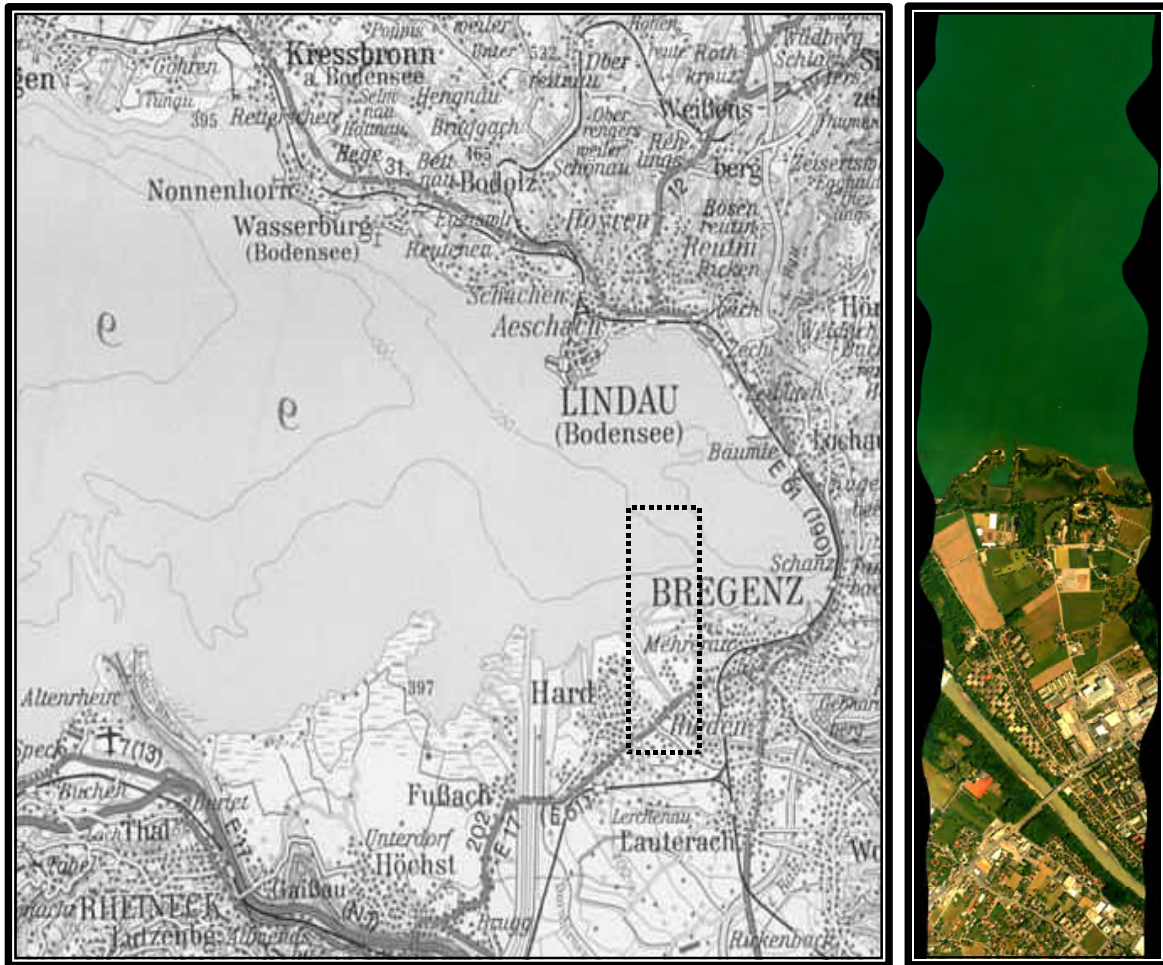


Abb. 5: Teil eines geokorrigierten ROSIS-Flugstreifens in der Bregenzer Bucht / Bodensee vom 15.5.2000

## 6 Ausblick

Derzeit wird ROSIS im Auftrag der Europäischen Kommission vom DLR im Rahmen einer "Large Scale Facility" Nutzern europaweit angeboten. Eine erste Kampagne fand 2000 statt, während der Testgebiete in Italien, Spanien, Belgien und Holland befliegen wurden. Die Daten wurden nach erfolgter Atmosphärenkorrektur und Geokodierung bis Anfang 2001 an die Nutzer ausgeliefert. Die Folgekampagne im Jahr 2001 umfasst wiederum Befliegungen in Italien, Spanien und Belgien sowie Frankreich. Ende 2001 erfolgt die Ausschreibung für die dritte und letzte Kampagne im Rahmen dieses Projekts, die im Sommer 2002 stattfinden wird. Leider wurde die Förderung von Anträgen unter deutscher Führung durch die Kommission ausgeschlossen. Weitere Informationen finden sich auf der HySens Internetseite unter <http://www.op.dlr.de/dais/hysens/>.

In der Abteilung Gewässerfernerkundung werden seit diesem Jahr auch ROSIS-Daten von anderen Seen wie dem Ammersee, Starnberger See / Osterseen und dem Waginger-/Tachingersee akquiriert, um die mit der großen Datenbasis vom Bodensee entwickelten analytischen Algorithmen auch auf anderen Gewässern zu testen.

Im Zusammenhang mit der Einbindung der Bilddaten flugzeuggestützter Sensoren in das Daten Informations- und Managementsystem (DIMS) des Deutschen Fernerkundungs-

Datenzentrums (DFD) ist geplant auch den Bestand an ROSIS-Daten über die EOWEB Internetschnittstelle der Datenbank öffentlich zugänglich zu machen. Für 2001 ist ein Testbetrieb geplant.

## 7 Literaturverzeichnis

- GEGE, P., BERAN, D., MOOSHUBER, W. , SCHULZ, J. & VAN DER PIEPEN H.(1998): System Analysis and Performance of the New Version of the Imaging Spectrometer ROSIS. In: First EARSeL Workshop on Imaging Spectroscopy, Remote Sensing Laboratories, University of Zurich, Switzerland, 6-8th October 1998.
- GEGE, P. & MOOSHUBER, W.: Electronic Performance of the Imaging Spectrometer ROSIS-03. in Proc. Joint Workshop of ISPRS Working Groups I/1, I/3 and IV/4: Sensors and Mapping from Space, Hannover, Germany, Sept. 29 to Oct. 2, 1997, S. 49-67.
- KUNKEL, B., BLECHINGER, F., VIEHMANN, D., VAN DER PIEPEN, H. & DOEFFER, R. (1991): ROSIS imaging spectrometer and its potential for ocean parameter measurements (airborne and spaceborne). In: International Journal of Remote Sensing, Vol 12 (4), S. 753-761.
- VAN DER PIEPEN, H. & DOERFFER, R. (1993): ROSIS - ein abbildendes Spektrometer für die Biosphärenforschung. In: Winter R. & Markwitz W. (Ed.) Tagungsband: 9. Nutzerseminar des DFD, DLR-Mitt. 93-08, S. 48-50
- VAN DER PIEPEN, H. (1995): Nutzung und Anwendung des abbildenden Spektrometers ROSIS. DLR-Nachrichten, H. 77, S. 11-14.

# **BIOLADA: DAS GEOGRAPHISCHE INFORMATIONSSYSTEM DER ABTEILUNGEN LANDSCHAFTS & GEWÄSSER UND RAUMPLANUNG DES KANTONS AARGAU**

**MARTIN TSCHANNEN<sup>1</sup> & STEFAN MEIER<sup>2</sup>**

*Abstract: Since 1990 the Canton of Argovie has been building up a Geographical Information System (AGIS). It aims at providing geographical data of different departments over the whole area within reasonable time. Various departements have contributed data in the mean-time. Since 1997, the Departement of Planning and the Department of Landscape and Rivers are running the common information system BIOLADA which provides useful tools for everyday work. Even employees with minor or no knowledge of computer or GIS are enabled to use, query and plot geographical data.*

## **ZUSAMMENFASSUNG**

Der Regierungsrat des Kantons Aargau genehmigte 1990 das Konzept für ein Aargauisches Geographisches Informationssystem (AGIS). Ziel des AGIS ist, rasch über das ganze Kantonsgebiet flächendeckende und raumbezogene Daten verschiedenster Fachbereiche anbieten zu können. Mehrere Abteilungen der kantonalen Verwaltung haben seither eigene Fachstellen geschaffen und eine Vielzahl von raumbezogenen Daten erhoben. Seit 1997 betreiben die Abteilungen Landschaft & Gewässer und Raumplanung ein gemeinsames Informationssystem (BIOLADA) in welchem die Daten abteilungübergreifend für die tägliche Arbeit in der Verwaltung aufbereitet und dargestellt werden. Selbst Computer- und GIS-unerfahrene Anwender können auf diesem Weg relevante Daten aus den Arbeitsbereichen Planung, Landschaft und Umwelt abrufen, anzeigen und ausdrucken.

## **1. DAS AARGAUISCHE GEOGRAPHISCHE INFORMATIONSSYSTEM (AGIS)**

Der Regierungsrat des Kantons Aargau genehmigte 1990 das Konzept für ein Aargauisches Geographisches Informationssystem (AGIS). Das Ziel des AGIS ist, rasch flächendeckende und raumbezogene Daten des ganzen Kantonsgebietes (1'400 km<sup>2</sup>) zur Verfügung zu stellen. Das AGIS ist dezentral organisiert. Als Überbau wirkt die Gruppe AGIS Koordination der Abteilung Informatik. Sie koordiniert Daten, Programme und Geräte, verteilt nachgeführte Datenbestände, stellt Programmprodukte und Spezialgeräte bereit, berät und schult. Die verschiedenen Fachstellen, die mit AGIS arbeiten, sind in ihrem Fachbereich zuständig für die Digitalisierung von Karten und Plänen, die Verwaltung und Nachführung der Datenbestände, sowie für deren Analyse und Interpretation. Als Software wird ARC/Info zusam-

---

<sup>1</sup> Martin Tschannen, Baudepartement Kanton Aargau, Abteilung Raumplanung, Entfelderstr. 22, CH-5000 Aarau, e-mail: martin.tschannen@ag.ch

<sup>2</sup> Stefan Meier, Baudepartement Kanton Aargau, Abteilung Landschaft und Gewässer, Entfelderstr. 22, CH-5000 Aarau, e-mail: stefan.meier@ag.ch

men mit ArcView verwendet.

Mehrere Abteilungen der kantonalen Verwaltung betreiben eigene AGIS-Fachstellen und erfassen und analysieren eine Vielzahl von raumbezogenen Daten. Es handelt sich dabei um Daten aus den Bereichen Raumplanung, Natur- und Landschaftsschutz, Wald, Grundwasser, Umweltschutz, Landwirtschaft und Verkehr. Eine ausführliche Liste der verfügbaren Daten kann bei den Verfassern bezogen werden. Weitere Informationen zu AGIS sind auf der Web-Site <http://www.ag.ch/agis> zu finden.

## **2. DIE FACHSTELLE AGIS DER ABTEILUNG RAUMPLANUNG**

1990 hat sich die Abteilung Raumplanung entschlossen, Raumplanungsdaten systematisch mit einem GIS zu erfassen. Bereits 1983 wurden die Ausdehnung der Bauzonen und zwischen 1987 und 1989 die Fruchtfolgeflächen räumlich erfasst. Diese Daten konnten ins AGIS überführt werden und die heute vorhandenen Fruchtfolgeflächen basieren auf diesen Daten.

Seit 1992 erfasst die Fachstelle AGIS der Abteilung Raumplanung eine Vielzahl von Daten. Im Jahre 1994 wurde die Digitalisierung der Bauzonenpläne und des Standes der Erschliessung 1990/92 abgeschlossen. Von 1994 bis 1997 wurden die Richtplan-Gesamtkarte und die -Teilkarten erarbeitet. Ohne GIS und die Möglichkeit, über Nacht oder über ein Wochenende neue Planvarianten ausdrucken zu können, wäre die Erarbeitung des Richtplans in dieser kurzen Zeitspanne und in dieser Qualität nicht möglich gewesen.

Seit 1994 wird der Genehmigungsinhalt der Nutzungspläne Kulturland digitalisiert. Bis heute liegen 90 % der 232 Aargauer Gemeinden in digitaler Form vor. 1997 wurde in Zusammenarbeit mit der Abteilung Verkehr das Netz des öffentlichen Verkehrs mit allen Haltestellen erfasst und digitalisiert. 1998/99 wurde in Zusammenarbeit mit den Kreisplanern der Stand der Erschliessung frisch erhoben und digitalisiert. In Zusammenarbeit mit den Gemeinden wird diese Erhebung jährlich nachgeführt.

Das Ziel der Digitalisierarbeit ist, die Daten aktuell zu halten, denn nur aktuelle Daten behalten ihren Wert. Während zu Beginn der GIS-Tätigkeit der Schwerpunkt in der Ersterfassung lag, hat sich heute das Schwergewicht hin zur Nachführung verlagert.

Raumplanungsdaten können auch im Internet interaktiv abgerufen werden. Seit September 1998 können Richtplan-Gesamtkarte und Bauzonenpläne unter <http://www.ag.ch/raumplanung> abgerufen werden. Seit Herbst 1999 ist auch der aktuelle Richtplantext mit der Richtplan-Gesamtkarte verknüpft und kann im Internet angezeigt oder als Ganzes bezogen werden.

### **3. DIE FACHSTELLE AGIS DER ABTEILUNG LANDSCHAFT & GEWÄSSER**

Schon Anfang der 80ziger Jahre begann die Abteilung Landschaft & Gewässer in Zusammenarbeit mit der ETH Zürich erste Inventare aus dem Bereich Fauna und Flora digital zu erfassen. In der Abteilung befindet sich die kantonale Naturschutzfachstelle, welche für den Erhalt und die Entwicklung der Natur und Landschaft im Kanton maßgeblich verantwortlich ist. Neben Baugesuchsbeurteilungen aus Sicht des Naturschutzes, geben die Datengrundlagen einen Überblick über die vorhandenen Naturwerte und lassen die Erarbeitung von Strategien für die Entwicklung der Landschaft zu. Somit sind digitale raumbezogene Daten aus dem Natur- und Landschaftsbereich Grundlage für die Beurteilung der Landschaftsqualität. Sie werden benötigt für Monitoringprojekte (z.B. Biodiversitätsmonitoring) und dienen der Erfolgskontrolle von Natur und Landschaftsschutzmassnahmen wie beispielsweise Programmen zur Ökologisierung der Landwirtschaft mit Hilfe von Bewirtschaftungsverträgen.

Heute verfügt die Abteilung über ein breites Spektrum an digitalen Datensätzen. Aus dem Tierreich sind das vor allem Inventare der wichtigsten Tiergruppen: Vögel, Amphibien, Reptilien, Fledermäuse. Seit dem Wiedererscheinen des Bibers wird diesen Daten sogar besondere Aufmerksamkeit gewidmet und die Verbreitung des Tiers ständig aktualisiert. Aus dem Bereich Flora sind dies Inventare der Trockenstandorte oder auch der besonders schützenswerten Waldränder oder Hecken. Neben den eher dynamischen Datensätze aus dem Pflanzen und Tierreich, welche einen grossen Aufwand für die Nachführung verlangen, verfügt die Abteilung über Daten zu sämtlichen durch Gesetze geschützten Gebiete wie Naturschutzgebieten, Beitrags- und Aufwertungsgebieten oder Auengebieten, welche jüngst im Projekt Auenschutzpark Kanton Aargau ([www.ag.ch/natur2001/auenschutzpark](http://www.ag.ch/natur2001/auenschutzpark)) in den Richtplan überführt wurden. Weiter sind sämtlich Flächen aus der kommunalen Bau- und Nutzungsplanung im BIOLADA integriert. Und nicht zuletzt ist in der jüngsten Zeit mit dem digitalen Bachkataster ein digitales Gewässerinformationssystem entstanden, welches von den verschiedensten Fachabteilungen als Datengrundlage verwendet wird. Neben dem Routensystem (ARC/INFO) der Gewässer, werden Fischenzen, Wassernutzungsbewilligungen, und auch die Ökomorphologie der Aargauischen Gewässer auf dem digitalen Gewässernetz, welches im Maßstab 1:5'000 erhoben wurde abgebildet. Der digitale Bachkataster ist ein gutes Beispiel für eine fachübergreifende Nutzung digitaler Datenbestände und somit auch ein Beispiel für die verbindende Wirkung von Geodaten über die Fachgrenzen einer Verwaltung hinaus.

### **4. DATEN DER ARCVIEW-ANWENDUNG BIOLADA**

#### **4.1 Die ArcView-Anwendung BIOLADA**

Die ArcView-Anwendung BIOLADA wurde von der Abteilung Landschaft & Gewässer des Baudepartements des Kantons Aargau für die Darstellung der Gewässer, Dolungen und Bauten an Gewässern sowie die Darstellung sämtlicher natur- und landschaftsschützerisch relevanter Daten entwickelt. Sie ist auf einem UNIX-Server installiert und so eingerichtet, dass beim Aufstarten nur wenige Grunddaten geladen werden. Der Benutzer wählt anschliessend die Daten aus, die er angezeigt haben will. Damit entfallen lange Wartezeiten beim Aufstarten der Anwendung.

Die BIOLADA-Benutzer haben auf ihren PC's die Terminalemulation eXcursion 7.0 von DEC installiert und rechnen auf dem Server. Auf den PC wird nur das Bild übermittelt. Dies bewirkt eine geringe Netzbelastung und kurze Antwortzeiten auch bei grossen Datenmengen, beispielsweise bei der Übermittlung von Rasterdaten der Basiskarten. Die Daten können zentral auf dem Server gehalten werden und aufwendige Update-Übungen entfallen.

## **4.2 Grundfunktionalitäten**

Im BIOLADA werden automatisch folgende Basiskarten eingeblendet: Bis zu einem Darstellungsmassstab von 1 : 10'000 wird der Übersichtsplan 1 : 5'000 des Vermessungsamtes angezeigt, zwischen den Massstäben 1 : 10'000 und 1 : 40'000 die Landeskarte 1 : 25'000 und bei Massstäben kleiner als 1 : 40'000 die Landeskarte 1 : 100'000. Beim Aufstarten werden die Gemeindegrenzen, die Bäche und die eingedolten Bachstrecken automatisch geladen.

Um sich auf dem gesamten Kantonsgebiet rasch zurechtzufinden, kann entweder eine Gemeinde oder ein Bachlauf angewählt werden. Ein spezieller Button stellt den Startausschnitt wieder her, falls man sich auf irgendeine Art und Weise verirrt hat.

Ein Druckmenu erstellt auf Knopfdruck A4- oder A3-Ausdrucke der aktuellen Ansicht. Mit speziellen Buttons können Distanzen gemessen oder Flächen planimetriert werden.

## **4.3 Raumplanungsdaten in der täglichen Anwendung**

Im BIOLADA können sämtliche verfügbaren Raumplanungsdaten abgefragt und mit Daten anderer Fachstellen kombiniert werden. Für die Überprüfung von Baugesuchen wurde eine massgeschneiderte Lösung entwickelt. Mit der Koordinatenangabe des Bauherrn kann am Bildschirm festgestellt werden, welche kantonalen Fachstellen das Baugesuch zu beurteilen haben. Die Daten von sämtlichen Fachstellen im Umweltbereich erzielen hier einen grossen Synergie-Effekt. Diese Informationen waren früher – wenn überhaupt – auf mehreren Plänen festgehalten und mussten zuerst zusammengesucht werden.

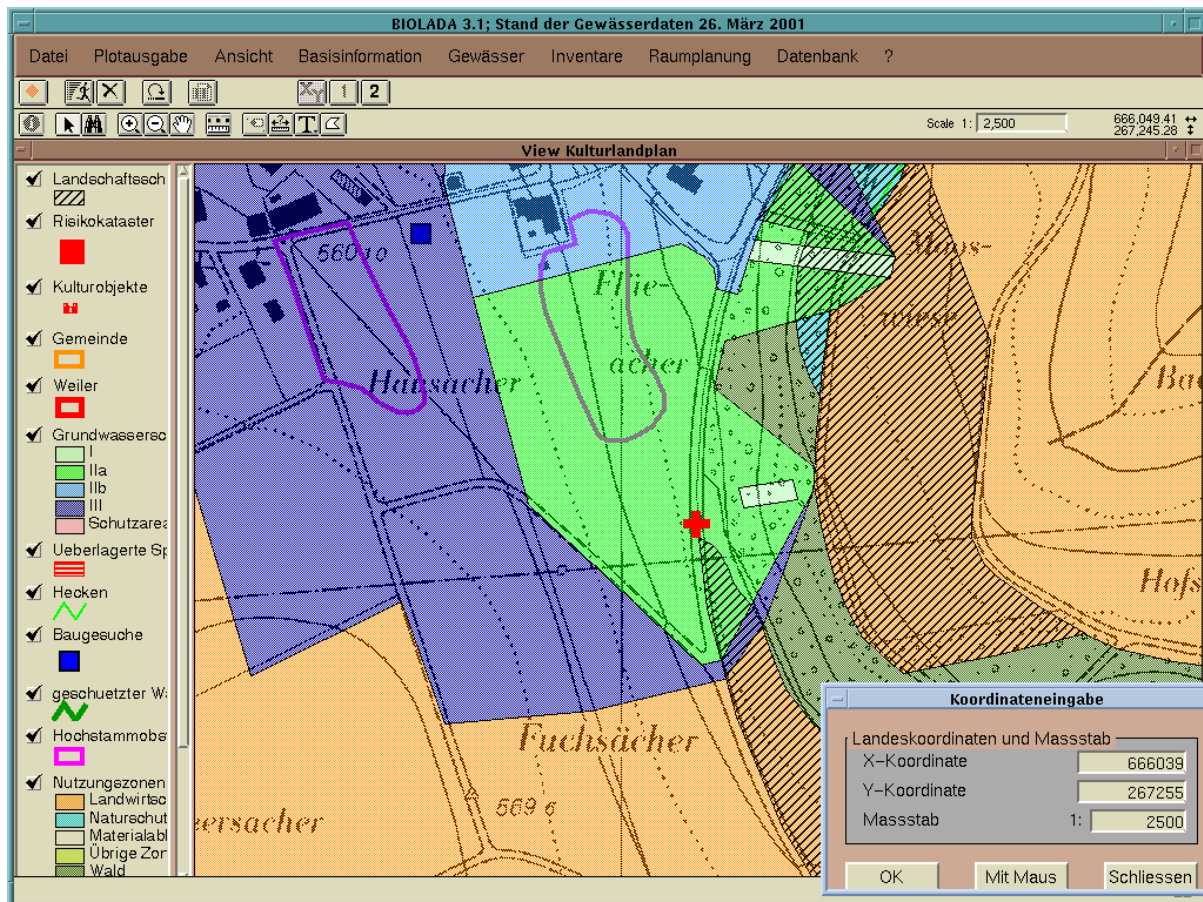


Abb. 1: Massgeschneiderte Lösung zur Überprüfung von Baugesuchen

#### 4.4 Natur- und Landschaftsschutzdaten

Wie bereits in Kap3 erwähnt bestehen die Daten zum Natur und Landschaftsschutz aus einer Reihe von Inventaren zu den wichtigsten Tiergruppen, sowie aus einer Reihe von Schutz- und Nutzungsgebiete mit unterschiedlichstem Schutz- und Nutzungsstatus. Neben den Daten der Abteilung Landschaft & Gewässer werden auch Daten aus dem Bereich Umweltschutz zur Verfügung gestellt. Beispiele sind die Altlastenverdachtsflächen, Grundwasserkarten, Bodenkarten sowie der kantonale Risikokataster. Das Informationssystem wird ebenfalls von den Sachbearbeitern verschiedener Umweltschutzfachstellen (z.B. Grundwasser und Boden) eingesetzt.

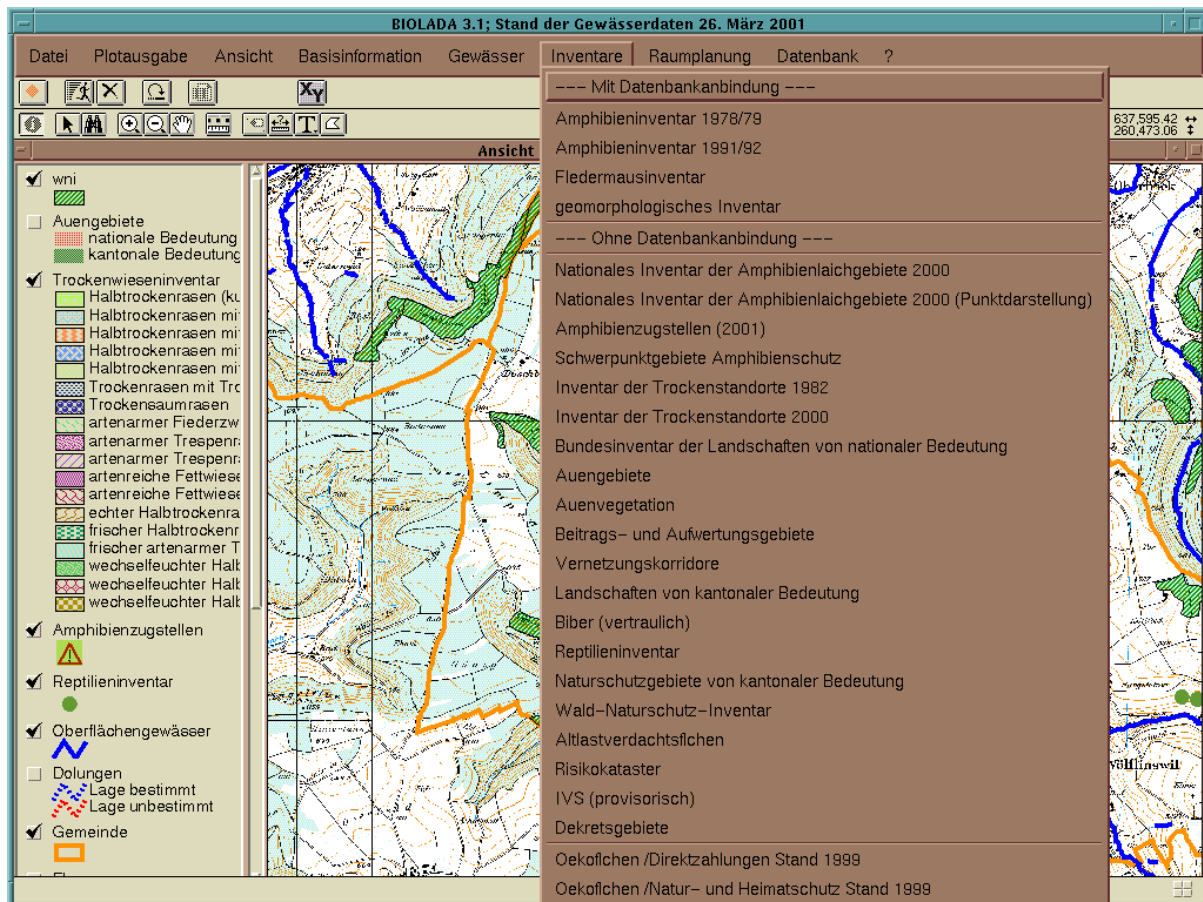


Abb. 2: Das Modul "Inventare" im Informationssystem BIOLADA bietet eine Reihe von Daten aus verschiedenen Tier- und Pflanzenerhebungen.

## 4.5 Weitere Funktionalitäten

Neben dem Visualisieren bietet BIOLADA eine Reihe weiterer GIS Funktionalitäten, welche auch ständig unter Mitarbeit und auf Anregung der Nutzer weiterentwickelt werden. Neustes Modul ist eine vollautomatisierte Erstellung verschiedenster vordefinierter thematischer Karten (z.B. Gemeindegarten mit den Grundlagedaten zum Natur- und Landschaftsschutz). Weiter stehen auch Analysemöglichkeiten, beispielsweise für Sichtbarkeitsanalysen bei der Beurteilung von Antennenbauten, den Sachbearbeitern zur Verfügung.



# Die Nutzung von Hyperspektraldaten zur Erfassung von Bodeneigenschaften- Grundlagen und Anwendungsperspektiven

THOMAS UDELHOVEN, THOMAS JARMER & JOACHIM HILL<sup>1</sup>

*Abstract: The benefit of hyperspectral data analysis for the characterisation of top soils is demonstrated by many studies. Especially its potential to quantitatively derive chemical soil parameters using high temporal and spatial resolution is an attractive issue in the frame of precision farming applications. In-situ measurements are strongly influenced by illumination, moisture, geometry, and surface roughness. In the present study major differences were found between an in-situ and laboratory spectrometry approach, which could be attributed to the different degree on sample homogeneity. Using the laboratory data reliable estimation accuracy was obtained for organic carbon, Ca, Mg, Fe, Mn and K using partial-least-square-regression. The potential of remotely operating hyperspectral sensors such as AVIRIS, HyMap and DAIS-7915 are discussed in respect to an estimation of chemical soil parameters.*

## 1 Einleitung

Die bi-direktionelle Reflexion von Böden hängt von zahlreichen Faktoren ab. Während der Wellenlängenbereich 0.4 – 0.8  $\mu\text{m}$  durch elektronische Anregungen gekennzeichnet ist, die allerdings durch Vibrationsbanden in ihrer Energie stark „verschmiert“ werden, sind spektrale Signaturen im Bereich zwischen 0.8 und 2.5  $\mu\text{m}$  auf physikalische Oberschwingungen der Vibrationsgrundschwingungen und deren untereinander interferierenden Kombinationschwingungen zurückzuführen. Eine Vielzahl mineralogischer und organischer Bestandteile mit ihren OH-, SO<sub>4</sub>-, CH-, NH- und CO<sub>3</sub>-Gruppen sind hier durch spektrale „fingerprints“ erkennbar (HUNT & SALISBURY, 1970, 1971). Die geringen Intensitäten von Oberschwingungen höherer Ordnung und die Vielzahl möglicher Kombinationsschwingungen selbst einfacher Moleküle (SCHMIDT, 2000) erschwert jedoch die Quantifizierung von Bodeninhaltsstoffen.

Multivariate statistische Methoden wie etwa multiple Regressionsanalyse, Hauptkomponentenregression, Partial-Least-Square-Regression und neuronale Netze, bieten hier Lösungsmöglichkeiten. In zahlreichen Studien wurde u.a. ein relativ enger Zusammenhang zwischen Bodenreflexion und organischer Substanz (KRISHNAN ET AL., 1980, DALAL & HENRY, 1986), Eisengehalt (HUNT & SALISBURY, 1971, BAUMGARDNER ET AL. 1985), hygroskopischer Feuchte (DALAL & HENRY, 1986), Tongehalt, spezifischer Oberfläche, und Carbonatgehalt (BEN-DOR & BANIN, 1990, 1994) nachgewiesen. Die empirischen Modellansätze erfordern dabei eine entsprechende Zahl an Referenzen, um die Modelle kalibrieren und validieren zu können.

In-situ Reflexionsmessungen im Gelände sind in starkem Maße von Faktoren wie aktuellen Beleuchtungsverhältnissen, Bodenfeuchte, Aufnahmegeometrie und Oberflächenrauigkeit abhängig. Diese Effekte maskieren teilweise die Korrelationen zwischen chemischen Kenngrößen und Reflexionsdaten. Für die Erstellung spektraler Bibliotheken wird deshalb häufig auf die Laborspektrometrie zurückgegriffen, da hier die Messbedingungen genauer kontrolliert werden können.

---

<sup>1</sup> Universität Trier, Abteilung Fernerkundung, 54286 Trier

In der vorliegenden Studie werden sowohl in-situ- als auch Labor-Reflexionsmessungen für die Quantifizierung von Bodenelementen verwendet und eine Beurteilung gängiger Hyperspektralsensoren für die Erfassung pedogener Eigenschaften vorgenommen.

## 2 Methoden

### 2.1 Untersuchungsgebiet

In einer Fallstudie wurde ein 14 ha großer Schlag („Helenenberg“) im Bitburger Gutland, einer Region in der Südeifel, im Anschluss an die Ernte während einer Trockenwetterperiode im August 1999 beprobt. Hier liegt eine eutrophe Braunerde aus dolomitischem, calciumreichen Lößlehm über einer Terra fusca. Die Erfassung der räumlichen Heterogenität erfolgte in einem 60x60 m Beprobungsraster. An den Messstellen wurden Reflexionsmessungen durchgeführt und jeweils eine Oberbodenprobe für die chemischen Analysen und Reflexionsmessungen im Labor entnommen. Der hierbei gewonnene Probensatz umfasst insgesamt 139 Proben.

Ein unabhängiger Satz von 158 Bodenproben wurde freundlicherweise von der Abteilung Bodenkunde der Universität Trier zur Verfügung gestellt. 58 dieser Proben stammen aus dem Bitburger Gutland (Eifel), 100 aus dem benachbarten Hunsrück. Im Unterschied zur Rasterbeprobung im Bitburger Gutland repräsentiert dabei jede Probe einen unterschiedlichen Schlag. Der vorherrschende Bodentyp der Hunsrückproben ist eine mesotrophe Braunerde, während der Bodentyp der Eifelproben je nach dem vorherrschenden Ausgangssubstrat (Muschelkalk, Keuper, Buntsandstein) stark variiert. Die Reflexion dieser Proben wurde ausschließlich im Labor an homogenisierten Proben gemessen.

### 2.2 Analytik und Reflexionsmessungen

Zur Gehaltsbestimmung wurden 45 zufällig ausgewählte Bodenproben des Schlags „Helenenberg“ in einem Druckbombenblock (DAB 2 der Fa. Berghof) mit HNO<sub>3</sub> (65%, p.a.) nach Zerstoßen der Proben im Achatmörser fünf Stunden lang bei 170°C aufgeschlossen und die Elemente Eisen, Mangan, Calcium, Magnesium und Kalium am Atomabsorptionsspektroskop (AAS, VARIAN-SPECTRAA-10) in der Flamme im Acetylen-Luftgemisch gemessen. Die Bestimmung von organischem und anorganischem Kohlenstoff erfolgte mit allen verfügbaren Proben durch trockene Veraschung in einem temperaturgeregeltem C(H)N-Analysator (Leco CHN-1000). Für die Proben aus Hunsrück und Eifel wurden die Analysedaten für Phosphat, Kalium, Stickstoff und C<sub>org</sub> von der Abteilung Bodenkunde zur Verfügung gestellt.

Die Reflexionsmessungen der Bodenproben erfolgten mit einem ASD FieldSpec II Spectrometer in 1 nm Schritten im Wellenlängenbereich zwischen 0.4 und 2.5 µm. Im Gelände wurde als externe Beleuchtungsquelle eine ASD high intensity reflectance probe (A122000) eingesetzt. Dabei handelt es sich um eine batteriebetriebene Stablampe, die eine runde Messkammer mit einem Durchmesser von 10 cm ausleuchtet, an der seitlich der Sensor befestigt wird. Nach einer in-situ Messung wurde von der Messfläche jeweils eine Oberbodenprobe entnommen und für die spätere Reflexionsmessung im Labor durch Siebung (2mm Maschenweite) homogenisiert.

## 2.3 Mathematische Methoden

Um die Bodenspektren untereinander vergleichbar zu machen, wurden die Min-Max-Normierung und die Vektornormierung eingesetzt (Otto, 1997), wobei bei letzterem Verfahren zunächst eine Zentrierung der Spektren um ihren Mittelwert erfolgte. Zusätzlich wurden erste und zweite Ableitungsspektren nach dem Savitzky-Golay-Algorithmus (Savitzky & Golay, 1964) sowie die Convex-Hull berechnet.

Die Schätzung der Bodeninhaltsstoffe aus den Reflexionsspektren erfolgte mit der „partial-least-square regression“ (PLS) (Otto, 1997). Die optimale Anzahl ( $d$ ) der PLS latenten Variablen, die Variationen in  $X$  und  $Y$  in abnehmender Ordnung beschreiben, wurde bestimmt, indem der „root mean square error“ der Kreuzvalidierung ( $RMSE_{CV}$ ) für Modelle mit unterschiedlichen Werten für  $d$  minimiert wurde. (Teppola et al., 1997).

Die PLS wurde auch auf simulierten Spektren ausgewählter Hyperspektral-Sensoren (AVIRIS, HyMap, DAIS-7915) angewendet. Die Daten wurden hierbei aus Laborspektren (FieldSpec II) errechnet, wobei Lage, Bandbreite und Filtercharakteristik der Bilderzeugenden Sensoren Berücksichtigung fanden. Vernachlässigt wurde jedoch das reale signal-to-noise Verhältnis der Sensoren. Die Sensitivitätsprüfung der PLS-Modelle gegenüber einem Fehlerterm erfolgte vereinfacht durch Addition der simulierten Spektren mit künstlichen normalverteilten Rauschspektren unterschiedlicher Varianz (0.001, 0.0025, 0.005, 0.0075, 0.01 Reflexionseinheiten). Zu beachten ist hierbei, dass bei diesem Vorgehen kleinere Reflexionswerte im Vergleich zu großen Werten stärker verrauscht werden.

## 3 Ergebnisse

Am Beispiel des organischen und anorganischen Kohlenstoffs sind in Tabelle 1 die Auswirkung verschiedenen Datenvorbehandlungstechniken auf die Modellschätzungen aufgeführt. Beide Messgrößen wurden mit PLS-Modellen, die mit Laborspektren kalibriert wurden, am genauesten geschätzt. Die Modellierungsergebnisse verbessern sich außerdem bei Verwendung vektornormierter oder Min-Max-normierter Reflexionsspektren. Damit werden spektrale Albedounterschiede zwischen den Spektren reduziert, während die Form der Spektren einschließlich der spektralen Signaturen erhalten bleiben. Im Falle der  $C_{org}$ -Schätzungen lässt sich die Bevorzugung normierter Spektren für die PLS durch den relativ engen Konzentrationsbereich erklären ( $C_{org}$  Minimum: 1.12,  $C_{org}$  Maximum: 2.46), denn dadurch können andere optisch aktive Substanzen wie etwa Eisenoxide, den Einfluss des organischen Kohlenstoffs auf die spektrale Albedo maskieren (JARMER & SCHÜTT, 1998). Der Einfluss solcher Substanzen kann offensichtlich durch die Spektrennormierung reduziert werden. Außerdem ist zu berücksichtigen, dass Humusstoffe im Boden keine fest definierte chemische Verbindung darstellen, sondern zersetzte, umgeformte und neu gebildete organische Substanzen pflanzlicher und tierischer Herkunft umfassen. Beim anorganischem Kohlenstoff ist die Verbesserung der Modellierungsergebnisse nach der Normierung auf die bessere Abbildung der Unterschiede in der charakteristischen Absorptionsbande bei  $2.33 \mu m$  (Hunt & Salisbury, 1971) zurückzuführen. Eine räumliche Spline-Interpolation der (kreuzvalidierten)  $C_{anorg}$ -Schätzungen für den Schlag „Helenenberg“ zeigt die Abbildung 1. Die räumliche Verteilung der gemessenen Konzentrationen wird sehr gut durch die PLS-Modelle, die mit den Laborspektren kalibriert wurden, reproduziert.

Tabelle 1: PLS-Schätzungen (Kreuzvalidierung) für organischen und anorganischen Kohlenstoff für die Bodenproben des Schlags "Helenenberg" in Abhängigkeit der Spektrenvorverarbeitung

<b>C<sub>org</sub></b>	<b>Laborspektrometrie</b>		<b>Geländespektrometrie</b>
<b>RMSE<sub>cv</sub></b>	<b>Spektrenvorverarbeitung</b>	<b>RMSE<sub>cv</sub></b>	<b>Spektrenvorverarbeitung</b>
0.146	Keine	0.179	Keine
<b>0.140</b>	Min-max Normalisierung	0.204	Min-max Normalisierung
0.152	Vektor Normalisierung (VN)	<b>0.177</b>	Vektor Normalisierung (VN)
0.151	1. Ableitung	0.201	1. Ableitung
0.147	1. Ableitung + VN	0.202	1. Ableitung + VN
0.262	2. Ableitung	0.199	2. Ableitung
0.198	Convex-hull	0.213	Convex-hull
<b>C<sub>anorg</sub></b>	<b>Laborspektrometrie</b>		<b>Geländespektrometrie</b>
<b>RMSE<sub>cv</sub></b>	<b>Spektrenvorverarbeitung</b>	<b>RMSE<sub>cv</sub></b>	<b>Spektrenvorverarbeitung</b>
0.258	Keine	0.579	Keine
0.245	Min-max Normalisierung	0.506	Min-max Normalisierung
<b>0.242</b>	Vektor Normalisierung (VN)	<b>0.500</b>	Vektor Normalisierung (VN)
0.269	1. Ableitung	0.543	1. Ableitung
0.256	1. Ableitung + VN	0.521	1. Ableitung + VN
0.591	2. Ableitung	0.596	2. Ableitung
0.365	Convex-hull	0.736	Convex-hull

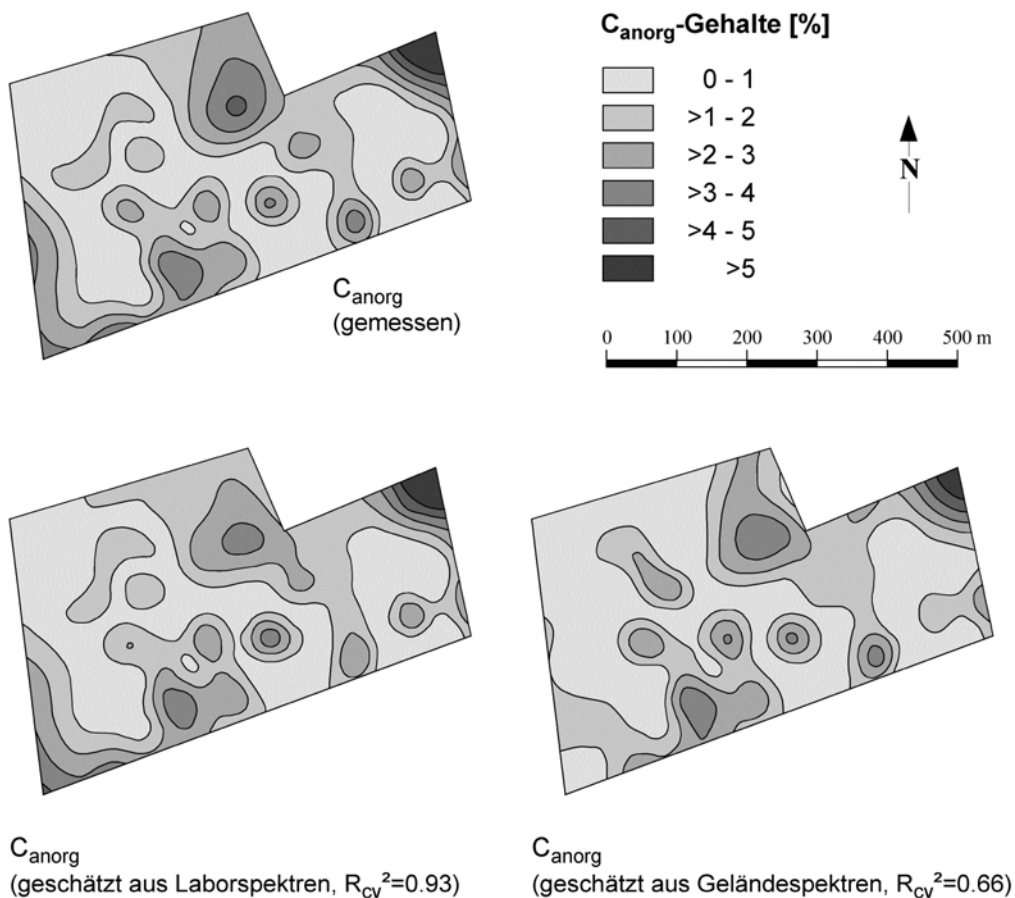


Abbildung 1: Räumliche Interpolation (Spline) der gemessenen und geschätzten Konzentrationen von anorganischem Kohlenstoff auf dem Schlag „Helenenberg“

Beim in-situ-Ansatz sind dagegen deutliche Abweichungen im Muster von gemessenen und geschätzten Werten zu beobachten. Für den organischen Kohlenstoff wurde selbst für den Laboransatz nur ein mittelmäßiges Schätzergebnis erzielt ( $R_{cv}^2=0.60$ ).

Die Modellierungsergebnisse für die Nährstoffschätzungen sind in der Tabelle 2 zusammengefasst. Auch hier führt die Laborspektrometrie zu besseren Gehaltsschätzungen als der in-situ-Ansatz. Der unterschiedliche Grad der Homogenisierung der Proben vor der Messung ist hierfür verantwortlich. Insbesondere der von den Makro-Bodenaggregaten hervorgerufene Schattenwurf stört die Korrelation der Messgrößen mit Signaturen der Reflexionsspektren.

Die durch die Reflexionsspektren erklärte Varianz der einzelnen Messgrößen beträgt bei optimaler Datenvorverarbeitung im Falle des Laboransatzes mindestens 84%, wobei in der Regel wiederum vektornormierte und Min-Max-normierte Spektren zu den besten PLS-Schätzungen führen. Bei Nutzung der simulierten Hyperspektraldaten (AVIRIS, HyMap und DAIS-7915) wird eine vergleichbare Qualität der Modellierungsergebnisse erreicht wie bei Verwendung der FieldSpec-Daten, trotz der damit verbundenen drastischen Reduktion der spektralen Stützstellen.

Zur weiteren Interpretation der Ergebnisse wurden Korrelationspektren zwischen den Reflexionswerten und chemischen Meßgrößen berechnet (Abbildung 2). Offensichtlich korreliert die Reflexion im gesamten Wellenlängenbereich mehr oder weniger deutlich mit allen berücksichtigten Bodeneinhaltsstoffen, ein deutliches Zeichen für indirekte Korrelationen der ermittelten Messgrößen mit unbekanntem, jedoch optisch aktiven Hintergrundgrundvariablen. Dies erklärt auch die deutlichen Strukturen in den Korrelationspektren der Metallionen im

Tabelle 2: PLS-Schätzungen (Kreuzvalidierung) ausgewählter Bodenmessgrößen für die Rasterbeprobung auf dem Schlag „Helenenberg“ (Bitburger Gutland)

	Spektrenvorverarbeitung	FieldSpec (in-situ) $r^2 \cdot 100$	FieldSpec (lab) $r^2 \cdot 100$	Sim. Aviris $r^2 \cdot 100$	Sim. HyMap $r^2 \cdot 100$	Sim. Dais $r^2 \cdot 100$
<b>Fe [g/kg]</b>	Keine	52.95	79.54	78.62	79.86	79.76
Min: 21.9	Vektornorm..	55.67	82.68	<b>79.68</b>	79.86	81.70
Max: 42	Min-max Norm.	54.13	<b>84.03</b>	78.34	<b>84.48</b>	<b>84.07</b>
Mittel: 29.6	1. Ableitung	56.34	75.05	76.10	78.32	74.55
<b>Mn [g/kg]</b>	Keine	53.06	82.36	80.10	82.39	73.38
Min: .88	Vektornorm.	46.45	<b>86.63</b>	81.06	82.39	<b>75.9</b>
Max: 2.32	Min-max Norm.	59.66	84.90	<b>82.76</b>	<b>83.00</b>	74.64
Mittel: 1.4	1. Ableitung	50.15	67.67	80.73	82.79	73.21
<b>Ca [g/kg]</b>	Keine	62.86	92.84	87.82	92.63	92.90
Min: 2.6	Vektornorm	60.51	93.92	<b>92.39</b>	92.63	94.09
Max: 97.4	Min-max Norm.	67.54	<b>94.24</b>	90.50	<b>94.19</b>	<b>94.10</b>
Mittel: 42.2	1. Ableitung	67.70	92.56	86.84	92.00	91.39
<b>Mg [g/kg]</b>	Keine	63.36	87.96	82.98	87.58	87.56
Min: 4.7	Vektornorm	65.41	89.87	87.96	87.58	86.59
Max: 80.5	Min-max Norm.	58.93	<b>90.61</b>	<b>87.97</b>	<b>89.98</b>	<b>89.53</b>
Mittel: 39.0	1. Ableitung	68.93	83.56	84.91	86.88	82.57
<b>K [g/kg]</b>	Keine	65.18	82.86	<b>79.77</b>	82.19	<b>81.02</b>
Min: 7.1	Vektornorm	62.24	82.44	75.95	82.19	78.71
Max: 17.4	Min-max Norm.	60.91	80.86	77.19	<b>84.76</b>	80.04
Mittel: 12.7	1. Ableitung	52.02	<b>85.25</b>	74.53	81.61	77.94

Wellenlängenbereich 0.8-2.4  $\mu\text{m}$ , da direkte Korrelationen ausschließlich im VIS (Elektronenübergänge) zu erwarten sind.

Die Korrelationsspektren lassen sich aufgrund ihrer Form zwei Klassen zuordnen. Organischer Kohlenstoff, Eisen und Mangan bilden die erste Gruppe. Deren gemeinsame Hintergrundvariable sind Eisen- und Manganoxide, die mit Humusbestandteilen u.a. in Form von Coatings assoziiert sind. Die Hintergrundvariable der zweiten Gruppe, der Calcium, Magnesium, anorganischer Kohlenstoff und Kalium angehören, stellen Tonminerale, Feldspat, Ausgangsgestein sowie Düngemittel dar. Der Tonmineraleinfluss ist hier an den kleinen negati-

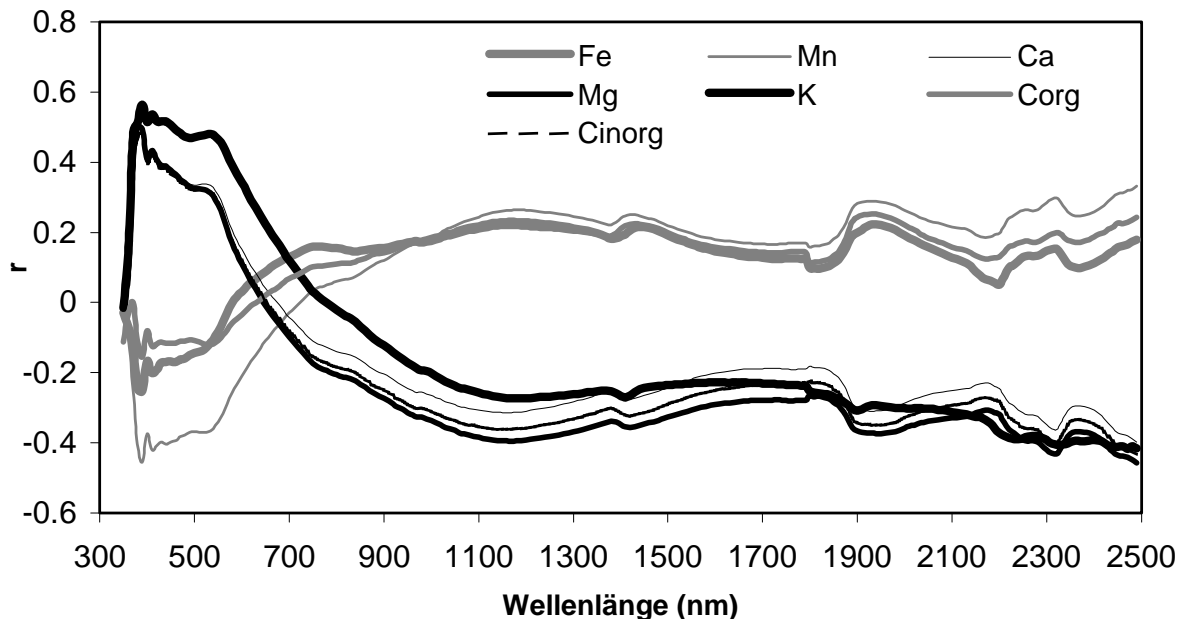


Abbildung 2: Korrelationsspektren

ven Korrelationsspeaks bei den Wellenlängen um 1.45  $\mu\text{m}$  und 2.2  $\mu\text{m}$  erkennbar. Diese korrespondieren mit OH-me-OH- Banden (me= Fe, Mg, Al) der Tonminerale (HUNT & SALISBURY, 1971). Das vorherrschende Tonmineral in den untersuchten Böden ist Illit, dessen Kationenaustauschplätze hauptsächlich von Ca, Mg und K besetzt sind (SCHEFFER, 1982). Der Carbonateinfluss (Ca, Mg) in dieser Gruppe ist deutlich am negativen Korrelationspeak bei 2.33  $\mu\text{m}$ , der Position der Carbonatbande, erkennbar. Bei 1.9  $\mu\text{m}$  erscheint die OH-Bande von freiem Wasser.

Die bisherigen Ergebnisse beruhen auf Bodenspektren einer einzigen Ackerparzelle. Daher stellt sich die Frage, wie genau chemische Bodenkenngrößen aus Böden unterschiedlicher Bewirtschaftung (konventionell, integriert, biologisch) abgeleitet werden können. Die Tabelle 3 fasst die Ergebnisse der PLS-Modelle zusammen, die mit Bodenspektren des Bitburger Gutlands und des Hunsrücks gesondert kalibriert wurden. Die vorher untersuchten Bodenproben des Schlags „Helenenberg“ fanden hierbei keine Berücksichtigung. Die  $C_{\text{org}}$ -

Schätzungen der Hunsrückproben sind qualitativ deutlich besser als die der Eifelproben. Im Unterschied zu den oben dargestellten Ergebnissen führt eine Kalibrierung der PLS mit normierten Spektren im Falle von  $C_{org}$  dabei zu einer Verschlechterung der Schätzergebnisse. Die Ursache hierfür ist der größere Wertebereich der organischen Kohlenstoffgehalte im vorliegenden Probensatz, der eine Schätzung der organischen Substanz vorwiegend durch spektrale Albedounterschiede zwischen den Proben ermöglicht.

Tabelle 3: PLS-Schätzungen (Kreuzvalidierung) ausgewählter Bodenmessgrößen für Bodenproben aus Eifel und Hunsrück. Die PLS-Modelle wurden mit Reflexionsspektren kalibriert, die im Labor an homogenisierten Proben gemessen wurden.

	Opt. Datenvorverarbeitung	Eifel (N=58)		Hunsrück (N=100)	
		$R^2$	RMSE <sub>CV</sub>	$R^2$	RMSE <sub>CV</sub>
$C_{org}$	Keine Normierung	0.74	0.288	0.86	0.235
N	Keine Normierung	0.50	0.048	0.52	0.045
K	Vektornormierung	0.02	10.10	0.02	10.82
P	Vektornormierung	0.17	9.843	0.14	6.192

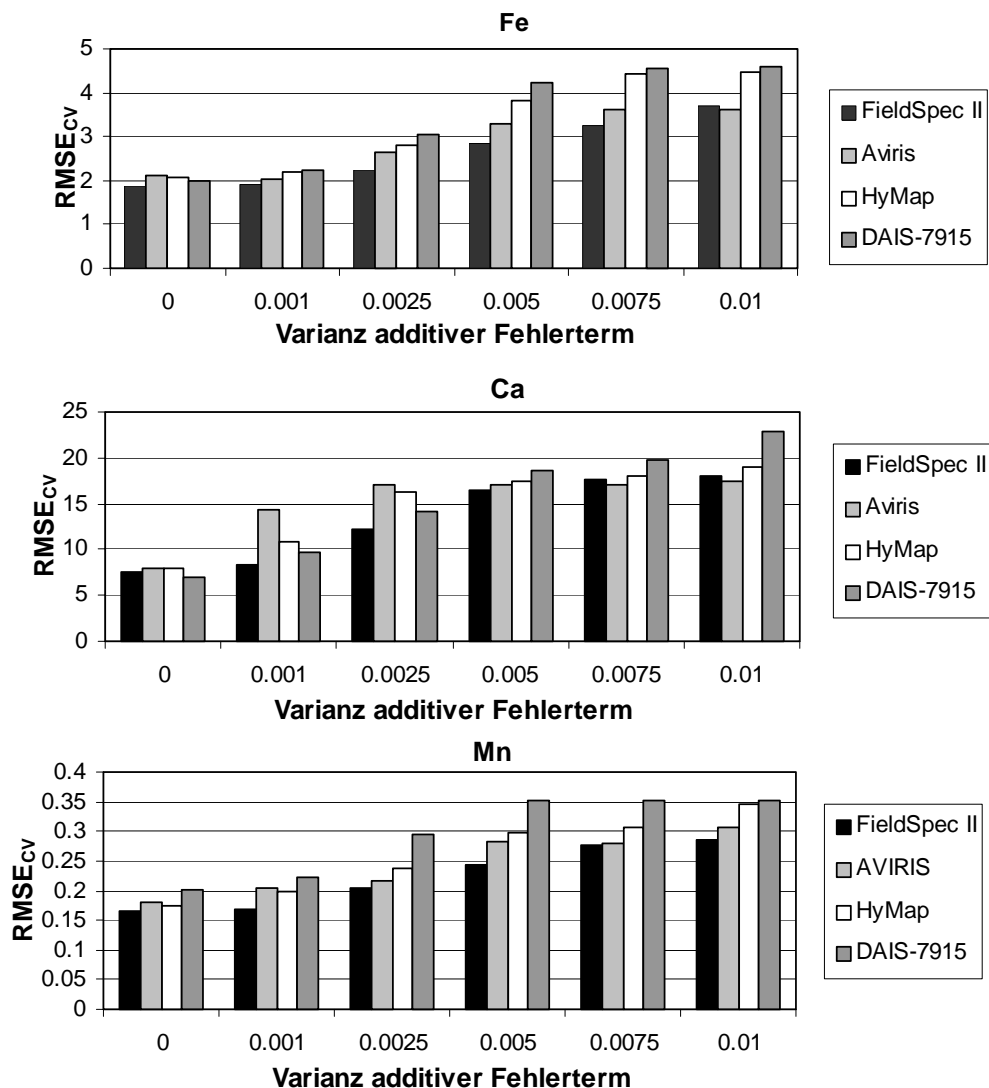


Abbildung 3: Auswirkungen eines additiven, normalverteilten spektralen Rauschterms auf die Stabilität der PLS für verschiedene Sensoren.

Die Nährstoffe Kalium und Phosphat sind hingegen bei Eifel- und Hunsrückproben kaum mit den Reflexionsspektren korreliert. Dies ist damit zu erklären, dass die Korrelationsstruktur beider Nährstoffe zu optisch aktiven Hintergrundvariablen zwischen den einzelnen Standorten verschieden ist, was die Erstellung eines repräsentativen statistischen Modells erschwert.

Die komplexe Korrelationssignatur zwischen chemischen Messgrößen und Reflexionswerten erschwert die Suche nach Wellenlängen, die exklusive Informationen über einzelne Bodenelemente enthalten, da statistische Verfahren wie die PLS nicht zwischen direkten und indirekten Korrelationen unterscheiden können. Diese Tatsache stellt generell die Übertragbarkeit statistischer Modelle auf andere Untersuchungsgebiete bei verschiedenen Interkorrelationsstrukturen zwischen abhängigen und unabhängigen Variablen in Frage.

Die Stabilität der Modellierungsergebnisse gegenüber künstlich verrauschten Spektren des Schlages „Helenenberg“ ist in Abbildung 3 dargestellt. Erwartungsgemäß steigt der Schätzfehler ( $RMSE_{CV}$ ) bei zunehmender Varianz der Rauschkomponente an, aber es zeigen sich auch sensorspezifische Unterschiede. In Abhängigkeit von der Anzahl der Spektralkanäle steigt der  $RMSE_{CV}$  in der Reihenfolge FieldSpec II (2100 Kanäle), AVIRIS (256 Kanäle), HyMap (128 Kanäle) und DAIS-7915 (72 Kanäle). Eine Erklärung hierfür liefert ein sinkender Kollinearitätsgrad innerhalb der Spektren der berücksichtigten Sensoren. Die PLS nutzt die Redundanz der X-Matrix, um die Vorhersageergebnisse gegen Rauscheinflüsse zu stabilisieren (BEEBE ET AL., 1998). Diese Redundanz ist in den FieldSpec-Spektren aufgrund der eng benachbarten spektralen Stützstellen am größten, bei DAIS-7915-Spektren ist er hingegen am geringsten. Bei einer zusätzlichen künstlichen Störgröße sinkt der Kollinearitätsgrad innerhalb der DAIS-7915-Spektren daher besonders deutlich.

## 4 Fazit

Hinsichtlich der Schätzgenauigkeit der erhaltenen PLS-Modelle ist die Laborspektrometrie der Geländespektrometrie überlegen. Außerdem kommt der Spektrenvorverarbeitung für die Modellierungsergebnisse eine große Bedeutung zu. Bei den schlagbezogenen PLS-Modellen wurde für die chemischen Meßgrößen, mit Ausnahme von organischem Kohlenstoff, eine Schätzgenauigkeit erreicht, mit der das räumliche Muster der gemessenen Konzentration reproduziert werden konnte. Hierbei kommt jedoch indirekten Korrelationen der Meßgrößen zu optisch aktiven Hintergrundvariablen eine wichtige Bedeutung zu. Die Quantifizierung von organischem Kohlenstoff gelang dagegen erst mit standortübergreifenden Modellen mit zufriedenstellender Genauigkeit.

Zwischen den chemischen Bodenkenngößen und der spektralen Bodenreflexion bestehen Korrelationen im gesamten Spektralbereich zwischen 0.4 und 2.5  $\mu\text{m}$ , die für empirische Modelle nutzbar sind. Die Frage, welche Wellenlängenbereiche für bodenkundliche Fragestellungen zu bevorzugen sind, lässt sich nur im Einzelfall beantworten. Künftige Fernerkundungssensoren sollten eine hohe geometrische Auflösung und innerhalb der atmosphärischen Fenster auch eine hohe spektrale Auflösung aufweisen, wobei eine größere Auswahl an spektralen Kanälen die Schätzergebnisse gegenüber einem sinkenden signal-to-noise stabilisiert.



## Acknowledgement

Die Untersuchungen wurden im Rahmen des Sonderforschungsbereiches 522 „Umwelt und Region“ von der Deutschen Forschungsgemeinschaft finanziell unterstützt. Unser besonderer Dank gilt Herrn PD Dr. Christoph Emmerling für die Bereitstellung eines Großteils der verwendeten Bodenproben.

## Literaturverzeichnis

- BAUMGARDNER, M. F., L. F. SILVA, BIEHL, L. L AND STONER, E. (1985): Reflectance properties of soils, *Advances in Agronomy*, **38**, 1-44
- BEEBE, K.R., PELL, R.J AND SEASHOLTZ, M.B. (1998): *Chemometrics: A practical guide*. John, 348 pp., New York, (Wiley & Sons, Inc)
- BEN-DOR, E. AND BANIN, A. (1990): Near infrared reflectance analysis of carbonate concentrations in soils.- in: *Appl. Spectrosc.*, **44**, p. 1064-1069
- BEN-DOR, E. AND BANIN, A. (1994): Visible and near-infrared (0.4-1.1  $\mu\text{m}$ ) analysis of arid and semiarid Soils.- in: *Remote Sens. Environ.*, **48**, p. 261-274
- DALAL, R.C. AND HENRY, R. J. (1987): Review, near infrared analysis of food. *Int. J. Food Sci. Technol.*, **22**, p. 191-207
- HUNT, G.R. & SALISBURY, J.W. (1970): Visible and near-infrared spectra of minerals and rocks: I Silicate minerals. *Modern Geology*, **1**, p. 283-300
- HUNT, G.R., SALISBURY, J.W., AND LENHOFF, C.J (1971): Visible and near-infrared spectra of minerals and rocks: III. Oxides and hydroxides. *Modern Geology*, **2**, p. 195-205
- JARMER, T, & SCHÜTT, B. (1998): Analysis of iron contents in carbonate bedrock by spectroradiometric detection based on experimentally designed substrates. In: Schaepman, M., Schläpfer, D. and Itteln, K. (eds.) *1st EARSeL Workshop on Imaging Spectroscopy*. University of Zurich, Switzerland, 1998, p. 375-382.
- KRISHNAN, P., ALEXANDER, D. J., BUTLER, B., AND HUMMEL, J. W. (1980): Reflectance technique for predicting soil organic matter. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **44**, p. 1282-1285
- OTTO, M., (1997): *CHEMOMETRIE. Statistik und Computereinsatz in der Analytik*, 355 pp. Weinheim, (VCH)
- SAVITZKY, A. AND GOLAY, M. J. E. (1964): Smoothing and Differentiation of Data by simplified Least Square Procedure, *Anal. Chem.*, **36**, p. 1627-1638.
- SCHEFFER, F. (1982): *Lehrbuch der Bodenkunde* (11. neubearb. Aufl. / von P. Schachtschabel et al.), 442 pp, Stuttgart, (Enke)
- SCHMIDT, W. (2000): *Optische Spektroskopie*, 2. Aufl., 372 pp., New York, Weinheim, (Wiley-VCH)
- TEPPOLA, P., S.-P. MUJUNEN AND P. MINKKINEN (1997): Partial least squares modeling of an activated sludge plant: A case study. *Chemometrics and Intelligent laboratory Systems*, **38**, p. 197-208.

# Real-Time Object Recognition Using a Modified Generalized Hough Transform

MARKUS ULRICH<sup>1,2</sup>, CARSTEN STEGER<sup>2</sup>,  
ALBERT BAUMGARTNER<sup>1</sup> & HEINRICH EBNER<sup>1</sup>

*Abstract: An approach for real-time object recognition in digital images based on the principle of the generalized Hough transform is proposed. It combines robustness against occlusions, distortions, and noise with invariance under rigid motion and local illumination changes. The computational effort is reduced by employing a novel efficient limitation of the search space in combination with a hierarchical search strategy using image pyramids. This approach uses the shape of the object, i.e., the edge information in the image, as feature and it is general with regard to the type of object.*

## 1 Introduction

In many industrial applications, e.g., quality control, inspection tasks, or robotics, there is a particularly high demand on the object recognition approach to find the object in the image under certain aggravating circumstances. The recognition approach must fulfil real-time requirements, the method should be highly robust against occlusion and clutter and it should additionally be robust against non-linear contrast changes. Since in a great number of industrial applications the appearance of the object to be found has limited degrees of freedom, in this study only rigid motion, i.e., translation and rotation, is considered, which is sufficient in many cases.

In the literature different object recognition approaches can be found. All recognition methods have in common that they require some form of representation of the object to be found, which will be called *model* below. The model can be extracted, e.g., from a CAD representation or from one or more images, called *reference images*, of the object itself. The image, in which the object should be recognized, will be referred to as the *search image*. Almost all object recognition approaches can be split into two successive phases: the *offline phase* including the generation of the model and the *online phase*, in which the constructed model is used to find the object in the search image. Thus, only the computation time of the online phase is critical considering the real-time requirement.

One possibility to group object recognition methods is to distinguish between gray value based, e.g., GONZALEZ & WOODS (1992), BROWN (1992), LAI AND FANG (1999), and feature based strategies, e.g., BORGEFORS (1988), OLSON AND HUTTENLOCHER (1997). Gray value based matching has several disadvantages and does not meet most of the above mentioned demands. It is too computationally expensive for real-time applications and is not robust against occlusions or clutter. Features, e.g., points, edges, polygons, or regions characterize

---

<sup>1</sup> Lehrstuhl für Photogrammetrie und Fernerkundung, Technische Universität München, Arcisstr. 21, 80290 München, +49 89 289-22671, [www.photo.verm.tu-muenchen.de](http://www.photo.verm.tu-muenchen.de)

<sup>2</sup> MVTec Software GmbH, Neherstr. 1, 81675 München, +49 89 457695-0, [steger@mvtec.com](mailto:steger@mvtec.com)

the object in a more compressed and efficient way than the gray value information and thus are better suited for real-time recognition.

In our approach edges and their orientations, i.e., the shape of the object, are used as features. A representation (model) of the object is automatically generated solely from one reference image of the object itself. The model consists of the extracted object shape and the corresponding gradient directions along this shape. The basic principle of the generalized Hough transform (GHT) (BALLARD, 1981) is employed, which is an efficient method to compare the class of features used in this work and therefore allows a rapid computation. After analyzing the GHT and its major drawbacks in section 2 we further optimize the GHT by considering modifications to fulfil industrial demands (section 3). Experimental results and analyses concerning the achieved accuracy of the refined parameters complete this study (section 4).

## 2 The Generalized Hough Transform

### 2.1 Principle

A prominent property of the conventional Hough transform (HOUGH, 1962) is that its applicability is restricted to detect analytic curves. Therefore, BALLARD (1981) generalizes the Hough transform to detect arbitrary shapes. He also takes the edge orientation into account, which makes the algorithm faster and also greatly improves its accuracy by reducing the number of false positives.

To perform the offline phase of the GHT, the so-called  $R$ -table is constructed using information about the position and orientation of the edges in the reference image. The  $R$ -table is generated by choosing a reference point  $\mathbf{o}$ , e.g., the centroid of all edge points  $\mathbf{p}_i^r$  ( $i = 1 \dots N_{p^r}$ ) in the reference image, i.e.,  $x_o = 1/N_{p^r} \sum x_{p_i^r}$ ,  $y_o = 1/N_{p^r} \sum y_{p_i^r}$ , calculating  $\mathbf{r}_i = \mathbf{o} - \mathbf{p}_i^r$  for all points and storing  $\mathbf{r}$  as a function of the corresponding gradient direction  $\Phi$ . If the orientation of the shape in the search image is not constant, i.e., the object may undergo rigid motions, for every possible orientation a separate  $R$ -table must be constructed. Assuming the case of rigid motion, in the online phase a three dimensional accumulator array  $A$  is set up over the domain of parameters, where the parameter space is quantized and range restricted. Each finite cell of that array corresponds to a certain range of positions and orientations of the reference image in the search image, which can be described by the three variables  $x$ ,  $y$ , and  $\theta$ . Here,  $x$  and  $y$  describe the translated position of  $\mathbf{o}$  in the search image and  $\theta$  the orientation of the object in the search image relative to the object in the reference image. For each edge pixel  $\mathbf{p}_j^s$  in the search image and each  $R$ -table corresponding to one orientation  $\theta_k$ , all cells  $\mathbf{r}_i + \mathbf{p}_j^s$  in  $A$  receive a vote, i.e., they are incremented by 1, within the corresponding two dimensional hyper plane defined by  $\theta = \theta_k$  under the condition that  $\Phi_j^s = \Phi_i^r$ . Maxima in  $A$  correspond to possible instances of the object in the search image.

### 2.2 Major Drawbacks

One weakness of the GHT algorithm is the - in general - huge parameter space. This requires large amounts of memory to store the accumulator array as well as high computational costs

in the online phase caused by the initialization of the array, the incrementation, and the search for maxima after the incrementation step. In addition, the accuracies achieved for the returned parameters depend on the quantization of translation and rotation. On the other hand, in practice the quantization cannot be chosen arbitrarily finely taking again memory requirements and computation time into account.

### 3. Optimizing the Generalized Hough Transform

The reduction of the high computational complexity of both, the conventional Hough Transform (HT) and the GHT, has been the subject of several publications. YACOUB & JOLION (1995), for example, propose an HT algorithm based on a hierarchical processing for line detection. It performs a classical HT on small subimages and merges the extracted lines with similar parameters by successively joining four neighboring subimages until the original image size is reached. In object recognition this approach is not reasonable because the object may be spread over several subimages, which results in a high sensitivity to clutter and noise. Other approaches reduce the dimension of the parameter space by introducing additional information: SER & SIU (1994) use relative gradient angles in the  $R$ -table, whereas MA & CHEN (1988) consider the slope and the curvature as local properties. These approaches have a reduced computational complexity in common but on the other hand have serious limitations. The use of relative gradient angles supposes the object not to be occluded, whereas considering the slope and the curvature fails when dealing with shapes that are composed mainly of straight lines. Additionally, the curvature is a very instable feature with regard to noise.

In this section we tackle the problems, which are mentioned in section 2.2: A hierarchical search strategy in combination with an effective limitation of the search space is introduced. Furthermore, a technique is presented to refine the returned parameters without noticeably decelerating the online phase. In addition, some quantization problems and their solutions are discussed.

#### 3.1 Hierarchical Strategy

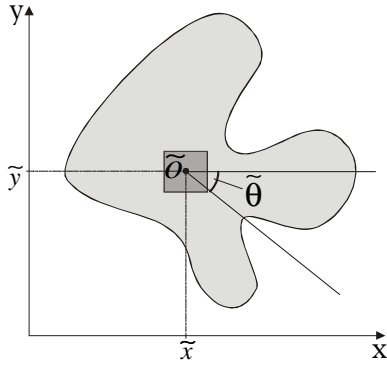
To reduce the size of the accumulator array and to speed up the online phase in our approach both, the model and the search image are treated in a hierarchical manner. First, an image pyramid of the reference image is generated. Every pyramid level of the reference image is rotated by all possible orientations, in which the object may appear in the search image, using  $o$  as fix point. Then, the gradient amplitude and the gradient direction are computed from the rotated image using the Sobel filter<sup>1</sup>. The edge pixels are extracted by thresholding the gradient amplitude. In the online phase the recognition process starts on the top pyramid level without any a priori information about the transformation parameters  $x$ ,  $y$  and  $\theta$  available. The cells in  $A$  that are local maxima and exceed a certain threshold are stored and used to initialize approximate values on the lower levels. Therefore, only on the top level an  $R$ -table is built for each rotation, whereas on the lower levels a modified strategy is necessary to take advantage of the a priori information returned from the next higher level.

---

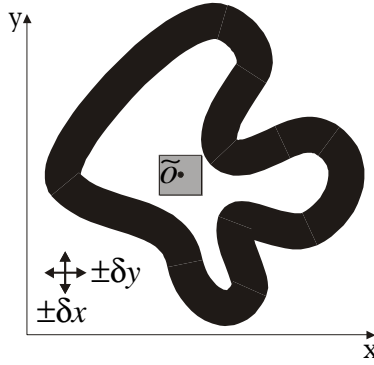
<sup>1</sup> We prefer to use the Sobel filter because it represents a good compromise between computation time and accuracy. Its anisotropic response and its worse accuracy can be balanced by choosing an adequate quantization of the gradient directions (c.f. section 3.5).

### 3.2 Blurred Region

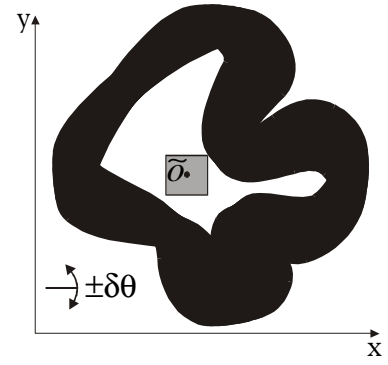
The use of a hierarchical model and the use of an image pyramid enable efficient limitations of the search space, because at lower levels approximate values  $\tilde{x}$ ,  $\tilde{y}$ , and  $\tilde{\theta}$  are known from a higher level. To obtain an optimal search region the model shape is blurred using the uncertainties of these a priori parameters. The proceeding is illustrated in the Figures 1, 2, and 3. The object is overlaid on the search image at the approximate position and orientation (Fig. 1). The positioning error  $\delta x, \delta y$  is regarded by dilating the shape, i.e., the edge region, with a rectangular mask of size  $(2\delta x + 1) \times (2\delta y + 1)$  (Fig. 2). The *blurred region* is finally obtained by successively rotating the dilated shape in both directions until the maximum amplitudes of the orientation error  $\pm \delta \theta$  are reached, and merging the resulting regions (Fig. 3). The blurred regions are calculated for every quantized orientation in the offline phase and stored together with the model. In the online phase the blurred region enables us to restrict the edge extraction, which greatly reduces the computational effort. In addition, the size of the accumulator array  $A$  can be narrowed to a size corresponding to the uncertainties of the a priori parameters, which decreases the memory amount drastically.



**Fig. 1.** Approximate values are given from the level above.



**Fig. 2.** Taking the translation error into account: Blurring by dilating.

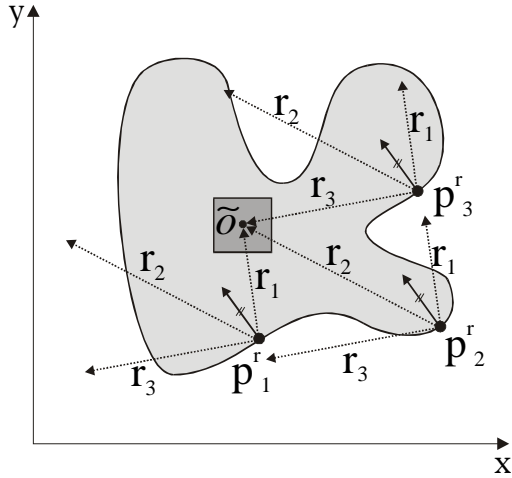


**Fig. 3.** Taking the orientation error into account: Blurring by rotating.

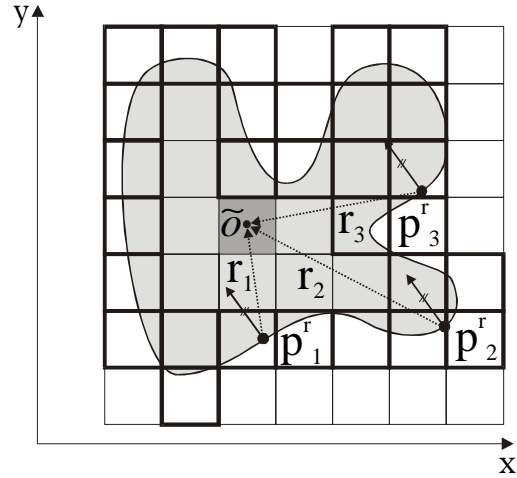
### 3.3 Tile Structure

After the edge extraction the third improvement is utilized. The principle of the conventional GHT is shown in Figure 4. The a priori information is displayed as a dark gray box representing the maximum error of the approximate translation values from the next higher level, which will be referred to as the *approximate zone*. The edge pixels  $p_1^r, p_2^r$ , and  $p_3^r$  have identical gradient directions. Thus, if any of these edge pixels is processed in the online phase of the conventional GHT each of the three vectors  $r_1, r_2$ , and  $r_3$  is added and the corresponding three cells are incremented, which is inefficient. One possible solution is to check during the voting process, whether the added vectors fall in the approximate zone or not. However, this query and the summation of the vectors would take too much time to allow for real-time operation. Therefore, the opposite approach is taken: Already in the offline phase the information about the position of the edge pixels relative to the centroid is calculated and stored in the model. This is done by overlaying a grid structure over the rotated reference image and splitting the image into tiles (Fig. 5). In the online phase the current tile is calculated using the approximate translation parameters and the position of the current edge pixel. Only the

vectors in the respective tile with the appropriate gradient direction are used to calculate the incrementation cells.



**Fig. 4.** The conventional GHT without using the a priori information of the translation parameters. Many unnecessary increments are executed.



**Fig. 5.** Taking advantage of the a priori information using a tile structure. For each occupied tile (bold border) a separate R-table is generated.

### 3.4 Refinement of Position and Orientation

The accuracy of the results of the GHT on the lowest pyramid level depends on the chosen quantization of the parameter space. To refine the parameters of position and orientation we use the principle of the 3D facet model (HARALICK & SHAPIRO, 1992). The 3D parameter space  $A$  is assumed to be a 3D piecewise continuous intensity surface  $f(x', y', \theta')$ , in which the intensity values are represented by the number of entries in the cells of the accumulator array. The refinement of the parameters can be done by extrapolating the maximum of the continuous function in the neighborhood of the maximum of  $A$  (see also STEGER, 1998). This refinement is not expensive because the only thing to do is to solve a  $3 \times 3$  linear equation system.

### 3.5 Problems and Solutions Concerning Quantization

When applying the principle of the GHT several problems occur concerning the quantization of the transformation parameters and of the gradient directions. A similar difficulty occurs using the tile structure described in section 3.3. In the following section we name these problems and present our solutions. A more detailed explanation is given in (ULRICH, 2001).

**Rotation.** In general, the step size  $\Delta\theta$  for the discrete orientations must be chosen the smaller the bigger the searched object is. If  $\Delta\theta$  is chosen too large, the maximum possible peak height  $\Gamma^{\max}$  in  $A$  will be reduced. However, the computational effort  $\Omega$  increases linearly with the number of discrete orientations. To find the optimum value for  $\Delta\theta$  we have to minimize the computational effort  $\Omega(\Delta\theta)$  while maximizing the peak height  $\Gamma(\Delta\theta)$ . The latter can be simulated using knowledge about the pixel distribution within the shape.

**Translation.** Under ideal conditions the peak in the parameter space is equal to the number of edge pixels contained in the model. If the object in the search image is translated by sub-pixel values in  $x$  and  $y$  direction relative to its position in the reference image the peak height

decreases because the votes are distributed over more than one cell in the accumulator array  $A$ . Under the assumption that the neighborhood of the peak is rotational symmetric the peak height can be made independent of subpixel translation by smoothing the translation hyper planes, i.e.,  $\theta = \text{const.}$ .

**Gradient Direction.** The best suitable quantization of the gradient direction intervals within the  $R$ -table depends on various factors. The determination of the interval defines the range of gradient directions that are treated as equal. The smaller the interval the faster the computation. On the other hand, an interval that is chosen too small leads to instable results. The appropriate interval for the gradient direction depends on the variance of the gradient direction due to noise in the image and on the inherent absolute accuracy of the Sobel filter, i.e., the difference between the real partial derivatives and the Sobel response. These two effects are independent from the shape of an object and can be calculated precisely. Another factor that affects the gradient direction is subpixel translation. The gradient variation caused by subpixel translation (also due to small rotations) depends on the curvature along the shape, i.e., the curvature of the edge contours. One possible solution for this problem is to introduce only stable edge points into the model whose gradient direction at most vary in a small range. A final important detail is how to avoid boundary effects of the gradient intervals. This can be solved by establishing overlapping intervals.

**Tile Structure.** A problem similar to the quantization of the gradient directions occurs when using the tile structure described in section 3.3. The size of the tiles should be chosen such that the uncertainty of the approximate position is taken into account, i.e., the dimension of the tiles in the  $x$  and  $y$  direction should be  $2\delta x$  and  $2\delta y$ . Furthermore, it must be ensured that an error of  $2\delta x$  and  $2\delta y$  of the approximate position  $\tilde{\mathbf{o}}$  does not result in omitting the relevant edge pixels as a consequence of considering the wrong tile. This problem is solved by using overlapping tiles.

### 3.6 Memory Requirements and Computational Complexity

To facilitate the comparison of our object recognition method with other approaches, some statements about the memory requirements and the computational complexity of our implementation are given. The memory requirements of the model  $M^{\text{model}}$  and of the Hough parameter space in the online phase  $M^{\text{Hough}}$  can be calculated with the following formulas:

$$M^{\text{model}}[\text{byte}] = \left( \frac{32}{7} n_{\text{rot}}^0 \left( \frac{m^0}{k} \right)^2 \overline{\Psi}_{n_{\text{grad}}} + 16 n_{\text{rot}}^0 n_{\text{e,m}}^0 \right) \left( 1 - \left( \frac{1}{8} \right)^L \right) + \frac{40}{3} (m^0)^2 \left( 1 - \left( \frac{1}{4} \right)^L \right) + 3 \cdot 2^{2-3L} n_{\text{e,m}}^0 n_{\text{rot}}^0 \quad (1)$$

$$M^{\text{Hough}}[\text{byte}] = 8^{-L} n_{\text{rot}}^0 (m^0 + s^0)^2, \quad (2)$$

where

- $L$  is the number of pyramid levels decremented by one,
- $n_{\text{e,m}}^0$  is the number of model edge pixels at the lowest pyramid level (i.e., original resolution),
- $n_{\text{rot}}^0$  is the number of quantized rotation steps at the lowest pyramid level,
- $\overline{\Psi}_{n_{\text{grad}}}$  is the average number of quantized gradient directions through the pyramid,
- $m^0$  is the size of the model in each dimension [pixel],
- $s^0$  is the size of the search image in each dimension [pixel],

$k$  is the size of the tiles in each dimension [pixel], and  
 $\Psi$  is a factor [0...1], which describes the distribution of the edge pixels over the bounding box, i.e.  $\Psi$  is the fraction of occupied tiles.

The computational complexity  $\Omega$  of the online phase can be described by

$$\Omega = 2^{1-5L} n_{e,m}^0 n_{e,s}^0 \frac{n_{rot}^0}{n_{grad}} + 2^{1-2L} (n_{e,m}^0)^2 \frac{n_{\delta\theta}}{n_{grad}} \cdot \frac{k^2}{(m^0)^2 \Psi}. \quad (3)$$

Here,

$n_{e,s}^0$  is the number of edge pixels in the search image at the lowest pyramid level and  
 $n_{\delta\theta}$  is the number of orientation steps on lower pyramid levels taking the range of uncertainty of the a priori orientation parameter into account.

Table 1 shows the memory requirements and the computational complexity for some examples, which are typical in practice. To show the efficiency of our approach the corresponding values according to the conventional GHT are listed likewise. For all examples a search image size of  $600 \times 600$  pixels ( $s^0=600$ ), a tile size of  $7 \times 7$  pixels ( $k=7$ ), a fraction of occupied tiles of  $\Psi=0.7$ , and an orientation uncertainty of  $\pm 3$  steps ( $n_{\delta\theta}=7$ ) are employed.

$L$	$n_{e,m}^0$	$n_{rot}^0$	$\overline{n_{grad}}$	$m^0$	$n_{e,s}^0$	$M^{model}$ [MB]		$M^{Hough}$ [MB]		$\Omega$	
						MGHT	CGHT	MGHT	CGHT	MGHT	CGHT
3	2000	360	20	200	20000	30.8	4.3	0.5	460.8	$0.066 \cdot 10^6$	$1080 \cdot 10^6$
<b>1</b>	2000	360	20	200	20000	28.0	4.3	28.8	460.8	$67 \cdot 10^6$	$1080 \cdot 10^6$
3	<b>1000</b>	360	20	200	20000	25.1	2.2	0.5	460.8	$0.033 \cdot 10^6$	$540 \cdot 10^6$
3	2000	<b>180</b>	20	200	20000	15.7	2.2	0.2	230.4	$0.033 \cdot 10^6$	$540 \cdot 10^6$
3	2000	360	<b>30</b>	200	20000	40.2	4.3	0.5	460.8	$0.044 \cdot 10^6$	$720 \cdot 10^6$
3	2000	360	20	<b>100</b>	20000	16.3	4.3	0.3	176.4	$0.066 \cdot 10^6$	$1080 \cdot 10^6$
3	2000	360	20	200	<b>50000</b>	30.8	4.3	0.5	460.8	$0.165 \cdot 10^6$	$2700 \cdot 10^6$

**Tab. 1.** Memory requirement and computational complexity for different typical situations. Our approach using a modified GHT (MGHT) is compared with the conventional GHT (CGHT).

At the expense of a higher model size our approach drastically reduces the memory requirement and the computational complexity of the online phase in contrast to the conventional GHT.

## 4 Experimental Results

To validate the accuracy of the resulting parameters  $x$ ,  $y$ , and  $\theta$  we generated some image sequences ( $652 \times 494$  pixels) containing subpixel translations and rotations of an object. The experiments, which are illustrated in (ULRICH, 2001) in more detail, show that our approach is able to locate objects with a maximum mean error of about 0.1 pixels in position and 0.12 degrees in orientation. After adding white noise with a maximum amplitude of  $\pm 5$  to the search image these values degraded only slightly. Furthermore, the approach is robust considering that occlusions merely decrease the peak in the accumulator array proportional to the percentage of occlusion. To show the real-time capability: the average time needed to find an object of size  $240 \times 130$  pixels containing approximately 3000 model points in the lowest pyramid level is about 60 msec on a PENTIUM III with 667 MHz.



## 5 Summary

By using a hierarchical search strategy in combination with a new effective search space limitation our approach fulfils the requirements of real-time. Since the object's shape does not depend on the illumination, this method in addition is robust against illumination changes to a certain extent. Furthermore, it is extremely robust against partial occlusion and clutter, as the raw gray value information is not used directly. The coarse solution of the position and orientation parameters of the object is adjusted in a subsequent refinement to meet the demands for high precision and accuracy in industrial applications.

## 6 References

- BALLARD, D. H. (1981): Generalizing the Hough transform to detect arbitrary shapes. *Pattern Recognition*, **13**(2), p. 111-122.
- BORGEFORS, G. (1988): Hierarchical chamfer matching: A parametric edge matching algorithm. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, **10**(6), p. 849-865.
- BROWN, L. G. (1992): A survey of image registration techniques. *ACM Computing Surveys*, **24**(4) p. 325-376.
- GONZALEZ, R. C. & WOODS, R., E. (1992): *Digital Image Processing*, p. 583-586, Addison-Wesley Publishing Company.
- HARALICK, R. M. & SHAPIRO, L. G. (1992): *Computer and Robot Vision*. **Volume 1**, p. 371-452, Addison-Wesley Publishing Company.
- HOUGH, P. V. C. (1962): Method and means for recognizing complex patterns. U.S. Patent 3,069,654.
- LAI, S., FANG, M. (1999): Accurate and fast pattern localization algorithm for automated visual inspection. *Real-Time Imaging*, **5**, p. 3-14.
- MA, D. & CHEN, X. (1988): Hough Transform Using Slope and Curvature as Local Properties to Detect Arbitrary 2D Shapes, *Proc. 9<sup>th</sup> Int. Conf. on Pattern Recognition*, p. 511-513
- OLSON, C. F. & HUTTENLOCHER, D. P. (1997): Recognition by Matching With Edge Location and Orientation. Automatic target recognition by matching oriented edge pixels. *IEEE Transactions on Image Processing*, **6**(1), p. 103-113.
- RUCKLIDGE, W. J. (1997): Efficiently locating objects using the Hausdorff distance. *International Journal of Computer Vision*, **24**(3), p. 251-270.
- SER, P.-K. & SIU, W.-C. (1994): Non-analytic Object Recognition Using the Hough Transform with Matching Technique, *IEE Proc. Part E, Computers and Digital Techniques* **141**(1), p. 231-235.
- STEGER, C. (1998): Unbiased Extraction of Curvilinear Structures from 2D and 3D Images. Fakultät für Informatik, Technische Universität München, Dissertation, p. 92-96, Herbert Utz Verlag.
- Ulrich, M. (2001): Real-Time Object Recognition in Digital Images for Industrial Applications, Technical Report PF-2001-01, Chair for Photogrammetry and Remote Sensing, Technische Universität München.
- Yacoub, S. B. & Jolion, J.-M. (1995): Hierarchical Line Extraction, *IEE Proc.-Vis. Image Signal Process.*, **142**(1), p.7-14.

# Ansätze zur Erfassung der CO<sub>2</sub>-Bilanz Sibiriens aus Radardaten

## WOLFGANG WAGNER<sup>1</sup> & CHRISTIANE SCHMULLIUS<sup>2</sup>

*Abstract: While politicians discuss legally binding measures to reduce the emission of greenhouse gases, of which carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) is the most important, scientists have started to explore the mechanisms of the global carbon cycle in greater detail. But often the magnitude of carbon fluxes and carbon pools is not sufficiently well known due to the lack of environmental data. In this article approaches to narrow down uncertainties of Siberia's carbon balance using radar remote sensing are discussed. The methods will be tested in the SIBERIA II project which aims to demonstrate the viability of full carbon accounting on a regional basis using multi-sensor earth observation and carbon modelling. SIBERIA II is the follow-on project of SIBERIA (SAR Imaging for Boreal Ecology and Radar Interferometry Applications) which produced a 1 million km<sup>2</sup> large forest map of a region in central Siberia.*

*This article is a shorter, modified version of a paper published in the „Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation“ (WAGNER, 2001). The authors thank the editors for the permission to republish this article.*

## 1 Einleitung

Umweltprobleme wie der saure Regen oder das Ozonloch haben zum ersten Mal deutlich gemacht, dass der Eingriff des Menschen in natürliche Kreisläufe ein globales Ausmaß erreicht hat. Ohne die Kenntnis globaler Veränderungen würde man den Ursprung vieler lokaler Umweltprobleme nicht verstehen. Es wäre schwierig, wenn gar unmöglich, geeignete Gegenmaßnahmen zu ergreifen. Speziell die Geowissenschaften sind daher aufgefordert, die Grundlagen zum Verständnis des Zusammenhangs lokaler, regionaler und globaler Umweltveränderungen zu erforschen. Damit ist die Forderung verbunden, Geodaten auf lokaler bis globaler Ebene zu erheben, für die Zukunft zu speichern und in geeigneter Form den Anwendern zur Verfügung zu stellen. Dieser Artikel zeigt einige Möglichkeiten auf, wie die Radarfernerkundung zur verbesserten Quantifizierung des Kohlenstoffkreislaufs in Sibirien beitragen könnte. Im Konkreten wird die Bedeutung von Waldbränden und der zyklischen Tau- und Gefrierprozesse für die regionale CO<sub>2</sub>-Bilanz diskutiert und mögliche Verfahren vorgestellt.

Seit Mitte des 19. Jahrhunderts hat sich der globale Kohlenstoffkreislauf nachhaltig verändert (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE, 2000). Vor allem durch das Verbrennen fossiler Brennstoffe und die Abholzung von Wäldern wurden seither ungefähr  $405 \pm 60$  Gigatonnen Kohlenstoff als Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) in die Atmosphäre emittiert. Dies hatte einen Anstieg des atmosphärischen CO<sub>2</sub> um 28 % und eine Erwärmung der mittleren Lufttemperatur um bis zu einem 1°C zur Folge (SWEET & BRETZ, 1999). Modellrechnungen sagen – bei unverminderten Emissionen von Treibhausgasen – für das 21. Jahrhundert eine weitere

---

<sup>1</sup> Dr. Wolfgang Wagner, Deutsches Fernerkundungsdatenzentrum, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Oberpfaffenhofen, D-82234 Weßling

<sup>2</sup> Prof. Dr. Christiane Schmullius, Institut für Geographie, Friedrich-Schiller Universität, Loebdergraben 32, D-7743 Jena

Temperaturerhöhung von 1.4 – 5.8 °C voraus. Dieses wird regional sehr unterschiedliche Auswirkungen auf Mensch und Umwelt haben (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE, 2001). Unter anderem sind extreme Wetterlagen und vor allem in tropischen und sub-tropischen Regionen Ernteeinbußen und reduzierte Trinkwasserreserven zu befürchten. In den Alpen muß man mit Veränderungen der winterlichen Schneedecke und des Abflußregimes von Flüssen rechnen.

## 2 Das Kyoto-Protokoll

Um die Klimaveränderungen in einem tolerablen Rahmen zu halten, wurde auf der dritten Konferenz der Vertragsparteien zur Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen, die im Dezember 1997 in Kyoto stattfand, ein Vertragswerk ausverhandelt. Dieses sogenannte Kyoto-Protokoll enthält erstmals quantifizierte, rechtlich verbindende Verpflichtungen zur Begrenzung der Emission von Treibhausgasen (OBERTHÜR & OTT, 2000). Nach wie vor gibt es aber offene Fragen, die geklärt werden müssen, bevor die Vertragspartner das Kyoto-Protokoll ratifizieren werden. Neben Emissionsreduktionen in Industrie und Verkehr, besteht auch die Möglichkeit, die Reduktionsziele ergänzend durch die Einbindung von Kohlenstoff aus der Atmosphäre in terrestrische Ökosysteme zu erreichen. Darunter fallen Aktivitäten wie Aufforstungen oder verbessertes Bodenmanagement in der Landwirtschaft. Speziell in den ersten Jahrzehnten könnten in beträchtlichem Ausmaß biologische Kohlenstoffsinken an die Stelle der Reduktion des Verbrauchs fossiler Brennstoffe treten (FISCHLIN & FUHRER, 2000). Auf lange Sicht gesehen sind aber Emissionsreduktionen notwendig, da die Aufnahmekapazität der Biosphäre natürliche Grenzen aufweist. Auch bestehen noch große wissenschaftliche Unsicherheiten und Schwierigkeiten bei der Erhebung relevanter Geodaten (WISSENSCHAFTLICHER BEIRAT DER BUNDESREGIERUNG GLOBALE UMWELTVERÄNDERUNGEN, 1998).

Wenn man sich die Frage stellt, welche Geodaten die Radarfernerkundung zur Erfassung von biologischen Kohlenstoffsinken liefern könnte, sollte man jene nach ihrem Verwendungszweck unterscheiden: 1) Geodaten, die von den Vertragsländern zur Erfüllung ihrer konkreten Berichtspflichten benötigt werden; 2) Geodaten, die darüber hinaus für eine vollständige Bilanzierung der Kohlenstoffflüsse von Nutzen sind. Die Berichtspflichten des Kyoto-Protokolls beschränken sich auf „unmittelbar von Menschen verursachte Landnutzungsänderungen und forstwirtschaftliche Maßnahmen, die auf Aufforstungen, Wiederaufforstungen und Entwaldung seit 1990“. Die Fernerkundung könnte hier für die Erfassung und Dokumentation von Flächen verschiedener Bedeckungsklassen und deren zeitliche Veränderungen eingesetzt werden. Zur Diskussion steht, ob die Satellitendaten als primäre Datenquellen der Inventur oder nur für die Verifikation verwendet werden sollen (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE, 2000). Radarsysteme mit einer synthetischen Apertur (SAR) erzielen die für diese Aufgabe benötigte räumliche Auflösung von unter 30 m und ermöglichen eine gezielte Aufnahmeplanung, auch in Gebieten mit häufiger Wolkenbedeckung.

Über die konkreten Berichtspflichten des Kyoto-Protokolls hinaus sind neue Geodaten für das bessere Verständnis des globalen Kohlenstoffkreislaufs dringend erforderlich. Laut CRAMER ET AL. (1999) sind viele der offenen Fragen mit der Wirkungsweise und den Veränderungen der terrestrischen Ecosysteme verbunden. Zwar werden globale Kohlenstoffmodelle laufend verbessert, doch fehlen in vielen Bereichen noch Geodaten zur Modellvalidierung und als Eingangsparameter.

Die weitläufigen borealen Gebiete Sibiriens und Nord Amerikas werden mit aller Voraussicht eine große Rolle bei der Regulierung des Klimas der nördlichen Erdhalbkugel und des globalen Kohlenstoffkreislaufs spielen. Niedrige Temperaturen und lange Winter beherrschen dieses Ökosystem, was unter anderem ein langsames Wachstum der Vegetation und das Vorkommen stark kohlenstoffhaltiger Feuchtgebiete bedingt. Wie die Vegetation und Böden der borealen Zone auf rasche Klimaveränderungen reagieren werden ist Gegenstand zahlreicher Untersuchungen (CHRISTENSEN ET AL., 1999; SOLOMON & LEEMANS, 1997). Um die vollständige CO<sub>2</sub>-Bilanz Sibiriens zu verbessern werden im EU-Projekt SIBERIA II Fernerkundungsdaten, meteorologische Beobachtungen und in-situ Messungen in einem Geographischen Informationssystem (GIS) verknüpft und für die Modellierung der Kohlenstoffflüsse verwendet. Aus der Sicht der Fernerkundung wird ein multi-sensoraler Ansatz gewählt. Zum Einsatz kommen räumlich hochauflösende optische und SAR Systeme, mittelaufgelöste optische/Infrarot Scanner und niederauflösende Mikrowellenradiometer und Scatterometer. Dieser Artikel beschränkt sich auf die Möglichkeiten zweier bereits erprobter Radarverfahren, der Bestimmung von Waldbrändflächen aus SAR Daten und der Erfassung der Frostdynamik aus ERS Scatterometer Daten.

Die Radardaten in den vorzustellenden Beispielen stammen in erster Linie von den Europäischen Fernerkundungssatelliten ERS-1 und ERS-2, die ein sogenanntes Active Microwave Instrument (AMI) an Bord hatten. Dieses Instrument erlaubte sowohl die Aufnahme von räumlich hochauflösenden Bilddaten (30 m) mit Hilfe einer synthetischen Antennenapertur als auch von zeitlich hochauflösenden Scatterometer Daten (durchschnittlich eine Messung alle vier Tage) mit einer räumlichen Auflösung von 50 km. Das AMI arbeitete bei einer Frequenz von 5.3 GHz (C-Band) VV-Polarisation.

### **3 Waldkarte Sibiriens**

In Waldökosystemen stellt sich bei gleichbleibenden Klimaverhältnissen und einem Gleichgewicht von Störung (Brände, Insektenbefall, etc.) und Regeneration langfristig eine ausgeglichene Kohlenstoffbilanz ein (TRETER, 2000). Wird dieses Gleichgewicht gestört, so können sich Waldökosysteme von Kohlenstoffsenken in Kohlenstoffquellen verwandeln und umgekehrt. So hat man in den borealen Wäldern Kanadas seit 1970 eine Zunahme und seit 1980 eine Verdreifachung der Feueraktivität beobachtet, wodurch die Senkenfunktion dieser Wälder beträchtlich gestört wurde. Auch in Sibirien sind Waldbrände – die vorwiegend von Menschen verursacht werden – eine der größten Sorgen der dortigen Forstverwaltung. Doch fehlen speziell seit dem Zusammenbruch der Sowjetunion die Mittel zur regelmäßigen forstwirtschaftlichen Bestandsaufnahme. Daher ist auch die Abschätzung der Kohlenstoffflüsse mit großen Unsicherheiten behaftet (NILSSON, 2000).

Russland's boreale Wälder nehmen eine Fläche von zirka 624 Mio. ha ein (TRETER, 2000). Solch große Flächen können nur mithilfe der Fernerkundung im Abstand eines oder einiger weniger Jahre aufgenommen werden. Es fehlen aber nach wie vor übertragbare und umfassend validierte Verfahren zur Ableitung forstwirtschaftlicher Parameter aus bildgebenden Aufnahmesystemen. Es war daher das Ziel des SIBERIA Projekts, eine adaptive Methode zur Waldklassifikation aus SAR Daten zu entwickeln, anhand einer umfangreichen Referenzdatenbank zu validieren und ein zirka 100 Mio. ha großes Gebiet in Zentralsibirien zu kartieren (SCHMULLIUS & WAGNER, 2000). Als Eingangsdaten dienten sogenannte Kohärenzbilder, die ein Maß für die Korrelation zweier SAR Aufnahmen darstellen. Diese Kohärenzbilder wurden aus SAR Tandembilder abgeleitet, die im Abstand von einem Tag mit den Satelliten ERS-1 und ERS-2 aufgenommen worden sind. Aufgrund zeitlicher Dekorrelationseffekte,

z.B. verursacht durch die Bewegung von Blättern und Gräsern im Wind, nimmt die Kohärenz im allgemeinen mit zunehmender Vegetationsbedeckung ab. Daher erscheinen in Kohärenzbildern Wälder in dunklen und vegetationslose Flächen in sehr hellen Tönen (Abb. 1). Wasserflächen erscheinen schwarz, da hier die Bewegung der Wasseroberfläche zu einer vollkommenen Dekorrelation führt. Weiters wurden SAR Aufnahmen des Japanischen Erdbeobachtungssatelliten JERS verwendet. Das JERS SAR arbeitet bei einer Frequenz von 1.3 GHz und zeigt ebenfalls einen Zusammenhang mit der Vegetationsbedeckung.

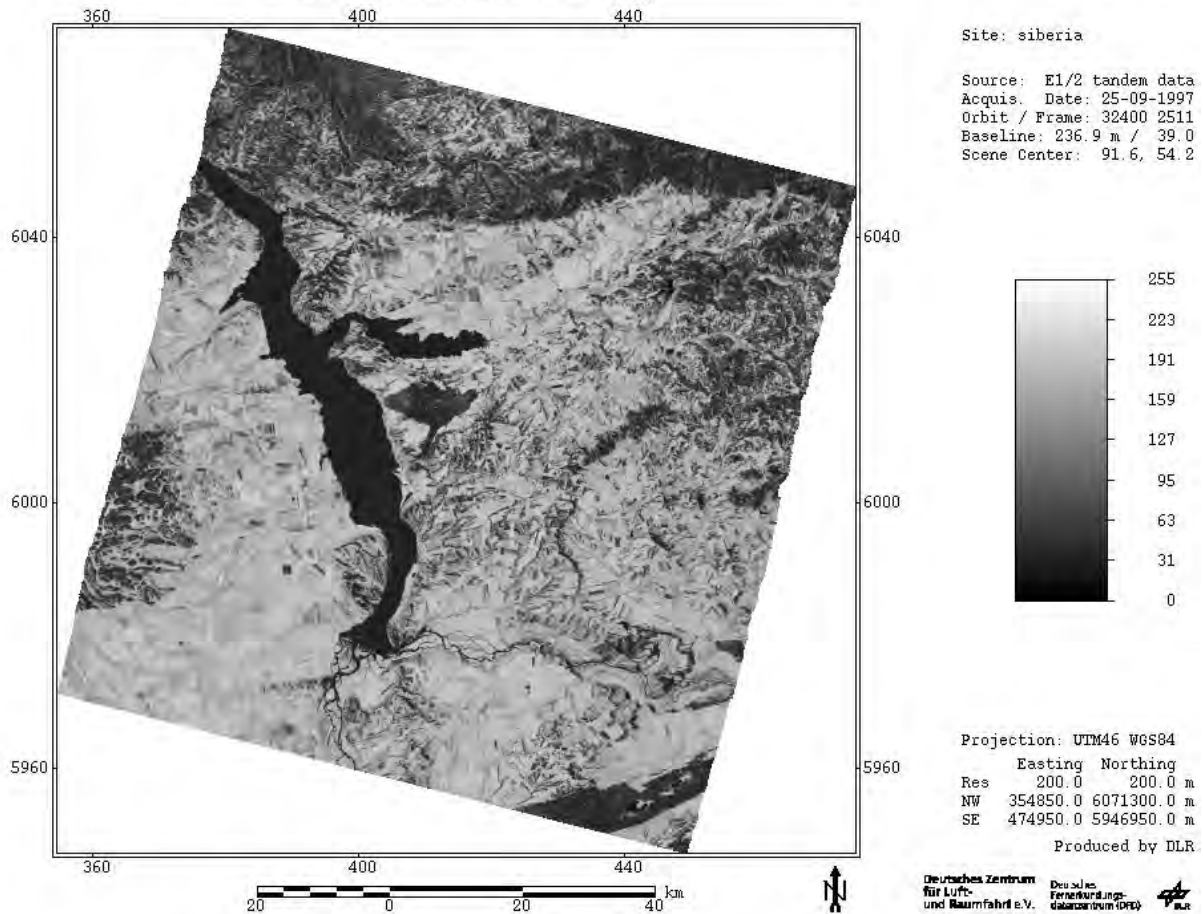


Abb. 1: Kohärenzbild abgeleitet aus einer ERS-1/2 Tandemaufnahme. Das Bild zeigt ein Gebiet rund um ein Staubecken des Flusses Jenisey, südlich von Krasnojarsk, Sibirien.

Sowohl die ERS Kohärenz als auch die JERS Intensität schwanken über Waldflächen aufgrund vielfältiger Einflußfaktoren von Szene zu Szene. Die Analyse der Daten hat aber gezeigt, dass zumeist ein quasi exponentieller Zusammenhang zwischen den beiden Radarparametern und dem Stammvolumen der Wälder nachgewiesen werden kann, d.h. die Kohärenz nimmt mit steigenden Stammvolumina ab, die JERS Intensität zu, und beide Parameter nähern sich ihrem Grenzwert ab zirka  $100 \text{ m}^3/\text{ha}$  (WAGNER ET AL., submitted). Diese Beobachtung war die Grundlage für einen adaptiven Algorithmus, der vier Stammvoluminaklassen unterscheidet: 0-20, 20-50, 50-80 und  $>80 \text{ m}^3/\text{ha}$ . Weiters wurden die Klassen „Wasser“ und „Glatte Flächen“ (beinhaltet Landwirtschaft, Steppe, Moore) unterschieden. Für die Produktion der Waldkarte wurden zuerst die einzelnen Satellitenszenen separat klassifiziert und anschließend in einem Mosaik zusammengeführt. Mit Ausnahme von Gebieten mit ausgeprägter Topographie, welche wegen starker geometrische und radiometrische Verzerrungen nicht berücksichtigt wurden, und Tandemdaten, in denen Regen zwischen den beiden SAR Auf-

nahmen zu einer starken Dekorrelation geführt hat, wurden zufriedenstellende Ergebnisse erzielt. So ergab eine durch unabhängige Forstexperten durchgeführte Überprüfung der SIBERIA Karte eine mittlere Treffsicherheit der Waldklassen von 86.9 %. Trotz der oben genannten Einschränkungen kann der Schluss gezogen werden, dass in den borealen Gebieten Kanadas und Eurasiens CO<sub>2</sub>-relevante Waldparameter (in diesem Falle das Stammvolumen) großflächig mit Hilfe der Radarfernerkundung aufgenommen werden können. Von speziellem Interesse für die Kohlenstoffbilanzierung ist, dass vor allem Brandflächen und Abholungen klar in der Radarkarte ersichtlich sind.

## 4 Detektion von Bodenfrost

In den hohen nördlichen Breiten der borealen Waldzone und der Tundra trifft man Permafrost, d.h. ständig gefrorenen Boden, bis in Tiefen von 300 m an. Doch für die Vegetation ist nicht die Tiefe oder das Alter des Permafrost von Bedeutung, sondern vielmehr die oberste Bodenschicht, die im Sommer auftaut. Die Dynamik dieser Auftaubodenschicht steuert bodenbildende und vegetationsökologische Prozesse (MAKAROV & VENZKE, 2000) und ist insofern für die CO<sub>2</sub>-Bilanz dieser Gebiete von großer Bedeutung. KICKLIGHTER ET AL. (1999) stellen fest, dass globale Kohlenstoffmodelle die Dynamik von Tau- und Gefrierprozessen und deren Effekt auf die Netto-Primärproduktivität der Vegetation nur unzureichend simulieren.

Radarsysteme können den Vorgang des Gefrierens und Tauens dokumentieren, da Frost die Dielektrizitätseigenschaften des Bodens stark verändert. Weiters ist wichtig, dass im niederfrequenten Mikrowellenbereich trockener Schnee weitgehend transparent ist und nasser Schnee je nach Rauigkeit seiner Oberfläche unterschiedliche Rückstreuwerte aufweisen kann. Während SAR Systeme detaillierte räumliche Informationen liefern können, geben Scatterometer einen großflächigen Überblick über die zeitliche Dynamik von Tau- und Gefrierprozessen (VISMANN, 2000, SCIAPL & WAGNER, 1998). Die Validierung der Ergebnisse ist aufgrund des Mangels an Referenzdaten schwierig, doch dürfte der zeitliche Fehler bei der Bestimmung der Übergänge vom gefrorenen Zustand in den getauten und umgekehrt in der Größenordnung von 1-2 Wochen liegen. Auch wenn die Daten noch Unsicherheiten aufweisen, bieten sie zum ersten Mal die Möglichkeit, Modellsimulationen zu überprüfen. In einem iterativen Prozeß könnten dann die Fernerkundungsmethodik und die Modelle laufend verbessert werden.

## 5 Perspektiven

Ausgehend von den Diskussionen rund um das Kyoto-Protokoll ist die quantitative Erfassung des globalen Kohlenstoffkreislaufs ins Zentrum der wissenschaftlichen Diskussion gerückt. Während die grundlegenden Mechanismen des globalen CO<sub>2</sub>-Kreislauf bekannt sind, ist aufgrund des Mangels an Geodaten die quantitative Abschätzung von Kohlenstoffflüssen mit großen Unsicherheiten behaftet. Wie in diesem Artikel anhand von zwei Beispielen gezeigt wird, bietet die Radarfernerkundung reelle Möglichkeiten, CO<sub>2</sub> relevante Geodaten bereitzustellen. Oft verhindern aber Probleme wie Datenverfügbarkeit, Diskontinuität von Fernerkundungsmissionen oder der beträchtliche Ressourcenaufwand, der für die Bearbeitung großer Datenmengen notwendig ist, den Schritt von wissenschaftlichen Pilotprojekten zu operativen Anwendungen. So wird es nach dem Ende von ERS-2 bis zum Start des ersten METOP (Meteorological Operational) Satelliten, der voraussichtlich im Jahre 2005 erfolgen wird, keine C-Band Scatterometer Daten geben. Eine Serie von drei METOP Satelliten soll dann

aber eine Kontinuität bei der Bereitstellung von Scatterometer Daten über zumindest 14 Jahre hinaus garantieren. Weniger erfreulich ist die Lage im Falle von SAR Tandemkohärenzdaten. Hier ist noch nicht abzusehen, ob es einmal eine, der ERS-1/2 Tandemmission vergleichbare Konstellation von Radarsatelliten geben wird. In diesem Fall wird man sich mit dem historischen Datenarchiv aus den Jahren 1995 bis 1998 begnügen müssen. Neben einer kohärenten Planung von Fernerkundungsmissionen sollte man in Zukunft Anwendungsaspekte stärker berücksichtigen, um den hohen wissenschaftlichen und praktischen Nutzen der Fernerkundung – der schlußendlich die Investitionen in Sensorenentwicklung, Satellitenbetrieb und Bodeninfrastruktur rechtfertigt – zur vollen Geltung kommen zu lassen.

## 6 Literaturverzeichnis

- CRAMER, W., KICKLIGHTER, D. W., BONDEAU, A., MOORE III, B., CHURKINA, G., NEMRY, B., RUIMY, A., SCHLOSS, A. & THE PARTICIPANTS OF THE POTSDAM NPP MODEL INTERCOMPARISON (1999) Comparing global models of terrestrial net primary productivity (NPP): overview and key results. – *Global Change Biology*, **5**(suppl. 1), pp.1-15.
- CHRISTENSEN, T. R., JONASSON, S., CALLAGHAN & HAVSTRÖM (1999): On the potential CO<sub>2</sub> release from tundra soils in a changing climate. – *Applied Soil Ecology*, **11**, pp. 127-134.
- FISCHLIN, A. & FUHRER, J. (2000): Die Klimapolitik bringt die Wissenschaft an ihre Grenzen – Die Herausforderung des Kyoto-Protokolls für die Ökologie. – *Neue Zürcher Zeitung*, Nr. 262 (9. Nov.).
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (2000): Land use, land-use change, and forestry. – Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (2001): Climate Change 2001: Impacts, Adaption, and Vulnerability, Summary for Policymakers. – IPCC Secretariat, Genf, Schweiz, <http://www.ipcc.ch/>.
- KICKLIGHTER, D. W., BONDEAU, A., SCHLOSS, A. L., KADUK, J., MCGUIRE, A. D. & THE PARTICIPANTS OF THE POTSDAM NPP MODEL INTERCOMPARISON (1999): Comparing global models of terrestrial net primary productivity (NPP): global pattern and differentiation by major biomes. – *Global Change Biology*, **5**(suppl. 1), pp.16-24.
- MAKAROV, V. N. & VENZKE, J.-F. (2000): Umweltbelastung und Permafrost in Jakutsk (Sibirien). – *Geographische Rundschau*, **52**, 12, pp. 21-26.
- NILSSON, S. Hrsg (2000): IASA's forestry project – Seeing the forest and the trees. – Options, Autumn 2000, International Institute for Applied System Analysis, Laxenburg, Österreich.
- OBERTHÜR, S. & OTT, H. E. (2000): Das Kyoto-Protokoll, Internationale Klimapolitik für das 21. Jahrhundert. – Leske + Budrich, Opladen, Deutschland.
- SCHMULLIUS, C. & WAGNER, W. (2000): SIBERIA – Kartierung borealer Wälder mit Radarfernerkundung. – *Geographische Rundschau*, **52**, 12, pp. 44-48.
- SCIPAL, K. & WAGNER, W. (1998): Monitoring freeze-thaw cycles over northern Canada. – 2nd European Conference on Applied Climatology, Vienna, Austria, October 19-23, 1998.
- SOLOMON, A. M. & LEEMANS, R. (1997): Boreal forest carbon stocks and wood supply: past, present and future responses to changing climate, agriculture and species availability. – *Agricultural and Forest Meteorology*, **84**, pp. 137-151.
- SWEET, W. & BRETZ, E. A. (1999): Toward carbon-free energy. – *IEEE Spectrum*, **36**, 11, pp. 28-33.

- TRETER, U. (2000): Rolle der borealen Waldländer im globalen CO<sub>2</sub>-Haushalt – Eine ökosystemare Analyse. – Geographische Rundschau, **52**, 12, pp.4-11.
- VISMANN, V. (2000): Monitoring of seasonal thawing in Siberia with ERS Scatterometer data. – IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, **38**, 4, pp.1804-1809.
- WAGNER, W. (2001): Beiträge der Radarfernerkundung zur Erfassung des globalen CO<sub>2</sub>-Kreislaufs. – Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation, **2/2001**.
- WAGNER, W., VIETMEIER, J., TANSEY, K., BALZTER, H., SCHMULLIUS, C., LUCKMAN, A., QUEGAN, S., YU, J. J., GAVEAU, D., DAVIDSON, M., LE TOAN, T., GLUCK, M. & SHVIDENKO, A.: An adaptive approach for classifying boreal forest in SIBERIA based on ERS tandem coherence and JERS backscatter data. – Remote Sens. Environ., submitted.
- WISSENSCHAFTLICHER BEIRAT DER BUNDESREGIERUNG GLOBALE UMWELTVERÄNDERUNGEN (1998): Die Anrechnung biologische Quellen und Senken im Kyoto-Protokoll: Fortschritt oder Rückschritt für den globalen Umweltschutz? – ISBN 3-9806309-0-0, <http://www.awi-bremerhaven.de/WBGU/>.



# Multimediale Komponenten in der Lehre – sinnvolle Hilfsmittel oder Spielerei?

**MANFRED WIGGENHAGEN<sup>1</sup>**

*Zusammenfassung: Heute werden in Vorlesungen und Übungen zunehmend multimediale Hilfsmittel zur Darstellung von Lehrinhalten eingesetzt. Durch Videofilme, interaktiv beeinflussbare Animationen, dreidimensionale Visualisierungen und netzwerkfähige Programmwerkzeuge werden Darstellungen wissenschaftlicher Zusammenhänge, Resultate von Meßeinsätzen und theoretische Grundlagen in ansprechender Form dargeboten.*

*Am Institut für Photogrammetrie und GeoInformation (IPI) der Universität Hannover wurden vom Autor in den vergangenen Jahren unterschiedliche Realisierungen multimedialer Komponenten in der Lehre eingesetzt. Dieser Beitrag soll dokumentieren, welche Hilfsmittel eingesetzt, welche Ziele verfolgt wurden und wie die neuen Komponenten von der Gruppe der Studierenden akzeptiert wurden.*

*Im Detail werden Aussagen zur Anwendung von Java, Macromedia Director 8, Apple Quick-Time Movie, animierten GIF-Dateien und HTML-Dokumenten in der Lehre getroffen.*

*Konkrete Anwendungen wurden in den Lehrveranstaltungen "Vermessungskunde für Bauingenieure" und "Nahbereichsphotogrammetrie" getestet.*

## 1 Einleitung

Neben dem Einsatz von Tageslichtprojektoren und Präsentationsfolien hat sich die Anwendung von online-Präsentationen auf dem PC in den vergangenen Jahren durchgesetzt. Auf wissenschaftlichen Tagungen, in Vorlesungen und Übungsvorbesprechungen werden inzwischen überwiegend computerbasierte Hilfsmittel eingesetzt. Die hohe Flexibilität und Aktualität bei der Vorbereitung der Präsentation, die hohe Anschaulichkeit und die Anwendung bewegter Bildsequenzen werden als die wichtigsten Vorteile dieser Hilfsmittel angesehen. Eine große Zahl der Vortragenden arbeitet mit Microsoft PowerPoint als Präsentations-Software. Falls jedoch eine Einbindung der Präsentation in das Internet geplant wird oder ganze Vorlesungsinhalte netzwerkbasierend angeboten werden sollen, kommen zusätzliche Programme zum Einsatz. Im Rahmen dieser Veröffentlichung werden die Vor- und Nachteile der unterschiedlichen Softwarelösungen vorgestellt.

## 2 Zielsetzungen

Die Präsentationsinhalte von Fachvortrag, Vorlesung und z.B. Übungsvorbesprechung können zwar unterschiedlich je nach Typ der Veranstaltung sein, die Zielsetzungen der Vorträge sind aber in den meisten Fällen sehr ähnlich.

---

<sup>1</sup> Dr.-Ing. Manfred Wiggenhagen, Universität Hannover, Institut für Photogrammetrie und GeoInformation, Nienburger Str.1, D-30167 Hannover, email: wigge@ipi.uni-hannover.de

Einer Zuhörerschaft sollen wissenschaftlich-technische Inhalte anschaulich vermittelt, möglichst mit Abbildungen und Graphiken verdeutlicht und so überzeugend dargeboten werden, daß die Aufmerksamkeit der Hörer auch über einen längeren Zeitraum erhalten bleibt.

Dieses Ziel wurde in der Vergangenheit durch den Einsatz von Textfolien in Kombination mit Bildfolien oder Dias erreicht, mit dem Nachteil, dass die Herstellung der Folien und Dias eine entsprechende Vorplanung erforderte und rechtzeitig vor Beginn der Veranstaltung abgeschlossen sein mußte. Der Einsatz des PCs und Videoprojektors als Präsentationshilfsmittel erlaubt die Fertigstellung der Präsentationen „just in time“. Zusätzlich können Animationen, Filme und Töne, sowie Netzwerkanwendungen eingebunden werden.

### 3 Präsentationshilfsmittel

Nach (TALMAN, 1992) folgen die Augen des Publikums dem in Abbildung 1 gezeigten Muster wenn ein neues Dia oder eine neue Folie gezeigt wird.

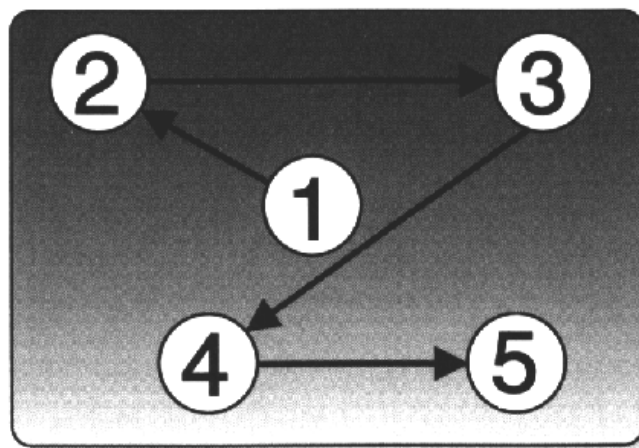


Abb.1: Augenbewegung des Publikums bei Folienpräsentation

Durch eine Untergliederung der Präsentation in vergleichbare Bildbereiche kann man diese Sehgewohnheit vorteilhaft nutzen und eine Betonung der wichtigen Inhalte erreichen.

Die Herstellung des Präsentationsdokuments erfolgt in diesen Fall herkömmlich mit dem Textverarbeitungsprogramm, computerbasiert mit dem PowerPoint-Editor oder mit einem HTML-Editor.

#### 3.1 HTML-Dokumente

Da die folgenden Vorlesungsinhalte ausnahmslos für begleitende Internet-Veröffentlichungen vorgesehen waren, wird in den folgenden Abschnitten die Darstellung von HTML-Seiten unter Nutzung der Internet-Browser Netscape 4.7 und Internet-Explorer 5.5 beschrieben.

Aus Kompatibilitätsgründen sollte bei der Herstellung von HTML-Dokumenten nicht zu häufig zwischen verschiedenen Autorenwerkzeugen gewechselt werden. Obwohl die verschiedenen Produkte über Import- und Export-Funktionen verfügen, blieben bei praktischen Anwendungen oftmals Textformatierungen, graphische Layouts und Formelzeichen beim Datentransfer auf der Strecke. Falls die langfristige Verwaltung der Internetseiten über Microsoft FrontPage geplant ist, sollten daher die Vorlagen auch mit dem FrontPage Editor hergestellt werden. Die vom Autor vorgestellten Beispiele wurden jedoch ausnahmslos mit Netscape editiert und angezeigt.

Zur Vorbereitung der in Abbildung 2 gezeigten Internet-Darstellung wurde das HTML-Dokument mit einer mehrspaltigen Tabelle versehen, die eine einheitliche Gruppierung der Textdarstellung und Grafik ermöglicht. Die Institutsbezeichnung und das Logo am unteren Rand wurden mit Verknüpfungen zu der vorherigen bzw. nächsten Folie versehen und dienen der Navigation durch die gesamte Präsentation.

**Kameras für photogrammetrische Aufgaben**

---

**Photogrammetrische Meßkameras**

**Vorteile:**

- Kalibrierungsprotokoll der Herstellerfirma vorhanden
- Stabiler Aufbau
- Kalibrierung bleibt lange erhalten

**Nachteile:**

- kaum mehr oder nur in geringer Stückzahl hergestellt,
- sehr teuer



Dr.-Ing. Manfred Wiggenhagen Tel.: 0511 762 3304 Fax.: 0511 762 2483 e-mail: wigge@ipi.uni.hannover.de  
Institut für Photogrammetrie und GeoInformation, Universität Hannover



Abb.2: HTML-Dokument als Präsentationsfolie

Durch das Einbringen von Verknüpfungen zu weiteren HTML-Seiten, Graphiken und Animationen wird die HTML-Seite zu einem leistungsfähigen Navigationszentrum, über das in detailliertere Themen verzweigt werden kann. Gemäß dem o.g. Beobachtungsschema würde die Folie in Abbildung 2 zunächst die Vorteile photogrammetrischer Meßkameras als Teilmenge der Kameras für photogrammetrische Aufgaben vermitteln. Das Publikum würde über die Abbildung und die Nachteile der Kamera zur Identifizierung des Autors und Instituts und anschließend zum Logo gelangen. Befindet der Nutzer sich im Internet, würde er anschließend mit Maustastendruck über dem Logo zur nächsten Folie gelangen. Selbstverständlich wird der Inhalt dieser HTML-Seite auch von Nutzern mit anderen Sehgewohnheiten aufgenommen.

### 3.2 Animierte GIF-Dateien

Durch sogenannte Aufbaufolien wurden bei herkömmlichen Präsentationen zeitliche Abläufe oder komplexe wissenschaftliche Zusammenhänge anschaulich dargestellt. Chronologisch

ablaufende Folieninhalte lassen sich sehr einfach mit animierten GIF-Dateien realisieren. Als Werkzeuge werden ein Bildbearbeitungsprogramm wie z.B. Adobe Photoshop und ein Werkzeug zur Bearbeitung von GIF-Dateien wie z.B. Ulead GIF-Animator benötigt (ULEAD 2001).

Zunächst werden die notwendigen Einzelbilder der Animation im Bildbearbeitungsprogramm hergestellt und als GIF-Datei gespeichert. Anschließend werden die Einzelbilder im GIF-Editor zu einer Bildsequenz zusammengestellt. Dort kann die zeitliche Abfolge und Dauer sowie die geometrische Ausrichtung zueinander festgelegt werden. Abbildung 3 zeigt die Herstellung einer GIF-Animation im Autorenwerkzeug „Ulead GIF-Animator“.

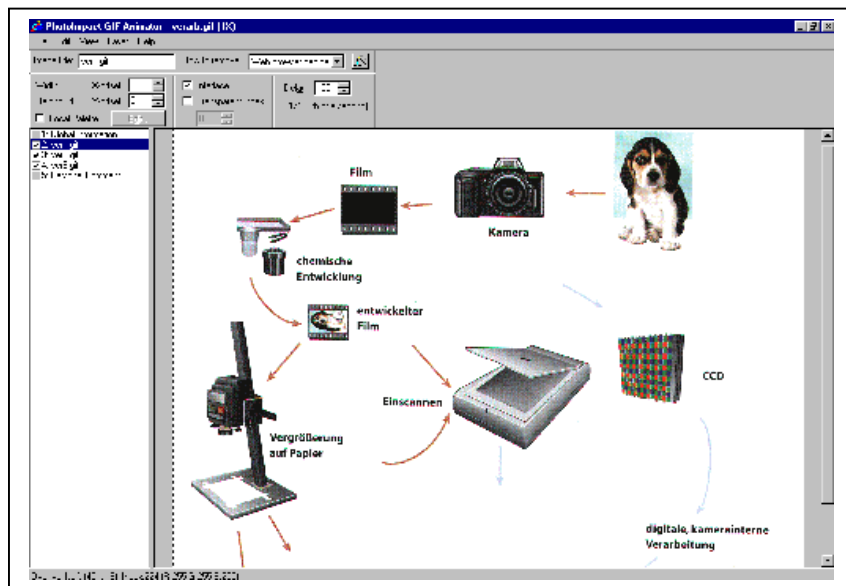


Abb.3: Autorenwerkzeug Ulead Gif-Animator

Animierte GIF-Dateien haben zwar den Vorteil, daß die abgespeicherte Bildsequenz beliebig oft und in der voreingestellten Reihenfolge abgespielt werden kann, weitere Nutzerinteraktionen sind jedoch nicht möglich. Sollen z.B. für Internet-basiertes Lernen oder für Realtime-Vorfürhungen nutzerabhängige zusätzliche Darstellungen gezeigt werden, empfiehlt sich die Verwendung des Autorenwerkzeuges Macromedia Director 8.

### 3.3 Interaktive Anwendungen mit Macromedia Director 8

Vergleichbar mit der Produktion eines Filmes werden im Macromedia Director in einem Drehbuch Szenen und Abläufe geplant, Darsteller auf einer Bühne angeordnet und bewegt sowie Überlagerungen von Bildsequenzen editiert. Als Darsteller dienen Rasterdateien, Texte, Strichzeichnungen und Töne. Die Speicherung der Filme erfolgt im speziellen Macromedia Filmformat. Erweiterungen zum Internet Explorer und für Netscape, sogenannte Plug-ins, ermöglichen die Darstellung des Filmes über das Internet bzw. auf dem portablen Rechner. Zur Vorbereitung nutzerspezifischer Aktionen können einzelne Bildelemente und Darsteller für die Bedienung mit dem Mauszeiger programmiert werden. Die Programmierung wird mit der modularen Programmiersprache Lingo durchgeführt. Sie erlaubt eine sehr flexible und leistungsfähige Erweiterung der Filmprojekte. Für die Veröffentlichung stehen zusätzliche Exportfunktionen zur Speicherung als Bildsequenz,

AVI-Film oder im Apple Quick Time Format zur Verfügung (KHAZELI 2000).

Abbildung 4 zeigt die Benutzeroberfläche des Macromedia Directors mit Drehbuchansicht, Bühne, Besetzungs-, Text- und Zeicheneditor..

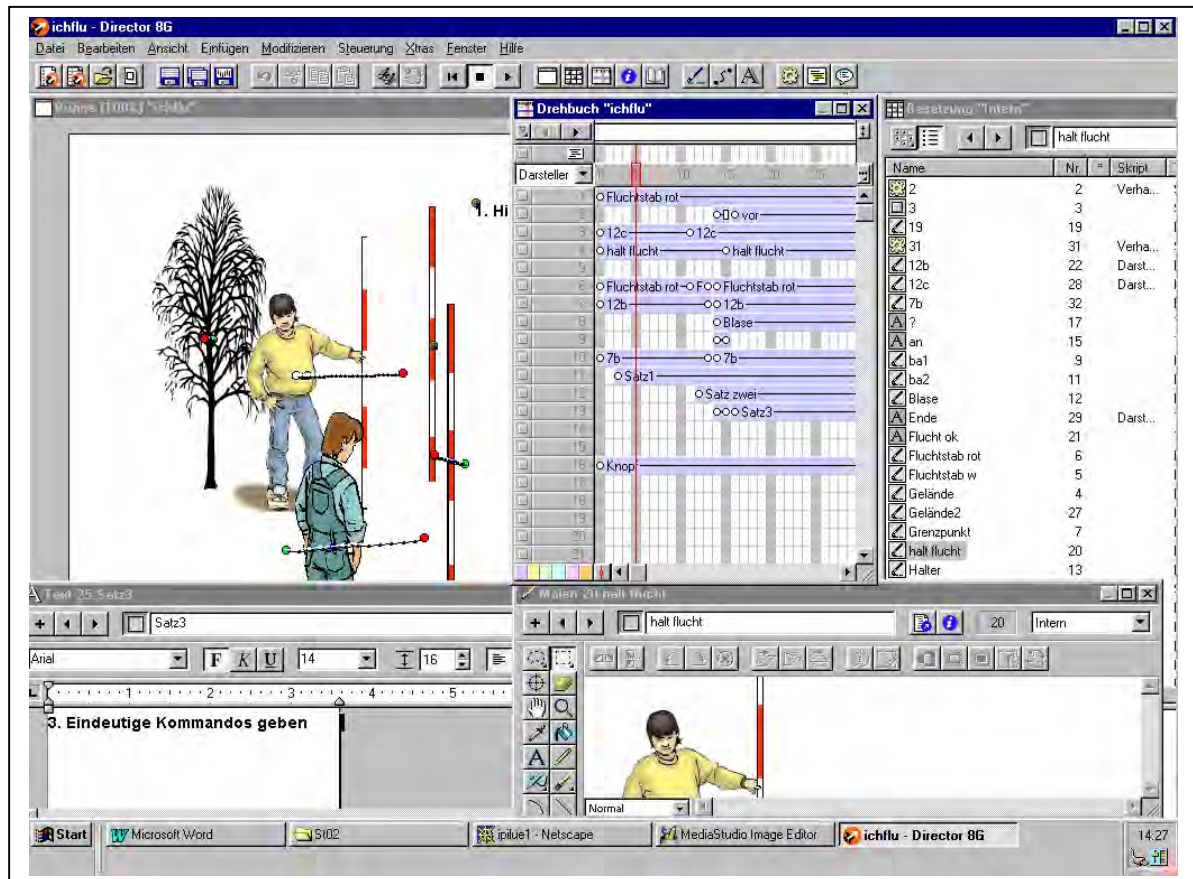


Abb.4: Benutzeroberfläche des Macromedia Director 8

Macromedia-Filme wurden erstmals in der Lehrveranstaltung „Vermessungskunde für Bauingenieure“ eingesetzt. Zur Verdeutlichung der Übungsinhalte wurden die Macromedia Animationen als Apple Quick Time -Filme im Internet angeboten. Als Plug-in muß vorher der Apple Quick Time Player installiert werden (QUICKTIME 2001). Die Studierenden des 1. Semesters bestätigten den sinnvollen Einsatz der graphischen Animationen und Filme. Abbildung 4 zeigt eine Darstellung aus dem Film „Einfluchten“.

In der Wahlpflichtveranstaltung „Nahbereichsphotogrammetrie“ für Studierende des 8. Semesters wurden Macromedia-Filme zur Verdeutlichung der Bildorientierungsverfahren und automatischen Meßverfahren in der Industrie, wie z.B. Streifen- und Texturprojektion eingesetzt. Weiterhin konnten Fernsehschnitte als AVI-Datei gespeichert und vorgeführt werden. In diesem Fall der multimedialen Präsentation wurde neben der Bild- und Textdarstellung auch die Sound-Komponente verwendet.

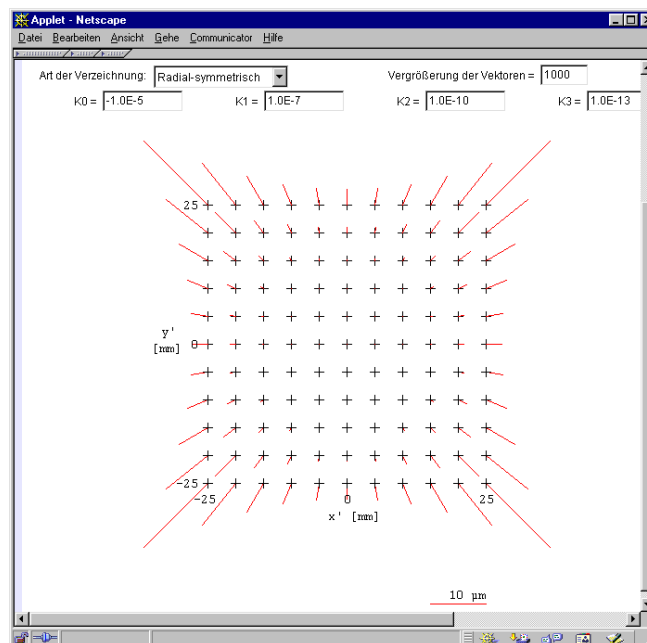
Im Vergleich zum Einsatz animierter GIF-Dateien haben digitale Filme den Vorteil, daß die Sequenzen nicht nur abgespielt und angehalten sondern auch in Einzelbildschaltung im Detail angesehen werden können. Einfache Interaktionen durch den Nutzer sind somit möglich. Im Bereich des Internet-basierten Lernens bestimmt der Anwender die

Geschwindigkeit der Präsentation. Sollen weitere Nutzeraktionen erlaubt werden, wie z.B. das Verschieben von Bildteilen oder die Ausführung von Berechnungen, wird der Gebrauch von Macromedia Filmen vorgezogen. Zur Darstellung der Filme im Internet-Browser muß vorher die frei verfügbare Erweiterung „Macromedia Shockwave Player“ installiert werden (MACROMEDIA 2001).

### 3.4 JAVA-Anwendungen

Sehr häufig ergibt sich die Situation, daß einfache Berechnungsprogramme für die Durchführung von Übungen bereitgestellt werden sollen. Um unabhängig von der jeweiligen Hardware und dem Betriebssystem zu sein, wurde die Programmiersprache JAVA eingesetzt (STEYER 1999). Basierend auf leistungsfähigen Klassenbibliotheken und einem der Programmiersprache C entsprechenden Syntax können eigenständige Anwendungen und in HTML-Dokumente eingebettete Programme, sogenannte Applets entwickelt werden. Da die vollständige JAVA- Entwicklungsumgebung kostenlos über das Internet verfügbar ist, erfreut sie sich inzwischen großer Beliebtheit (JAVA 2001).

Im Rahmen der Vorlesung „Nahbereichsphotogrammetrie“ wurde ein JAVA-Applet programmiert mit welchem die verschiedenen Verzeichnungparameter graphisch dargestellt werden können (LUHMANN 2000). Abbildung 5 zeigt die Internet-Seite zur Berechnung und graphischen Darstellung der Verzeichnungparameter. Zur Vertiefung der ermittelten Werte der inneren Orientierung, können von den Studierenden die unterschiedlichen Parameter eingegeben, die Korrekturwerte berechnet und die Vektorbilder dargestellt



werden.

Abb.5: JAVA-Applet zur Darstellung von Verzeichnungseinflüssen

Weitere JAVA-Programme sind in Vorbereitung und werden in Zukunft für die Durchführung von Übungen und Vorlesungen eingesetzt. Grundsätzlich erfordert die

Herstellung von JAVA-Programmen jedoch einen wesentlich höheren Aufwand als die Nutzung der o.g. Autorenwerkzeuge. Vorteilhaft ist jedoch, dass keine zusätzlichen Erweiterungen für die Internet-Browser benötigt werden, um die Anwendungen einzusetzen.

## 4 Bewertung

Die beschriebenen multimedialen Hilfsmittel wurden im praktischen Vorlesungs- und Übungsbetrieb erfolgreich eingesetzt. Beim Publikum konnte eine hohe Akzeptanz beobachtet werden und für den Autor ergaben sich ungeahnte neue Möglichkeiten zur Neugestaltung von Vorlesungen und Übungen. Für Internet-basierte Lehrveranstaltungen können die computerbasierten Hilfsmittel uneingeschränkt empfohlen werden.

Die vorgestellten Werkzeuge zur Herstellung graphischer Animationen, Filme und multimedialer Präsentationen sind daher sehr viel mehr als nur eine „Spielerei“ für Computerfreaks.

## 5 Literatur

JAVA (2001), JavaSoft-Homepage, [www.javasoft.com](http://www.javasoft.com), 27.06.01

**KHAZAELI, C.D., TERSTEDDE, C., KREFELD, G.** (2000) Multimedia mit Director 8, Rowohlt Taschenbuch Verlag.

**LUHMANN, T.** (2000). Nahbereichsphotogrammetrie. S.119 ff., Herbert Wichmann Verlag Heidelberg.

MACROMEDIA (2001). Macromedia Internet-Seite, [www.macromedia.com](http://www.macromedia.com), 27.06.01

QUICKTIME (2001). Apple Quick Time Internet-Seite, [www.quicktime.com](http://www.quicktime.com), 27.06.01

**STEYER, R.** (1999). JAVA 2 Kompendium. Markt & Technik Buch- und Software-Verlag GmbH

**TALMAN, M.** (1992). Besser präsentieren mit dem PC. S. 88, SYBEX-Verlag-GmbH, Düsseldorf

ULEAD (2001) Homepage der Firma Ulead Systems. [www.ulead.com](http://www.ulead.com), 27.6.01

# Akzeptanz einfacher photogrammetrischer Auswertesoftware in der photogrammetrischen Ausbildung

MANFRED WIGGENHAGEN<sup>1</sup>

*Zusammenfassung: Die photogrammetrische Auswertesoftware PhotoModeler der Firma EOS Systems Inc. wurde am Institut für Photogrammetrie und GeoInformation (IPI) in der Version 3.1 sowie 4.0 für die photogrammetrische Ausbildung eingesetzt.*

*Mit dem Programmsystem können z.B. folgende wichtige Schritte der digitalen Mehrbildauswertung demonstriert werden: Kamerakalibrierung mit ebenem Testfeld, Bildkoordinatenmessung von Verknüpfungspunkten und Kontrollpunkten, Bildorientierung, Bündelausgleichung, 3D-Koordinatenberechnung, Oberflächenzuweisung und Visualisierung.*

*Durch die leicht bedienbare Nutzerschnittstelle und die stabilen Ausgleichungsverfahren können von den Studierenden innerhalb kürzester Zeit eigene Projekte bearbeitet werden. Export-Schnittstellen zu DXF und VRML ermöglichen die Übernahme der Ergebnisse in CAD-Systeme oder ins INTERNET.*

*Dieser Beitrag soll die Stärken und Schwächen der Software für die wissenschaftlich praktische Ausbildung von Geodäsie-Studenten behandeln. Anhand konkreter Beispiele der vergangenen zwei Jahre werden didaktische Konzepte und die programmtechnische Umsetzung am PC vorgestellt.*

## 1 Einleitung

Die Durchführung praxisbezogener Übungen in der universitären Ausbildung erfordert zunehmend leistungsfähige Computerprogramme, die in der Lage sind, fachspezifische Aufgabenstellungen zu lösen und flexibel auf die unterschiedlichen Anforderungen reagieren zu können. Da die auf dem Markt befindliche Standardsoftware neben Bildbearbeitungs-, Tabellenkalkulations- und Datenbankprogrammen nur vereinzelt geeignete Werkzeuge enthält (FLEISCHHAUER,1998), wurden in der Vergangenheit sehr häufig institutseigene Programmsysteme geschaffen, in denen oftmals die wissenschaftlichen Erfahrungen mehrerer Jahrzehnte steckten. Die korrekte Anwendung dieser komplexen Softwarepakete erfordert jedoch in der Regel eine längere Einarbeitungszeit oder zumindest ein entsprechend gutes Benutzerhandbuch. Für die Ausbildung sind derartige Systeme in den höheren Semestern, bei der Durchführung von Diplomarbeiten und Projekten uneingeschränkt geeignet. Welche Möglichkeiten weniger komplexe bzw. einfach zu bedienende Programmpakete bieten, wird in den folgenden Kapiteln am Beispiel der Software PhotoModeler 4.0 der Firma EOS Systems Inc. näher erläutert. Es werden einige für die Ausbildung wichtige Funktionen der Programmes beschrieben. Eine vollständige Vorstellung aller Funktionen würde allerdings den Rahmen dieser Veröffentlichung sprengen.

---

<sup>1</sup> Dr.-Ing. Manfred Wiggenhagen, Universität Hannover, Institut für Photogrammetrie und GeoInformation, Nienburger Str.1, D-30167 Hannover, email: wigge@ipi.uni-hannover.de



## 2 Anforderungen

Folgende Minimalanforderungen werden an das Ausbildungswerkzeug gestellt:

Graphische Oberfläche lauffähig unter MS Windows, Möglichkeit zur Projektdefinition, Bildauswahl und Bildkoordinatenmessung, Messung von Verknüpfungs- und Kontrollpunkten, Bildorientierung und Ausgleichung des Bildverbandes, Ermittlung von Objektkoordinaten sowie Möglichkeiten zur 3D-Visualisierung.

Für die schnelle Einarbeitung in das Programmsystem werden ein vollständiges Handbuch, eine elektronische Online-Hilfe und ggf. Tutorials erwartet.

## 3 Anwendung des Programmes

Durch einen elektronischen Assistenten sowie eine gut gegliederte Dialogführung lassen sich neue Projekte auf einfache Weise anlegen und bearbeiten. Bereits bei der Projektdefinition wird der unbedarfte Nutzer auf die Notwendigkeit kalibrierter digitaler Kameras und ausreichend gut aufgelöster Bilder hingewiesen. Für die weitere Bearbeitung der Bilddaten steht eine übersichtliche graphische Benutzeroberfläche, wie sie in Abbildung 1 gezeigt wird, zur Verfügung.

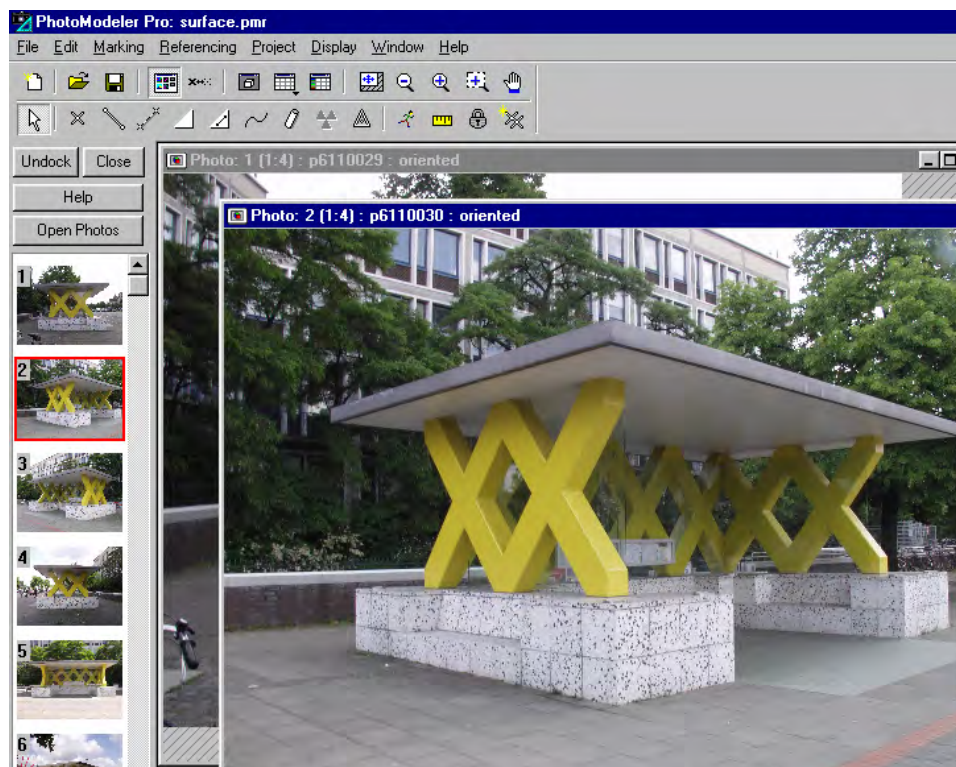


Abb.1: Benutzeroberfläche des PhotoModeler 4.0 Pro

## 4 Ausbildungskonzept

Das in der Vergangenheit wiederholt angewendete didaktische Konzept enthält folgende Ausbildungsschritte:

- Vermittlung des notwendigen theoretischen Grundwissens in Vorlesungen,
- Vertiefung des theoretischen Wissens durch Wiederholung in theoretischen Übungen,
- Umsetzung und Anwendung des Wissens in praxisorientierten Projekten.

Für die Umsetzung des dritten Schrittes wurde im 4. und 8. Fachsemester das Programm PhotoModeler 4.0 eingesetzt. Nachdem in den Vorlesungen das notwendige Grundwissen vermittelt worden war, erfolgte eine Übungsvorbesprechung mit anschließendem praktischen Teil, in dem in Gruppen mit maximal vier bis fünf Personen die gestellte Aufgabe nach kurzer Geräte- und Programmeinweisung gelöst wurde. In allen Projekten kamen moderne digitale Kameras zum Einsatz wie z.B. die Kodak DCS 460, Nikon Coolpix 950 oder Olympus E-10.

### 4.1 Kamerakalibrierung mit ebenem Testfeld

Den Studierenden wird die Bedeutung der Parameter der inneren Orientierung wie z.B. Kammerkonstante, Bildhauptpunktlage und radiale Verzeichnung verdeutlicht. Als theoretische Basis dienen das aktuelle Vorlesungsskript und die verfügbare Fachliteratur wie z.B. (ALBERTZ & KREILING, 1989) Zur Bestimmung der grundlegenden Parameter wird eine Kalibriervorlage genutzt, die sich im Lieferumfang des Programme befindet. Für die automatisierte Kamerakalibrierung mit diesem ebenem Testfeld (siehe LUHMANN, 2000) werden nach manueller Messung von jeweils vier Kontrollpunkten in acht konvergent aufgenommenen Bildern eines ebenen Testfeldes die gesuchten Parameter der inneren Orientierung automatisiert berechnet. Aus Abbildung 2 sind die automatisch markierten Verknüpfungspunkte des Testfeldes ersichtlich.

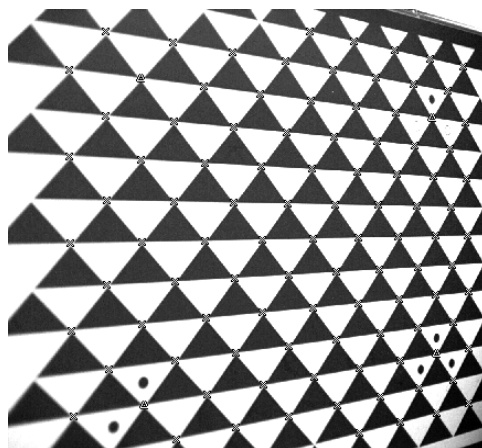


Abb.2: Aufnahme des ebenen Testfeldes zur Kamerakalibrierung

Die Daten der kalibrierten Kamera werden gespeichert und können für folgende Projekte genutzt werden.

## 4.2 Rekonstruktion ebener Objekte aus Einzelbildern

Im Rahmen dieser Übung sollen die Möglichkeiten der Einzelbildphotogrammetrie zur Rekonstruktion ebener Objekte erarbeitet werden (FÖHR, 1990). Zu diesem Zweck werden zunächst digitale Bilder vom Fußboden des Lichthofes der Universität aufgenommen und auf den PC übertragen. Eine Teilgruppe ermittelt gleichzeitig in den Bildern deutliche sichtbare Strecken, die später als Paßpunkt- und Kontrollpunktinformation verwendet werden können. Die weitere Auswertung besteht aus folgenden Schritten: Anlegen einer Kontrollpunktdatei mit Punktnummern und Koordinaten abgeleitet aus den Streckenmessungen, Definition des Projektes mit bereits kalibrierter Kamera und den digitalen Bildern des Lichthofes, Messung von mindestens vier Paßpunkten, Berechnung der Bildorientierung, Definition von zusätzlichen Objektteilen innerhalb der Ebene und Vergleich der Meßergebnisse mit Kontrollstrecken.

Durch die einfache Handhabung des Programmes werden für die Einweisung und Durchführung nur ca. 30 Minuten Arbeitszeit benötigt. Die Hilfsmittel zur Bildkoordinatenmessung, Vergrößerung der Bildansicht und linienweisen Digitalisierung ermöglichen eine überzeugende Einführung in die photogrammetrische Meßmethodik in Einzelbildern.

## 4.3 Dreidimensionale Objekterfassung und Visualisierung

Dieses Projekt behandelt die notwendigen Schritte der dreidimensionalen Objekterfassung und Visualisierung. Nach vorausgehender Aufnahmeplanung wurden in Gruppen mit maximal fünf Personen terrestrische Objekte mit begrenzter Größe und begrenztem Detailreichtum aufgenommen und ausgewertet. Das Objekt „Haltestelle“ wurde mit sieben Bildern aufgenommen, mit Verknüpfungspunkten orientiert und zusätzliche Linien- und Flächenelemente digitalisiert. In der 3D-Ansicht kann der Arbeitsfortschritt der Objekterfassung, die Position der Kameras und die Definition texturierter Oberflächen kontrolliert werden. Abbildung 3 zeigt eines der Meßbilder und den 3D-Viewer mit eingeblendeten Kamerastandpunkten.

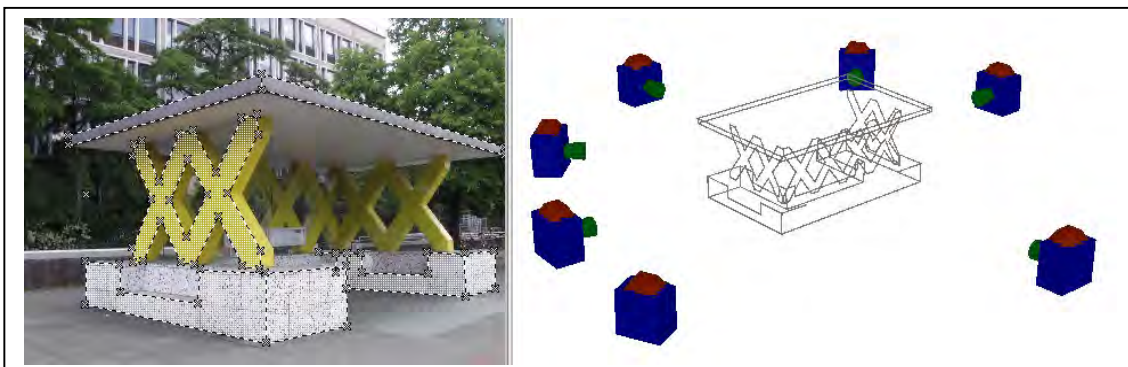


Abb.3: Meßbild „Haltestelle“ und 3D-Ansicht mit Kamerastandpunkten

## 4.4 Automatisierte Verknüpfungspunktmessung

Bei der flächenhaften Erfassung von Oberflächen werden im industriellen Bereich linien- und flächenhafte Projektionsverfahren zur Markierung von Verknüpfungspunkten auf schlecht oder wenig texturierten Oberflächen eingesetzt. Nach Erarbeitung der Grundlagen dieser automatisierten Meßverfahren wurde den Studierenden im 8. Semester eines der PhotoModeler Beispiele vorgeführt. Das Beispiel enthält folgende Arbeitsschritte:

Messung von Verknüpfungspunkten, Bildorientierung, automatische Punktmarkierung, automatische Referenzierung und Darstellung des dreidimensionalen Objektmodells. Abbildung 4 zeigt links das projizierte Punktmuster und rechts das automatisch abgeleitete 3D-Modell.

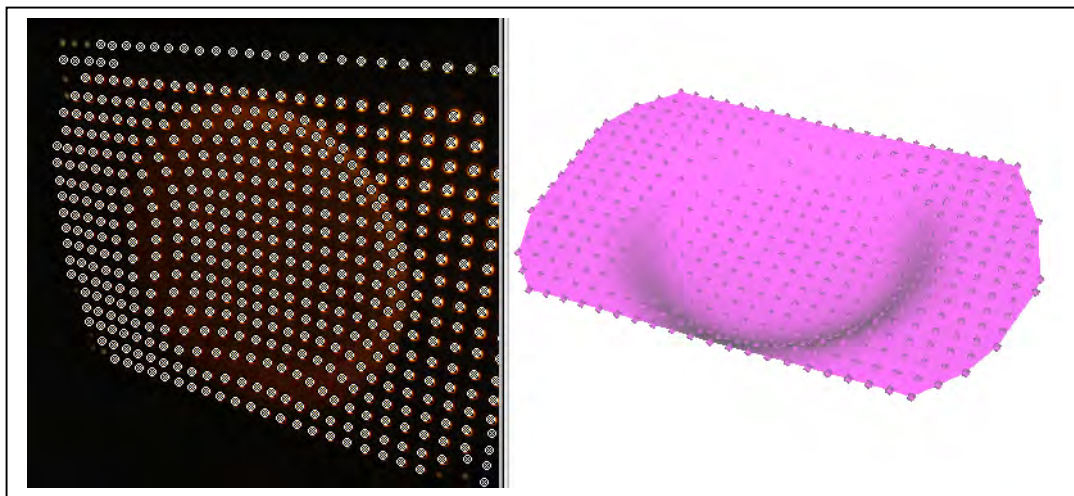


Abb.4: Automatisierte Messung von flächenhaft verteilten Objektpunkten

In Zukunft soll eine praktische Übung zur Aufnahme und Auswertung eines vergleichbaren Objektes angeboten werden. Die Projektion des Punktmusters wird dann mit modernem LCD-Projektor durchgeführt.

## 5 Schlußbemerkung

Mit dem Programm PhotoModeler 4.0 Pro steht ein leistungsfähiges Werkzeug zur Durchführung von photogrammetrischen Projekten im Nahbereich zur Verfügung.

Die gute graphische Oberfläche, der Einsatz zusätzlicher Tutorials, Videos und online-Hilfen ermöglichen die schnelle Einarbeitung in die Programm-Funktionen. Das Handbuch ist vorbildlich und geht über ein reines Benutzerhandbuch weit hinaus. Die Ergebnisse der photogrammetrischen Auswertung können sowohl numerisch als auch dreidimensional graphisch kontrolliert werden. Dreidimensionale Modelle können einfach in standardisierten Formaten wie z.B. DXF oder VRML exportiert werden.

Das Programm erwies sich als sehr stabil und erzeugte nur äußerst selten unkontrollierte Programmabstürze oder nicht akzeptable Berechnungsergebnisse.

Nachteilig wird angesehen, daß prozeßrelevante Schritte, wie z.B. relative Orientierung, Modellauswahl und Fehlerbehandlung im Ausgleichungsprozeß nicht deutlich werden oder nur ansatzweise eingeschätzt und beeinflusst werden können. Dieser Mangel wird aber durch das sehr gute Handbuch und eine schnelle Beratung und Auskunft über das Internet kompensiert (PHOTOMODELER, 2001).

Innerhalb der durchgeführten Übungen konnte daher eine große Akzeptanz durch die Studierenden verzeichnet werden. Die Umsetzung der theoretischen Grundlagen in die Praxis konnte innerhalb kürzester Zeit erlebt werden, sodass auch zukünftig ein großer Teil des Übungsbetriebes im Bereich der Nahbereichsphotogrammetrie mit PhotoModeler 4.0 durchgeführt werden soll.

## 6 Literatur

ALBERTZ, J. & KREILING, W. (1989). Photogrammetrisches Taschenbuch. – 4. Aufl. S. 67 ff., Herbert Wichmann Verlag GmbH, Karlsruhe.

FLEISCHHAUER, C. (1998). Excel in Naturwissenschaft und Technik. Addison-Wesley-Longman, Bonn.

FÖHR, R. (1990). Photogrammetrische Erfassung räumlicher Informationen aus Videobildern  
S. 83 ff., Verlag Vieweg & Sohn, Braunschweig.

LUHMANN, T. (2000). Nahbereichsphotogrammetrie. S.495 ff., Herbert Wichmann Verlag Heidelberg.

PHOTOMODELER, (2001). Homepage der Eos Systems Inc., Vancouver, British Columbia.  
[www.photodeler.com](http://www.photodeler.com), 27.6.2001

# Situation und Trends der Geodäsie-Ausbildung in Österreich

STEPHAN WINTER<sup>1</sup>, ANDREW U. FRANK<sup>2</sup>, NORBERT BARTELME<sup>3</sup>,  
WALTER HAUSLEITNER<sup>4</sup>, ADRIJANA CAR<sup>5</sup>

*Zusammenfassung: Die Ausbildung für Vermessung und Geoinformation in Österreich befindet sich im Umbruch. Einerseits hat ein neues Universitätsstudiengesetz die Möglichkeit eines Magister-Abschlusses gebracht, was in den Diplomstudiengängen Diskussionen um einen Umstieg auslöst. Andererseits sind in Österreich Fachhochschulen mit nahestehenden Studiengängen entstanden oder im Entstehen.*

## 1. Einführung

Die Ausbildung für Vermessung und Geoinformation in Österreich befindet sich in verschiedener Hinsicht im Umbruch. Das betrifft die Inhalte und Formen der universitären Ausbildung, aber auch die Ergänzung und Differenzierung des Angebots durch Fachhochschulen.

- Ein neues Universitätsstudiengesetz (1998) hat die Möglichkeit eines Bakkalaureats- und Magister-Abschlusses gebracht, was in den Diplomstudiengängen Diskussionen um eine Umwandlung auslöst. Die Ursachen für solche Diskussionen sind vielfältig: sei es die Möglichkeit, rascher einen akademischen Grad (Bakkalaureat) zu erlangen, oder sei es die größere internationale Akzeptanz eines Master-Abschlusses. Während die TU Wien noch am Diplom festhält, wird an der TU Graz ab dem Wintersemester 2001 der Bakkalaureats- und Magister-Studiengang angeboten.
- Eine österreichische Rechtsbesonderheit, das Individuelle Diplomstudium, wird zunehmend für das Angebot eines neu ausgerichteten Fächerkanons genutzt. Das geschieht zur Zeit in Wien und Rottenmann mit der Ausrichtung auf Geoinformation.
- In Österreich entstehen in letzter Zeit eine Reihe fachlich verwandter Studiengänge an Fachhochschulen; eine Entwicklung wie sie in anderen Ländern schon weiter vorgeschritten ist. Ein Studiengang *Geoinformation* wird zur Zeit in Villach angeboten.

Dieser Artikel fasst die aktuelle Situation und absehbare Trends in der Ausbildung von kompetenter Seite zusammen: unter den Autoren sind die Studienkommissionsvorsitzenden<sup>6</sup> oder Studiengangsleiter der Technischen Universitäten Wien und Graz, des Lehr- und Forschungszentrums Rottenmann und der Fachhochschule Technikum Kärnten.

---

<sup>1</sup> Institut für Geoinformation, TU Wien, winter@geoinfo.tuwien.ac.at

<sup>2</sup> Institut für Geoinformation, TU Wien, frank@geoinfo.tuwien.ac.at

<sup>3</sup> Institut für Geodäsie, TU Graz, bartelme@geomatrics.tu-graz.ac.at

<sup>4</sup> Lehr- und Forschungszentrum Rottenmann, Universität Linz und TU Graz, g-tec@gmx.at

<sup>5</sup> Studiengang Geoinformation, Fachhochschule Technikum Kärnten, car@cti.ac.at

<sup>6</sup> An der Technischen Universität Wien ist seit Mai 2001 Harald Schuh Studienkommissionsvorsitzender und löst Frank ab.

## 2. Technische Universität Wien

### 2.1 Vermessung und Geoinformation

An der Technischen Universität Wien wird das traditionelle Diplomstudium *Vermessung und Geoinformation* angeboten, mit Schwerpunkten in Ingenieurgeodäsie, theoretischer Geodäsie, Photogrammetrie und Fernerkundung, Kartographie und Geoinformation (<http://vg.geoinfo.tuwien.ac.at>). Eine Besonderheit des Standorts stellt die Einbeziehung der Geophysik dar. Die Studierenden können im Hauptstudium zwischen den Studiengängen *Geoinformationswesen* oder *Geodäsie und Geophysik* wählen. Das Studium führt im Regelfall in 10 Semestern (einschließlich der Diplomarbeit) zum Abschluss eines Diplom-Ingenieurs.

In den letzten zwei Jahren ist der Studienplan dem neuen Universitätsstudiengesetz angepasst und in seiner Struktur wesentlich vereinfacht worden. Die Studienkommission versuchte, sämtliche vom Gesetz nicht verlangten (Über-) Reglementierungen zu eliminieren. Die rasche Folge von Novellen des Gesetzes führen zu einigem Aufwand, haben wir doch zur Zeit Studierende nach drei verschiedenen Studienplänen. Darüber hinaus hat die Studienkommission eine breite Diskussion um einen Umstieg auf ein Magister-Studium geführt. Von einer baldigen Umsetzung hat sie Abstand genommen, nachdem sich zunächst prozedural einfachere und raschere Möglichkeiten boten, innovative Ausbildungswege zu kreieren: ein vorbereitetes Individuelles Diplomstudium *Geoinformation* wird erstmals zum Wintersemester 2001 angeboten.

Die Zahl der Studierenden sinkt im langfristigen Trend langsam, wie im gesamten deutschen Sprachraum, allerdings weder kontinuierlich (im letzten Wintersemester nahm sie wieder zu) noch auf ein kritisches Mass. Die offizielle Zahl der NeuinskribentInnen des Wintersemesters 2000 beträgt 36.

### 2.2 Geoinformation

Für das kommende Wintersemester wird erstmals ein vorbereitetes Individuelles Diplomstudium *Geoinformation* neu inskribierenden Studierenden vorgeschlagen (<http://www.geoinfo.tuwien.ac.at/diplom>). Ein Individuelles Diplomstudium bezeichnet üblicherweise ein Studium nach einem von der oder dem Studierenden frei zusammengestellten Fächerkatalog. Für dies Studium muss ein Antrag auf Anerkennung an den Rektor der entsprechenden Hochschule gestellt werden. Im gegebenen Fall gibt es einen zielgerichteten Studienplanvorschlag, zusammengestellt aus Fächern der Studiengänge *Vermessung und Geoinformation* und *Informatik*. Dieser Vorschlag ist abgestimmt mit den Studienkommissionen und dem Rektor, so dass einer pauschalen Genehmigung nichts im Wege steht – sie sollte noch im Juni erfolgen.

Fachlich finden hier jene, die sich für Informatik interessieren, genauso Herausforderungen wie jene, die sich mit Karten, Internet und Kommunikation auseinandersetzen wollen. Geodäsie und Geophysik sind aus diesem Studienplan weitgehend herausgenommen, um eine deutliche Alternative zum Diplomstudium *Vermessung und Geoinformation* anzubieten. Es handelt sich um ein Studium, das optimal für Berufe im Bereich der Geoinformation vorbereitet, wobei neben den bekannten und schon traditionellen Anwendungen in der Verwaltung (Grundbuch und Kataster, Planung, Leitungskataster, Kartographie) auch neue Anwendungen, bei denen Geoinformation als Dienstleistung (Geoinformationsprodukt) in kleinen Mengen und an eine sehr große Zahl von potentiellen Abnehmern angeboten wird, im Blick stehen. Entsprechend balanciert diese Ausbildung zwischen Geoinformation, Informatik und Betriebswirtschaft. AbsolventInnen werden aber nicht für die Aufgaben der

Katastervermessung vorbereitet. Ein vorläufiger Studienplan findet sich unter <http://www.geoinfo.tuwien.ac.at/diplom/>.

### 3. Technische Universität Graz

Ab dem Wintersemester 2001 gilt für das Studium der Vermessung und Geoinformation an der Technischen Universität Graz ein neuer Studienplan, der die Gliederung in Form eines Bakkalaureatsstudiums und eines darauf aufbauenden Magisterstudiums vorsieht. Das Bakkalaureatsstudium trägt den Namen *Geomatics Engineering* und wird mit dem akademischen Grad *Bakkalaurea der Technik* bzw. *Bakkalaureus der Technik* (abgekürzt jeweils *Bakk.techn.*) abgeschlossen. Das darauf aufbauende Magisterstudium trägt den Namen *Geomatics Science* und schließt mit dem akademischen Grad *Diplom-Ingenieurin* bzw. *Diplom-Ingenieur* (abgekürzt jeweils *Dipl.-Ing.* oder *DI*) ab. Neben dieser formalen Änderung gegenüber dem bisherigen Diplomstudium wird es auch tiefgreifende Umschichtungen in den Lehrinhalten geben. Folgende Ziele sollen damit erreicht werden:

- Öffnung des Studiums über die traditionellen Grenzen der Geodäsie hinaus
- Anpassung an die internationale, insbesondere europäische Entwicklung
- Fachliche Berücksichtigung des Stellenwertes der Geoinformatik
- Einbettung der Geoinformationstechnologie in den IT Mainstream
- Verkürzung der effektiven Studienzeiten, der Dropout-Raten und der Effizienz
- Möglichkeit der Verzahnung mit anderen Bakkalaureats-/Magisterstudien
- Bessere Durchlässigkeit in der Eingangsphase und Erhöhung der studentischen Mobilität

Das Bakkalaureatsstudium bietet in sechs Semestern in einem Gesamtausmaß von 135 Semesterwochenstunden vorrangig eine umfassende universitäre Vorbildung in der Geoinformationstechnologie. Sie richtet sich stark nach Informatikinhalten aus, um so dieses Studium für einen weitaus größeren Kreis von Studierenden zu öffnen. Gleichzeitig wird als Kontrapunkt zu einem reinen Informatikstudium der Geo-Aspekt, also der Umgang mit der Geometrie raumbezogener Daten, mit Geoinformationssystemen, mit Positionierungs- und Navigationstechnologien betont. Ziel ist es, ein Programm zu schaffen, das Studierende nach einem überschaubaren Zeitintervall von drei Jahren und nach einem akademischen Zwischenabschluss befähigt, eines von mehreren möglichen Magisterstudien zu absolvieren.

Das Magisterstudium baut auf diesem Bakkalaureatsstudium auf, soll aber grundsätzlich auch die Möglichkeit einräumen, auf anderen vergleichbaren Bakkalaureatsstudien aufzusetzen. Es bietet in vier Semestern mit insgesamt 45 Semesterwochenstunden (zuzüglich einer Magisterarbeit) ein Programm an Wahlfächern, die zu mehreren Gruppen gebündelt werden können. Die Kernfächer können zwei Hauptgruppen zugeordnet werden:

- Geoinformation
- Satellitengeodäsie / Positionierung / Navigation

Da die Geoinformations-, Positionierungs- und Navigationstechnologien viele Anknüpfungspunkte zu anderen Sparten haben (Informatik, Bauingenieurwesen, Verkehr, Geographie, Architektur sind nur einige Beispiele dafür), bietet das Magisterstudium grundsätzlich viel Freiheit bei der Auswahl eines individuellen Bildungsprofils. So müssen lediglich etwas mehr als die Hälfte der Stunden aus dem Bereich der Kernfächer gewählt werden. Für den Rest besteht ein großer Katalog von Angeboten aus anderen



Studienrichtungen (sogenannte *Andock*-Lehrveranstaltungen), die zum Teil durch integrative Lehrveranstaltungen mit den Wissensinhalten der Kernfächer verbunden werden.

Das Bakkalaureats- und Magisterstudium sind inhaltlich aufeinander abgestimmt und auch mit anderen vergleichbaren Studien verzahnbar. Während das Bakkalaureatsstudium als eine universitär fundierte Vorbildung im Umgang mit Geoinformations-, Positionierungs- und Navigationstechnologien gesehen werden kann, das bereits einen ersten Berufseinstieg ermöglicht, befähigt das Magisterstudium die AbsolventInnen, selbständig solche Systeme und Technologien zu entwerfen, zu bewerten und ingenieurtechnisch zu führen, sowie auch bei stark international gefärbten Forschungsvorhaben der Satellitengeodäsie verantwortlich mitzuarbeiten. Weitere Informationen zum Grazer Studienplan sind unter <http://www.geo-it.tugraz.at> zu finden.

## 4. Lehr- und Forschungszentrum Rottenmann

Am Lehr- und Forschungszentrum Rottenmann wird seit dem Wintersemester 2000/2001 von der Johannes Kepler Universität Linz unter Mitwirkung der Technischen Universität Graz das individuelle Diplomstudium *g-tec* (Geoinformationstechnologie) angeboten (<http://www.rottenmann.at/diplomstudium>).

Dieses Studium positioniert sich an der Schnittstelle von Informatik, Geoinformatik und Wirtschaft und deckt so einen Bereich mit starker Marktnachfrage ab. Etwa ein Drittel des Lehrvolumens sind Fächer der Geoinformatik und werden von der Technischen Universität Graz abgedeckt. Zwei Drittel des Lehrangebotes entsprechen dem Studienplan der Studienrichtung Wirtschaftsinformatik der Universität Linz und betten die Geoinformatik in das Umfeld der Informatik und der Wirtschaft ein.

Bei der Planung und Realisierung dieses neuartigen Bildungsangebotes wurden unter anderem die Ziele der Marktorientiertheit, der Interdisziplinarität sowie der internationalen Ausrichtung mit hoher Priorität verfolgt. *g-tec* weist damit sehr attraktive und zukunftsweisende Attribute auf:

- Der Aufbau der Geoinformatik auf die allgemeine Informatik garantiert fundierte Fachkenntnisse der Absolventen im EDV-, GIS- und IT-Bereich und gibt damit dem Studium eine sehr innovative und zukunftsorientierte Ausrichtung.
- Durch die Kombination der Geoinformatik mit Fächern der Wirtschaft konzentriert sich das Bildungsangebot von *g-tec* auf die immer wichtigere Rolle des globalen Informationsmarktes.
- Die Nutzung des Lehrangebotes verschiedener österreichischer Universitäten im Zuge eines Individualstudiums erlaubt eine besonders kompakte und stromlinienförmige Gestaltung der Lehrinhalte.
- Ein verhältnismäßig hoher Anteil an Praktika soll die Teamarbeit sowie die Kommunikations- und Präsentationsfähigkeit in besonderem Maße fördern.

Der Einsatz moderner Videokonferenzsysteme erlaubt eine massive Unterstützung der Lehre durch höchst innovative Methoden des Tele-Teaching und Tele-Learning und gibt so dem Studium eine besonders attraktive und zukunftsweisende Note.

Das Studium gliedert sich in zwei Studienabschnitte zu je 4 Semester und schließt nach Abfassung einer Diplomarbeit mit dem akademischen Grad „Magistra/Magister der Sozial- und Wirtschaftswissenschaften“ (abgekürzt „Mag. rer. soc. oec.“) ab.

Der erste Studienabschnitt umfasst ein Gesamtausmaß von 79 Semesterwochenstunden und beinhaltet neben den Grundlagen der Geoinformatik im wesentlichen die Grundlagenfächer der Informatik, Wirtschaftsinformatik, Volks- und Betriebswirtschaftslehre und Recht, sowie Mathematik, Statistik und Englisch. Kernthema des geoinformationswissenschaftlichen Teiles ist die Vermittlung der Grundlagen der raum- und zeitbezogenen Information und deren Verarbeitung. Fundierte Kenntnisse satellitengestützter Positionierung und Navigation zur Herstellung des Raumbezuges stellen einen bedeutenden integrierten Bestandteil dar. Kenntnisse der exakten Beziehung zwischen verschiedenen Bezugssystemen sind dabei zum Zwecke der Transformation, Abbildung und Visualisierung raumbezogener Information unerlässlich.

Der zweite Studienabschnitt umfasst 65 Semesterwochenstunden und dient der Vermittlung und Vertiefung jener Kenntnisse, durch die eine wissenschaftliche Berufsvorbildung für die Bereiche der Wirtschafts- und Geoinformatik sichergestellt wird. Die Inhalte der Fächer der Geoinformationssysteme- und Technologien zielen auf die Vermittlung der Grundlagen der Modellbildung zur optimalen Schätzung von Modellparametern ab. Die statistische Analyse raum- und zeitbezogener Daten wird ebenso gelehrt wie die Vermittlung der Kenntnisse zur Verarbeitung geographischer Information sowie die gezielte Anwendung von Geoinformationssystemen. Andere Fächer des zweiten Studienabschnittes umfassen die Planung und Realisierung von Informatikprojekten, Informationsmanagement, Software Engineering, Data Engineering und Wissensverarbeitung, Kommunikationssysteme sowie Anwendungen der Wirtschaftsinformatik.

Information im allgemeinen und raum-zeitbezogene Information im besonderen bestimmen immer stärker zahlreiche wirtschaftliche Abläufe, strategische Entscheidungen und wissenschaftliche Lösungsansätze und nehmen daher einen ständig steigenden Stellenwert ein. Das Ausbildungsziel von *g-tec* ist daher, auf diese Entwicklung mit hochqualifizierten Experten auf den entsprechend stark expandierenden Gebieten der Informationstechnologien, der Wirtschaftsinformatik und der Geoinformatik zu reagieren.

## 5. Fachhochschule Technikum Kärnten, Villach

Der neue Fachhochschulstudiengang *Geoinformation* (<http://www.cti.ac.at>) wird ExpertInnen ausbilden, die neue geographische Anwendungen entwerfen, entwickeln und verkaufen können: sie werden den Markt für Geoinformation und die modernen Technologien kennen, aber auch die speziellen Eigenschaften von räumlichen Daten berücksichtigen können. Anwendungsgebiete liegen in traditionellen Bereichen wie Raumplanung, Umweltschutz und Naturressourcenmanagement oder Verkehrsmanagement. Dazu kommen neue Anwendungsgebiete wie Tourismus, Logistik, Geo-Marketing oder Sozialleistungen.

Der Fachhochschulstudiengang ordnet dem neu entstehenden Berufsfeld des Geoinformationsingenieurs eine international innovative, dynamische und der Wirtschaft entsprechende akademische Ausbildung zu. Der Studienplan kombiniert das Lehren von Theorie mit Praxis. Dazu werden realitätsnahe, fächerübergreifende Praktika während des Semesters angeboten (insgesamt 41 SWS in Semester 1-6) sowie das Berufspraktikum im 7. Semester (20 Wochen je 40 Stunden). Die Offenheit des Fachhochschul-Studienganges ist durch die interdisziplinäre Zusammensetzung der Lehrenden garantiert, die von unterschiedlichen wissenschaftlichen und kulturellen Traditionen kommen. Die teilweise Präsentation des Lehrstoffes auf Englisch sowie das Unterrichtsfach *Englisch als Fachsprache* stellen sicher, dass die AbsolventInnen in dieser Sprache kommunizieren können.

Der Fachhochschulstudiengang umfasst, einschließlich des Berufspraktikums, der Diplomarbeit und der das Studium abschließenden Prüfungen, acht Semester Regelstudienzeit. Der Studiengang gliedert sich in ein Grundstudium (1.-4. Semester) und ein Hauptstudium (5.-8. Semester).

Der Lehrplan umfasst 3 Schwerpunktbereiche:

- Verarbeitung räumlicher Daten,
- Informationstechnologie (Design technischer Systeme und Softwareproduktion) sowie
- Aspekte der Betriebswirtschaft, Recht, Marketing und Projektmanagement.

In semesterübergreifenden Projekten werden konkrete Anwendungsgebiete der räumlichen Informationsverarbeitung von allen Seiten beleuchtet und bearbeitet. Der Erwerb von Fähigkeiten wie Teamarbeit, Teamorganisation, MitarbeiterInnenführung, Präsentationstechniken und Rhetorik, und die Vermittlung von Sprachkompetenz in Deutsch und Englisch ergänzen das Fächerangebot. Kernfächer sehen wie folgt aus:

- Räumliche Informationsverarbeitung: 16%
- Informationstechnologie: 22 %
- Projektarbeiten: 31%
- Wirtschafts- und Rechtsfächer: 6%
- Sprachen (Englisch): 11%
- Sonstige Fächer: 14%

Nach dem erfolgreichen Abschluss des Fachhochschulstudienganges *Geoinformation* wird dem Absolventen / der Absolventin der akademische Grad eines *Diplomingenieurs für Geoinformation (FH)* / einer *Diplomingenieurin für Geoinformation (FH)* - auf Englisch *Geoinformation Engineer* - verliehen.

Im Wintersemester 2000/2001 startete der erste Jahrgang das Studium. Für 24 Studienplätze haben sich 53 KandidatInnen beworben, und davon wurden 25 aufgenommen. Derzeit gibt es 19 Studierende im zweiten Semester: 9 Frauen und 10 Männer.

## 6. Zusammenfassung und Ausblick

Aus den einzelnen Berichten ist die Umbruchsituation der Ausbildung im Fachbereich *Vermessung und Geoinformation* in Österreich deutlich erkennbar. Ganz unterschiedliche Initiativen zeugen von einem Wandel im Berufsbild und Berufsmarkt der Geodätin und des Geodäten. Die Divergenz der Maßnahmen an den Hochschulen zeigen, dass der Diskussionsprozess um die einzuschlagende Richtung noch nicht abgeschlossen ist, bzw. dass der Markt auch eine Differenzierung verträgt, wahrscheinlich braucht.

Wohl klingt überall durch, dass dem Bereich *Geoinformation* (dem Verkaufen von geodätisch erhobener Information) mehr Marktpotential zugetraut wird als den Künsten des Messens selbst. Das mag daran liegen, dass immer mehr flächendeckend digitale räumliche Daten vorliegen und zugreifbar sind. Es bedeutet aber vor allem, dass sich allmählich der Traum der Geodäten erfüllt, nicht mehr für jeden Zweck neu Daten erheben zu müssen. Auf Geoinformation ausgerichtete Studiengänge findet man auch im Fach Geographie in Österreich, so an den Universitäten von Salzburg und Wien.

Ungeachtet des Trends zur Geoinformation besteht ein Bedarf nach kompetent ausgebildeten Fachleuten im Vermessungswesen. Dieser Bedarf ist in Österreich heute wohl etwas größer als die Zahl der AbsolventInnen, so dass die Berufsaussichten heutiger Studierender gut sind.

# Digitale Bildmessung retroreflektierender Marken in Echtzeit

**GEORG WIORA & PAUL BOBROV & BERND POLLAK**

DaimlerChrysler AG, Forschung und Technologie,  
Abt. Messtechnik und Modelltechnik,  
Wilhelm-Runge-Str. 13, 89081 Ulm, Deutschland,  
Email: [georg.wiora@DaimlerChrysler.com](mailto:georg.wiora@DaimlerChrysler.com)

*Zusammenfassung: Die Verfügbarkeit von schnellen programmierbaren Gate-Arrays (FPGA) ermöglicht die Lösung komplexer Aufgaben in Echt-Zeit zu erschwinglichen Preisen. Diese Arbeit beschreibt einen Ansatz für die Bildmessung retro-reflektierender photogrammetrischer Marken mit sub-Pixel-Genauigkeit direkt im Datenstrom einer digitalen Kamera. Die Bilder müssen dazu nicht im Arbeitsspeicher abgelegt werden. Der Rechner empfängt nur die gültigen Bildkoordinaten der Marken und kann seine ganze Leistung für anspruchsvollere photogrammetrische Aufgaben verwenden. Der verwendete Algorithmus ist robust und benötigt nur wenige Parameter. In einer ersten Umsetzung ist ein Durchsatz von 40 MPixel pro Sekunde geplant. Die Leistungsgrenzen gängiger Hardware liegen bei etwa 250 MPixel pro Sekunde. Damit ist diese Technik auch im Hochgeschwindigkeitsbereich einsetzbar.*

## 1 Einleitung

Bei der Bildmessung von Retroreflektierenden kreisförmigen Signalmarken sind zwei Grundprobleme zu lösen: Zuerst müssen zusammenhängende Gebiete analysiert und gekennzeichnet werden und anschließend muss das Zentrum jedes Gebietes mit einem geeigneten Algorithmus bestimmt werden. Für beide Probleme gibt es seit langem robuste Software-Lösungen.

### 1.1 Zusammenhangsanalyse

Da retroreflektierende Signalmarken einen guten Bildkontrast aufweisen, kann die Zusammenhangsanalyse auf einer binarisierten Version des jeweiligen Bildes erfolgen. Die vollständigste und gleichzeitig effizienteste Lösung dieses Problems liefert wohl der BCC-Algorithmus (Binary Connected Components) von MANDLER & OBERLÄNDER (1990). Mit nur einem Durchlauf kann er die Ränder aller zusammenhängenden Gebiete und ihre Abhängigkeiten in einem Bild bestimmen. Das gilt auch für mehrfach ineinander verschachtelte Gebiete. Ein spezieller Ansatz für die Photogrammetrie wurde von MAAS (1992) beschrieben.

### 1.2 Punktmessung

Sind alle Gebiete markiert kann ein Verfahren zur Punktmessung auf sie angewendet werden, wie sie z.B. von LUHMANN (2000) oder SHORTIS ET AL. (1995) beschrieben wurden.

### 1.2.1 Binärer Schwerpunkt

Im einfachsten Fall bestimmt man den Schwerpunkt  $(\bar{u}, \bar{v})$  des binarisierten Bildes  $b$  als Mittelwert der Bildkoordinaten aller Punkte  $b(u, v) \equiv 1$  in der Umgebung der Marke:

$$\bar{u} = \frac{\sum_{u=u_{\min}}^{u_{\max}} \sum_{v=v_{\min}}^{v_{\max}} u \cdot b(u, v)}{\sum_{u=u_{\min}}^{u_{\max}} \sum_{v=v_{\min}}^{v_{\max}} b(u, v)} \quad \bar{v} = \frac{\sum_{u=u_{\min}}^{u_{\max}} \sum_{v=v_{\min}}^{v_{\max}} v \cdot b(u, v)}{\sum_{u=u_{\min}}^{u_{\max}} \sum_{v=v_{\min}}^{v_{\max}} b(u, v)} \quad (1)$$

### 1.2.2 Grauwert-gewichteter Schwerpunkt

Eine Andere Möglichkeiten ist die Berechnung eines Grauwert-gewichteten Schwerpunkts (Weighted Center of Gravity) auf dem Graubild  $g$  nach der Formel:

$$\bar{u} = \frac{\sum_{u=u_{\min}}^{u_{\max}} \sum_{v=v_{\min}}^{v_{\max}} u \cdot g(u, v) \cdot b(u, b)}{\sum_{u=u_{\min}}^{u_{\max}} \sum_{v=v_{\min}}^{v_{\max}} g(u, v) \cdot b(u, b)} \quad \bar{v} = \frac{\sum_{u=u_{\min}}^{u_{\max}} \sum_{v=v_{\min}}^{v_{\max}} v \cdot g(u, v) \cdot b(u, b)}{\sum_{u=u_{\min}}^{u_{\max}} \sum_{v=v_{\min}}^{v_{\max}} g(u, v) \cdot b(u, b)} \quad (2)$$

Die Multiplikation mit dem binarisierten Bild  $b$  dient zur Selektion der Bildpunkte, die zur Marke gehören.

### 1.2.3 Template Matching

Komplexer ist das sogenannte *Template Matching*. Dabei wird die Kreuzkorrelation  $k$  zwischen einem vorgegebenen Muster  $m(u, v)$  und dem Bild  $g(u, v)$  berechnet.

$$k(u', v') = \int_{u_{\min}}^{u_{\max}} \int_{v_{\min}}^{v_{\max}} m(u - u_{\min}, v - v_{\min}) \cdot g(u - u', v - v') \, dv \, du \quad (3)$$

Das Maximum der Korrelationsfunktion  $k$  gibt den Ort des Markenzentrums an. Da die Marken meist perspektivisch verzerrt sind und im Bild unterschiedlich groß erscheinen, genügt es nicht nur mit einem Muster zu vergleichen. Man muss die Korrelation mit einer ganzen Palette unterschiedlicher Vorlagen berechnen und das Ergebnis der „passgenauesten“, herausuchen. Dadurch benötigt das Verfahren relativ viel Rechenzeit. Als Muster dienen üblicher Weise Ellipsen oder Rechtecke unterschiedlicher Größe mit verschiedenen Randschärfen.

## 1.3 Field Programmable Gate Arrays (FPGA)

Bei FPGAs handelt es sich um frei verdrahtbare logische Schaltkreise, die aus einer Vielzahl von gleichartigen Logikblöcken (CLBs) aufgebaut sind. Sie verfügen über frei programmierbare Ein- und Ausgänge, wodurch sie unabhängig von Pinbelegung und Übertragungsprotokollen in vielen Anwendung einsetzbar sind. Typische Einsatzgebiete sind Netzwerk-Router und Mobilfunk. Die Programmierung erfolgt im eingebauten Zustand während des laufenden Betriebes und kann beliebig oft bis zu 1000 mal pro Sekunde geändert werden. Für häufige

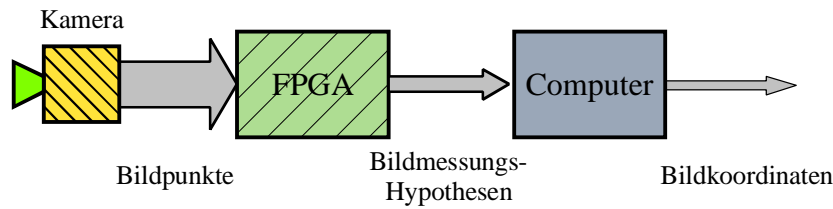


Abb. 1: Datenfluss bei der Bildmessung. Von der Kamera bis zum Ergebnis der Bildmessung findet eine kontinuierliche Datenreduktion statt.

Aufgaben, wie zum Beispiel die Anbindung an einen PCI-Bus gibt es fertige Programmblöcke auf dem Markt, die dem Entwickler einen großen Teil der Implementierungsarbeit abnehmen. Die Programmierung der Bausteine erfolgt meist in einer *Hardware-Beschreibungssprache* wie HDL (Hardware- Definition-Language), VHDL (Very Large Scale Integrated Circuit-HDL, bzw. VLSI- HDL) oder AHDL (Application Specific Integrated Circuit HDL bzw. ASIC-HDL).

## 2 Algorithmen

Beim Entwurf eines solchen Systems ist zu berücksichtigen, dass der Aufwand für die Entwicklung einer VHDL-Programmierung bei geringerer Flexibilität erheblich höher ist, als bei einer Software-Lösung. Es ist also wichtig, die Schnittstelle zwischen Hardware- und Softwareanteil der Lösung so zu legen, dass das Endprodukt bei minimalem Entwicklungsaufwand ausreichend schnell läuft. Eine mögliche Aufteilung wird in Abb. 1 gezeigt, aber Andere sind möglich. Darum ist eine gute Abschätzung der Datenrate wichtig.

### 2.1 Abschätzung der Datenrate

Das Ziel ist, mit Hilfe eines FPGAs den Datenstrom einer digitalen Kamera soweit zu reduzieren, dass ein gängiger Rechner gleichzeitig mehrere Kameras im Dauerbetrieb bedienen kann. Eine HDTV Kamera mit einer Auflösung von  $1280 \times 1024$  Bildpunkten und einer Bildrate von 25 Bildern pro Sekunde (z.B. Vosskühler CCD1300F) liefert eine mittlere Datenrate von 32 MPunkten pro Sekunde, mit einer typischen Übertragungsrate von 40 MPunkten pro Sekunde. Bei der derzeit üblichen Leitungsgrenze des PCI-Busses von rund 100 MByte pro Sekunde stellt das schon von der reinen Datenübertragung erhebliche Anforderungen an die Rechnerarchitektur. An eine simultane Verarbeitung oder gar den Anschluss mehrerer Kameras ist dabei mit einem herkömmlichen Mikroprozessor unter einem gängigen Betriebssystem nicht zu denken.

Um die maximale Belastung des Rechners abzuschätzen, berechnet man die Anzahl  $n$  der Taktzyklen die pro Bildpunkt zur Verarbeitung zur Verfügung stehen:

$$n_t = \frac{f}{r_k} \quad (4)$$

Mit der Taktfrequenz  $f$  des Mikroprozessors und der Übertragungsrate  $r_k$  der Kamera. Verwendet man für  $r_k$  die oben angesetzten 40 MHz und für  $f$  1000 MHz, so stehen lediglich

$n_t = 25$  Taktzyklen pro Bildpunkt zur Verfügung. Das unterstreicht nochmals die Notwendigkeit der Datenreduktion. Ein sinnvoller Wert für  $n_t$  sollte deutlich größer als 1000 sein, insbesondere wenn man bedenkt, dass nicht alle Taktzyklen für Prozessoroperationen zur Verfügung stehen, sondern ein Teil für Wartezeiten beim Speicherzugriff verloren geht.

Damit das System nicht im Grenzbereich läuft, sollte eine großzügige Reserve von  $\alpha = 50\%$  der Zyklen für die nebenbei anfallenden Aufgaben des Betriebssystems eingerechnet werden. Soll dann noch die obige Forderung nach dem gleichzeitigen Betrieb von  $c$  Kameras erfüllt werden reduziert sich die Zyklenzahl noch weiter:

$$n_t = (1 - \alpha) \cdot \frac{f}{c \cdot r_k} \quad (5)$$

Löst man diese Gleichung nach  $r_k$  auf, kann man damit die maximale Datenrate  $r_{\max}$ , die an der Schnittstelle von FPGA zu Rechner auftreten darf, berechnen:

$$r_{\max} = \frac{f \cdot (1 - \alpha)}{c \cdot n_t} \quad (6)$$

Interessant ist auch das Verhältnis von  $r_k$  zu  $r_{\max}$ . Das ist der Datenreduktionsfaktor  $\gamma$ :

$$\gamma = \frac{r_k}{r_{\max}} = \frac{r_k \cdot c \cdot n_t}{f \cdot (1 - \alpha)} \quad (7)$$

Bei einem System mit  $c = 4$  Kameras,  $\alpha = 0,5$ ,  $f = 1000$  MHz und  $n_t \geq 1000$  Zyklen pro Bildpunkt ergibt sich ein Datenreduktionsfaktor von

$$\gamma \geq 320. \quad (8)$$

Das bedeutet, dass der Informationsgehalt eines Bildes mit Ursprünglich einem MByte Speicherbedarf mit maximal 3200 Byte dargestellt werden muss, bevor es in den Computer zur weiteren Auswertung übertragen werden kann.

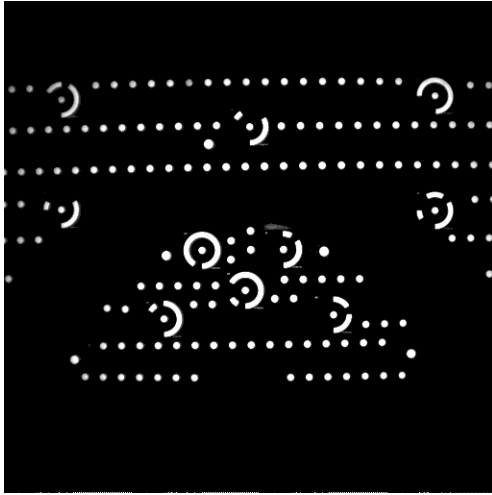
## 2.2 Informationsgehalt

Die gesuchten Informationen, also die Koordinaten der zu messenden Marken, sind im original Graubild stark redundant kodiert. Um abzuschätzen ob die gewünschte Datenreduktion erreichbar ist, bestimmen wir zunächst die Kodierungsgröße typischer Bilder (s. Abb. 2(a) auf der nächsten Seite) mit retroreflektierenden photogrammetrischen Marken bei unterschiedlichen Kodierungsverfahren.

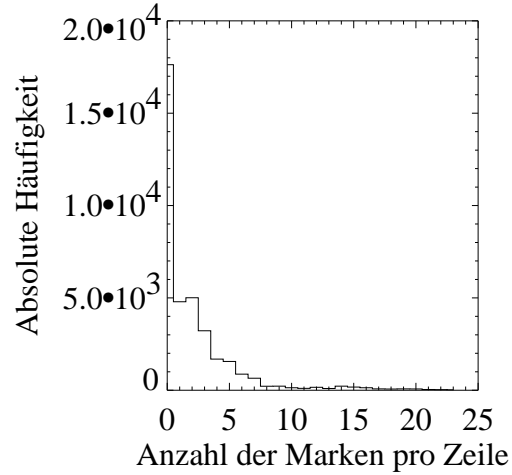
### 2.2.1 Segmentierung

Auf der Ebene der Grauwerte liegt die Information eines Bildes wie dem in Abb. 2(a) auf der nächsten Seite dargestellten im wesentlichen in den Übergangsbereichen zwischen dem schwarzen Hintergrund und den weiß dargestellten Retromarken. Es bietet sich also an, das Bild in informationstragende und unwichtige Teile zu segmentieren. Das erfolgt bei diesem Bildtyp am einfachsten durch eine Schwellwertbildung mit einer nachfolgenden *Dilate*-Operation, die die hellen Gebiete um eine vorgegebene Randbreite  $R$  vergrößert. Dadurch wird sichergestellt, dass der ganze Rand der Bildpunkte erfasst wird.





(a)



(b)

Abb. 2: a) Ein typisches Messbild einer Situation mit retroreflektierenden Marken, aufgenommen mit einer Dalsa CA-D6 Hochgeschwindigkeitskamera. Trotz der relativ großen Anzahl von etwa 170 Marken bei einer niedrigen Kameraauflösung von  $512 \times 512$  Bildpunkten beträgt der Anteil der informationstragenden Bildpunkte nur 3 bis 4%. b) Histogramm der Markenhäufigkeiten pro Bildzeile über 70 Bilder ähnlich der Szene in Abb. a). Maximal wurden 22 Marken pro Zeile gefunden, wobei die Marken für jede Zeile neu gezählt wurden. Insgesamt befanden sich maximal 176 Marken im gesamten Bild, durchschnittlich waren es 1,9 Marken pro Zeile.

Die Fläche des Bildes, die von den Marken bedeckt wird hängt vom Marken-Durchmesser  $D$ , der Randbreite  $R$  und der Marken-Anzahl  $n_p$  ab. Nach der Segmentierung beträgt dann die Datenmenge in Bits:

$$V_S = n_b \cdot n_p \cdot \pi \cdot \left(\frac{D}{2} + R\right)^2 \quad (9)$$

Dabei steht  $n_b$  für die Bit-Tiefe der Grauwerte. Der Kompressionsfaktor  $\gamma$  ergibt sich als Quotient von Bildgröße  $\tilde{u} \cdot \tilde{v}$  und  $V_S$ :

$$\gamma_s = \frac{\tilde{u} \cdot \tilde{v} \cdot n_b}{V_s} = \frac{\tilde{u} \cdot \tilde{v}}{n_p \cdot \pi \cdot (D/2 + R)^2} \quad (10)$$

Für eine Bildgröße von  $512 \times 512$  Bildpunkten,  $n_p=170$  Marken mit einem Durchmesser von  $D = 9$  Bildpunkten sowie einem Rand  $R$  von 2 Bildpunkten ergibt sich ein Kompressionsfaktor von  $\gamma \approx 11,6$ . Das ist 30 mal weniger, als die Abschätzung aus Abschnitt 2.1 nahelegt, reicht aber schon aus, um den Bilderstrom einer schnellen Kamera platzsparend für eine nachfolgende Bildmessung zwischen zu speichern.

## 2.2.2 Grauwert-Kompression

Einen weitere deutliche Reduktion der Datenmenge ergibt sich durch Kompression der verbleibenden Grauwerte. Das bietet sich vor allem im Zusammenhang mit der oben beschriebenen Segmentierung an. Selbstverständlich ist dieser Schritt verlustbehaftet. Wie weit man diese Reduktionsmethode einsetzen kann, hängt also von der zu erzielenden Genauigkeit der nachfolgenden Bildmessung ab. Die maximale Reduktion ergibt sich im Grenzfall der Binarisierung.

Die Umkodierung der Grauwerte vom original Grauwert  $g$  zum komprimierten Grauwert  $g_c$  erfolgt nach folgender Funktion:

$$g_c = \begin{cases} 0 & \text{für } g < g_{\min} \\ \left\lfloor \frac{g - g_{\min}}{g_{\max} - g_{\min}} \cdot (2^{n_b} - 2) + 1 \right\rfloor & \text{für } g_{\min} \leq g \leq g_{\max} \\ 2^{n_b} - 1 & \text{für } g > g_{\max} \end{cases} \quad (11)$$

Die eckigen Klammern symbolisieren die Abrundung auf die nächst kleinere ganze Zahl. Der zu kodierende Grauwert-Bereich wird durch  $g_{\min}$  und  $g_{\max}$  begrenzt. Die komprimierten Grauwerte  $g_c$  haben dann genau einen Kode für informationslose Bereiche nämlich die 0 und einen Kode für überbelichtete Bereiche, das ist  $2^{n_b} - 1$ . Die restlichen  $2^{n_b} - 2$  Codes stehen für die wesentliche Bildinformation zur Verfügung. Ein solcher Kode ist besonders günstig einzusetzen, wenn der Helligkeitsbereich der Bilder nur ungenügend ausgenutzt werden kann.

Der Reduktionsfaktor der sich durch Gauwert-Kompression erzielen lässt ist einfach das Verhältnis der Bit-Tiefe  $n'_b$  der Originaldaten zur Bit-Tiefe der komprimierten Daten:

$$\gamma_k = \frac{n'_b}{n_b} \quad (12)$$

Bei der Binarisierung eines 12-Bit tiefen Bildes erreicht man also lediglich eine Reduktion um dem Faktor 12, und auch das nur mit einem deutlichen Genauigkeitsverlust bei der Bildmessung.

## 2.2.3 Bildmessung

Die effizienteste, aber auch aufwändigste Reduktionsmethode ist die Bildmessung selbst. Die wesentlichen Informationen im Bild sind die Parameter, die die Marken charakterisieren. Für eine robuste Beschreibung der Marken benötigt man mehr als nur die Mittelpunktskoordinaten  $\bar{u}$  und  $\bar{v}$ . Sinnvolle Größen sind die Fläche  $A$  und der Umfang  $l$  der Marken, sowie der maximale Grauwert  $g_{\max}$  und die Ausdehnung entlang der Koordinatenachsen  $\Delta u$  und  $\Delta v$ . Weiterführend können noch die Ellipsenparameter, also die beiden Halbachsenlängen  $a$  und  $b$  von Interesse sein. Die Informationsmenge pro Marke ist in Tab. 1 auf der nächsten Seite(a) zusammengefasst und beträgt etwa 66 Bit pro Marke. Der Informationsbedarf pro Bild liegt dann bei:

$$V_m = n_p \cdot 66 \quad (13)$$

Im oben genannten Beispiel mit 170 Marken sind das somit 11220 Bit oder 1403 Bytes. Der Kompressionsfaktor beträgt dann analog zu (10):

$$\gamma_m = \frac{\tilde{u} \cdot \tilde{v} \cdot n_b}{V_m} = \frac{\tilde{u} \cdot \tilde{v} \cdot n_b}{66 \cdot n_p} \quad (14)$$

Tab. 1: a) Informationsgehalt der Bildpunktparameter. Die Anzahl der Bits wurde entsprechend der Wertebereiche gewählt.

Parameter		Bits	Parameter		Bits
$\bar{u}$	Koordinate	12	$\sum g(u, v)$	Grauwertsumme	16
$\bar{v}$	Koordinate	12	$\sum \delta u \cdot g(u, v)$	Schwerpunkts Moment	20
$\Delta u$	Breite	5	$\delta u$	Breite	5
$\Delta v$	Höhe	5	$g_{\max}$	maximaler Grauwert	12
$A$	Fläche	12	$\Delta U$	Lauflänge	12
$l$	Umfang	8			
$g_{\max}$	max. Grauwert	12			
<b>Summe:</b>		<b>66</b>	<b>Summe: 65</b>		

(a) Bildmessung

(b) Lauflängensummierung

Im Beispiel der Dalsa Kamera ergibt sich  $\gamma_m \approx 187$ . Das Verfahren wird um so effizienter je höher die Kamera-Auflösung ist. Für eine Kamera mit  $1320 \times 1024$  Bildpunkte und 12 Bit Grauwert-Auflösung ergibt sich  $\gamma_m \approx 1450!$

### 3 Implementierungen

Hier sollen drei Ansätze beschrieben werden, die sich in unterschiedlichen Stadien der Realisierung befinden.

#### 3.1 Grauwert-Kompression und Segmentierung

Das erste Verfahren, das bereits im Jahr 2000 zusammen mit der Firma Cosyco aus München (OBERPAUL 2000) auf der Pipeline-Processor-Karte MaxPCI von DataCube umgesetzt wurde, verwendet eine Kombination aus Segmentierung und Grauwertkompression sowie eine nachfolgende Lauflängenkodierung. Das Ziel war hierbei lediglich die Aufzeichnung der Bildsequenz einer Hochgeschwindigkeitskamera über Zeiträume von 60 Minuten bei 160 Bildern pro Sekunde. Eine Online-Messung der Bildkoordinaten war mit dieser Hardware noch nicht zu realisieren.

Zuerst werden die Grauwerte des Bildes von acht auf vier Bit komprimiert. Durch eine günstige Wahl von  $g_{\min}$  ergibt sich dadurch auch eine Segmentierung des Bildes, da alle unwesentlichen Teile mit Null kodiert werden. Anschließend wird das Bild mit einer vier Bit Lauflängenkodierung komprimiert. Eine On-Line- Bildmessung erfolgt dabei noch nicht. Die Daten werden lediglich in komprimierter Form auf einer Festplatte für die Off-Line Auswertung aufgezeichnet.

Im günstigsten Fall erreicht man so eine Kompression von  $\gamma = 16$ : Faktor zwei durch die Grauwertkompression und maximal einen Faktor acht durch die vier Bit Lauflängenkodierung. In einer realen Anwendung mit einer Dalsa DA-C6 Hochgeschwindigkeitskamera mit einer Auflösung von  $512 \times 512$  Bildpunkten liegt der typische Kompressionsfaktor zwischen

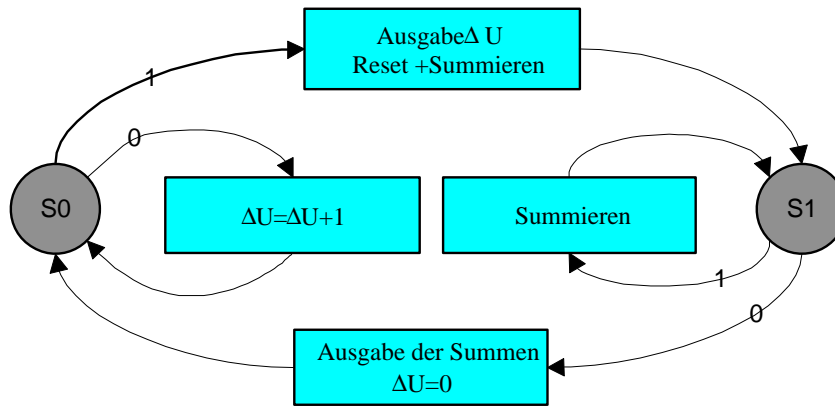


Abb. 3: Zustandsdiagramm des endlichen Automaten zur Lauflängensummierung.  $\Delta U$  zählt aufeinanderfolgende schwarze Bildpunkte. Die 1-Übergänge werden durch weiße, die 0-Übergänge durch schwarze Bildpunkte ausgelöst.

sechs und acht. Die Bildmessgenauigkeiten, die sich auf solchermaßen komprimierten Bilder erreichen lassen liegen bei etwa  $1/30$  Bildpunkt.

## 3.2 Lauflängensummierung

Ein Mittelweg zwischen der Komplexität einer kompletten Bildmessung im FPGA und der im vorangegangenen Abschnitt beschriebenen Bildkomprimierung ist die zeilenweise Bildmessung oder *Lauflängensummierung*. Dabei wird nur der horizontale Teil der Zusammenhangsanalyse im FPGA erledigt. Die Erkennung der Zeilen-übergreifenden Gebiete erfolgt im Rechner. Der Algorithmus betrachtet dabei jeweils nur einen Bildpunkt in der Reihenfolge, wie sie von der Kamera geliefert werden. In Tab. 1(b) auf der vorherigen Seite sind die Parameter aufgeführt, die bei diesem Verfahren vom FPGA-bestimmt werden.

Im FPGA wird dabei ein einfacher Zustandsautomat mit nur zwei Zuständen implementiert. Der entsprechende finite Automat ist in Abb. 3 dargestellt. Der Übergang zwischen den Zuständen wird durch den Wert des Binärbildes  $b(u, v)$  an der aktuellen Bildkoordinate gesteuert. In Worte gefasst geschieht folgendes:

1. Solange  $b(u, v) = 0$ , setze  $\delta U = \delta U + 1$
2. Sende  $\delta U$  zum Rechner
3. Solange  $b(u, v) = 1$ , berechne  $\sum g(u, v)$ ,  $\sum \delta u \cdot g(u, v)$ , und erhöhe  $\delta u$  um 1.
4. Sende alle Summen zum Rechner, setze  $\Delta U = 0$  und beginne wieder bei 1.

Für jede Marke, die in einer Bild-Zeile auftaucht, müssen 65 Bit übertragen werden. Der Rechner hat nun noch die Aufgabe, die Summen der Marken von zwei aufeinanderfolgenden Zeilen miteinander zu verschmelzen, wenn sie überlappende Anfangs- und Endpunkte haben. Man macht sich für die Berechnung der Momente die Tatsache zu Nutze, dass die Zeilenkoordinate  $v$  über eine Zeile konstant ist. Durch die Verwendung der Relativkoordinate  $\delta u$  kann man die Breite der Multiplizierer im FPGA deutlich einschränken und dadurch viele Ressourcen sparen. Rechnet man von den Relativkoordinaten wieder auf Absolutwerte zurück, können aus diesen Momenten die Marken-Parameter berechnet werden.

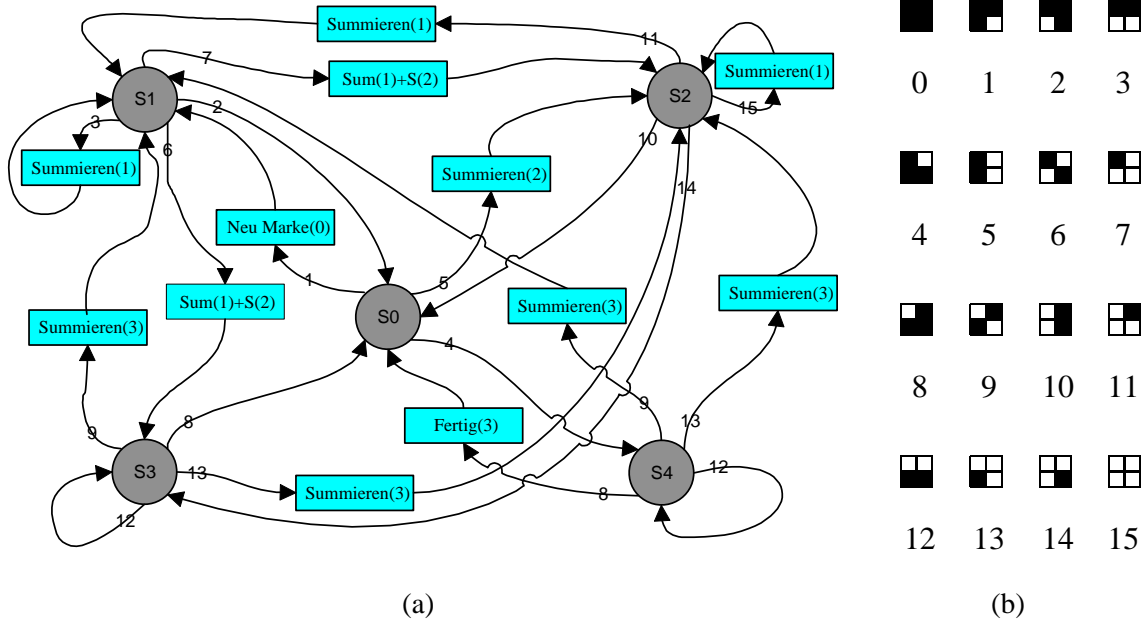


Abb. 4: a) Zustandsdiagramm des endlichen Automaten zur Markenmessung. Die Kreise symbolisieren die Zustände, die Pfeile stellen Übergänge dar. Die Zahlen an den Pfeilen bezeichnen das Eingangsmuster, das den Übergang auslöst. In den rechteckigen Kästen sind die Operationen angegeben, die durch den Übergang ausgelöst werden. b) Liste der binären Muster von vier benachbarten Bildpunkten, die die Übergänge zwischen den Zuständen des Automaten auslösen.

### 3.3 Bildmessungshypothese und Zusammenhangsanalyse

Diese Komplett-Lösung ist erheblich komplexer als die Lauflängensummierung. Für die Zusammenhangsanalyse müssen zwei aufeinanderfolgende Zeilen des Binärbildes analysiert werden. Das erfordert die Zwischenspeicherung von  $\tilde{u} + 2$  Bildpunkten in einem Schieberegister. Die Übergänge des zugrundeliegenden endlichen Automaten wie er in Abb. 4(a) dargestellt ist, werden durch die Werte von  $2 \times 2$  benachbarten Bildpunkten gesteuert. Die 16 möglichen Kombinationen sind in Abb. 4(b) aufgeführt.

Die Zusammenhangsanalyse erfolgt über eine Registerbank, deren freie Adressen auf einem Stapel verwaltet werden. Erkennt der Automat den Start einer neuen Marke, holt er sich die oberste Adresse vom Stapel und beginnt mit dem Summieren der Momente im entsprechenden Element der Registerbank. Gleichzeitig schreibt er die Nummer des verwendeten Registers für jede Bildspalte  $u$ , die von der Marke bedeckt wird, in ein Schieberegister von der Länge  $\tilde{u} + 2$ . Gelangt er in der nächsten Zeile wieder zur selben Marke, kann er aus dem Schieberegister die Adresse in der Registerbank holen. Jeder Übergang löst eine bestimmte Aktion des Automaten aus. Die Aktionen sind in Abb. 4(a) in eckigen Kästchen dargestellt:

**Neue Marke( $x$ ):** Hole Adresse einer leeren Registerbank vom Stapel und schreibe die Nummer in Schieberegisterposition  $x$  und beginne mit dem Summieren.

**Summieren( $x$ ):** Summieren der Momente in der Registerbank aus dem Schieberegistereintrag  $x$ .

**S( $x$ ):** Vereinigen der Momente in der Registerbank aus dem Schieberegistereintrag  $x$  mit der aktuellen Bank.

**Fertig( $x$ ):** Schreibe die Momente aus dem Register das in der Schieberegisterposition  $x$  vermerkt ist in den Ausgabepuffer.

Der Parameter  $x$  bezeichnet jeweils einen doppelt indirekten Zugriff auf eine Registerbank. Mit  $x$  wird eine der vier benachbarten Schieberegisterpositionen indiziert und von dort die Adresse in der Registerbank gelesen, die für die Operation benötigt wird.

Die vom FPGA berechneten Momente werden vom Computer schließlich zu einer Bildmess-Hypothese verrechnet und durch eine auf den Parametern in Tab. 1(a) beruhende Klassifizierung zur den endgültigen Bildmessungen weiterverarbeitet. Bis jetzt existiert diese Maschine nur als Softwaresimulation, die Realisierbarkeit auf gängigen FPGA-Bausteinen wird in den nächsten Monaten folgen.

## 4 Schluss

Aus den Erfahrungen, die wir mit der Hochgeschwindigkeits-Bildkompression aus Abschnitt 3.1 gewonnen haben, konnten wir eine kombinierte Lösung für eine Echtzeit-Bildmessung mit FPGAs und standard-Rechnern herleiten.

Der von uns entworfene Algorithmus ist, bei all den Einschränkungen die die FPGA-Architektur mit sich bringt, robust gegenüber Störungen und kann sogar nicht konvexe Gebiete messen. Wegen der seriellen vorgehensweise kann man auch einen parallelisierten Ansatz verwenden. Das macht zwar eine Ausnahmebehandlung an den Grenzen der Teilgebiete notwendig, aber der Durchsatz sollte sich so auf bis zu 500 Millionen Bildpunkte pro Sekunde steigern lassen.

Da bereits heute Mustererkennungsmethoden in FPGAs realisiert sind, wird es in naher Zukunft auch möglich sein, die Bildmessgenauigkeit durch die Realisierung eines Template-Matchings zu erhöhen.

## 5 Literaturverzeichnis

LUHMANN (2000): Thomas Luhmann. *Nahbereichsphotogrammetrie: Grundlagen, Methoden und Anwendungen*. Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg, 2000.

MAAS (1992): H.-G. Maas. *Digitale Photogrammetrie in der dreidimensionalen Strömungsmesstechnik*. PhD thesis, ETH Zürich, Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, 1992.

MANDLER & OBERLÄNDER (1990): Eberhard Mandler und Matthias F. Oberländer. Ein single-pass Algorithmus für die schnelle Konturcodierung von Binärbildern. In R. E. Großkopf (Hrsg.), *Mustererkennung 1990*, Informatik Fachberichte 254, Seite 248–254. Deutsche Arbeitsgemeinschaft für Mustererkennung, Springer Heidelberg, September 1990.

OBERPAUL (2000): Oberpaul. Dynamische 3D-Photogrammetrie. *MessTec & Automation* 8 (1), 67, Januar 2000.

SHORTIS ET AL. (1995): M. R. Shortis, T. A. Clarke und S. Robson. Practical Testing of Precision and Accuracy of Target Image Centring Algorithms. *SPIE* 2598, 65–76, 1995.

# Die Shoemaker und Strangways-Krater: Zwei Impaktstrukturen in Australien in der GIS-gestützten Analyse von Fernerkundungs- und Geländedaten

HEIKO ZUMSPREKEL<sup>1</sup> & TORSTEN PRINZ<sup>2</sup>

*Zusammenfassung: Die Berücksichtigung von Fernerkundungsdaten in geologischen Informationssystemen (GIS) bietet für die Erkundung von terrestrischen Impaktstrukturen neuartige Möglichkeiten. Am Beispiel der komplexen proterozoischen Impaktkrater Shoemaker und Strangways wird gezeigt, dass die Einbindung multispektraler Landsat TM-Daten, Radardaten (ERS-2), geophysikalischer Daten (Aeromagnetik, Aeroradiometrie), Geländebefunden und bereits vorhandener geologischer Karteninformation in ein GIS raumbezogene Abfragen gestattet und z.T. Wissenslücken schließen kann. So lassen sich ursprüngliche Kraterdurchmesser und Erosionsniveaus für beide Strukturen besser abschätzen.*

## Einleitung

Kosmische Projektile, die mit Geschwindigkeiten von mehr als 11 km/sec auf die Erdoberfläche treffen, erzeugen bei ihrem Einschlag charakteristische Kratermorphologien. Die Durchmesser solcher Impaktkrater können wenige Hundert Meter bis Hunderte von Kilometern betragen (s. z.B. GRIEVE et al., 1995). Größere Impaktstrukturen zeigen im Unterschied zu einfach gebauten, schüsselförmigen Kratern einen zunehmend komplexeren tektonischen Bau mit einer strukturellen Hebung (central uplift, Zentralberg) und morphologischen Gliederung des Kraterinneren (Abb.1).

Die bei Impaktereignissen auftretenden Druck- und Temperaturbedingungen führen in Abhängigkeit von der Entfernung zum Einschlagspunkt zur Verdampfung, Aufschmelzung, Brekziierung bzw. bruchhaften Verformung der vom Impakt betroffenen Gesteine (Targetgesteine). Impaktereignisse lassen sich somit anhand einer schockmetamorphen Überprägung der Targetgesteine eindeutig von endogen entstandenen geologischen Ringformen (z.B. Vulkanbauten, Salzdiapiren) unterscheiden.

Heute sind über 160 Impaktstrukturen auf der Erde bekannt, wobei in den letzten Jahren durchschnittlich fünf Strukturen neu entdeckt wurden (GRIEVE, 1998). Bei der Suche nach irdischen Impaktstrukturen kommt der Fernerkundung eine sehr wichtige Bedeutung zu, da ringförmige geologische Anomalien, die auf einen möglichen Meteoriteneinschlag hinweisen, durch optische Sensordaten oder mittels geophysikalischer Daten identifiziert werden können. Um Fernerkundungsdaten mit den für den eindeutigen Nachweis eines Impaktes unbedingt erforderlichen Geländebeobachtungen und petrografischen Untersuchungen sowie mit zusätzlicher Geoinformation verknüpfen und weitergehend analysieren zu können, bietet sich die Nutzung von Geoinformationssystemen (GIS) an, welche die Integration unterschiedlicher raumbezogener Datentypen erlauben.

---

<sup>1</sup> Dipl. Geol. Heiko Zumsprekel, Geologisch-Paläontologisches Institut, Westfälische Wilhelms-Universität Münster, Corrensstr. 24, 48149 Münster, Tel.: 0251/83-33908, Fax: 0251/83-33933, email: zumspre@uni-muenster.de, <http://www.uni-muenster.de/GeoPalaeontologie/Geologie/Ferngis/Gis.html>

<sup>2</sup> Dr. Torsten Prinz, IVV Geowissenschaften, Westfälische Wilhelms-Universität Münster, Robert-Koch-Str. 26-28, 48149 Münster, Tel.: 0251/83-30015, Fax:0251/83-38352, email:prinz@uni-muenster.de, <http://ivvgeo.uni-muenster.de>

Auf dem australischen Kontinent sind aufgrund der geringen Deformation proterozischer Gesteine und der hohen tektonischen Stabilität Australiens während des Phanerozoikums viele alte Impaktstrukturen erhalten (s. SHOEMAKER & SHOEMAKER, 1996), die aufgrund ihres hohen Erosionsgrades einen Einblick in tiefer gelegene tektonische Stockwerke unterhalb des ursprünglichen Kratergrundes ermöglichen. Die nur spärlich entwickelte oder naturbelassene Vegetation im australischen Inland begünstigt zudem das Erkennen von ringförmigen Strukturen in Luft- und Satellitenbildern. Mit der Shoemaker-Struktur in Westaustralien und der Strangways-Struktur in Nordaustralien wurde an zwei ausgewählten komplexen Impaktstrukturen, die in ihrer Größe und ihrem tektonischem Bau vergleichbar sind, eine GIS-gestützte Analyse von Fernerkundungs- und Geländedaten durchgeführt.

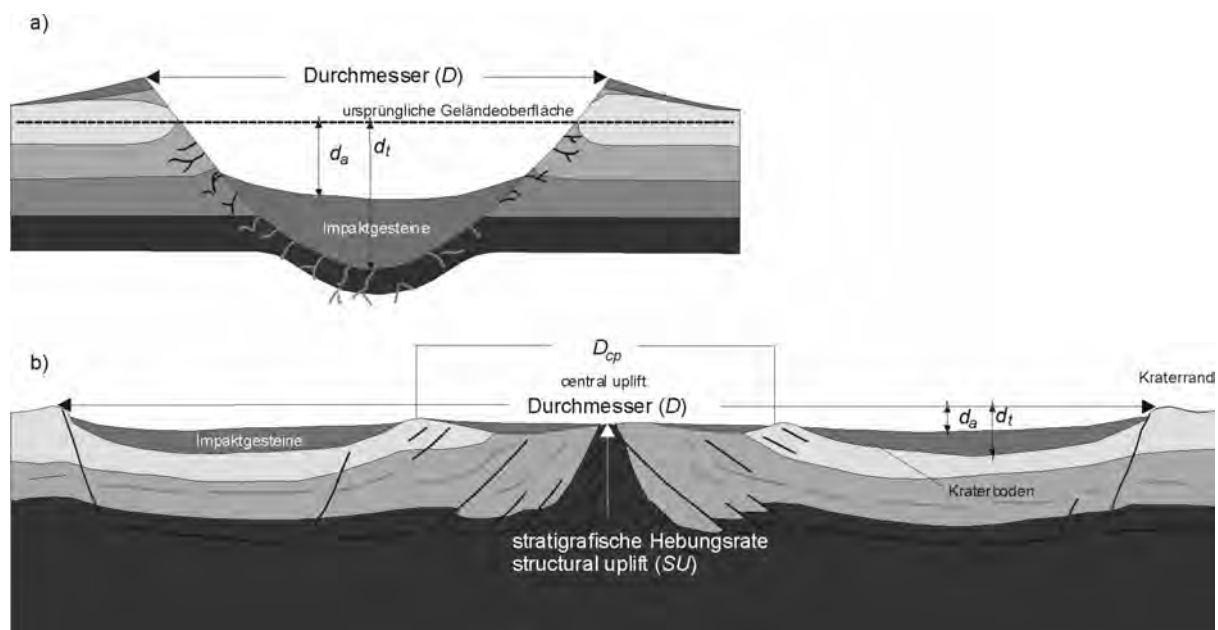


Abb. 1: Schematisches Profil durch eine einfache (a) und komplexe (b) Impaktstruktur mit morphometrischen Parametern ( $d_a$  = scheinbare Kratertiefe,  $d_t$  = wahre Kratertiefe,  $d_t - d_a$  = Mächtigkeit der Impaktschmelzdecke,  $D_{cp}$  = Durchmesser des central uplift).

## Impaktsignaturen im Gelände

### Shoemaker-Struktur

Die von BUNTING et al. (1980) auf ein Alter von ca. 1630 Ma datierte Shoemaker-Struktur (früher Teague Ring oder Teague Dome;  $25^{\circ}52' S$   $120^{\circ}53' E$ ) wurde zuerst von BUTLER (1974) als ein möglicher Impaktkrater beschrieben. Im Rahmen von flächendeckenden geologischen Kartierungen wurde die Struktur von BUNTING et al. (1982) und PIRAJNO (1999) im Maßstab 1 : 250 000 bzw. 1: 100 000 geologisch aufgenommen. Im Zuge ihrer Studien über proterozoische Impaktstrukturen Australiens wurde der Krater auch von SHOEMAKER & SHOEMAKER (1996) mehrfach im Gelände untersucht.

Der Impakt erfolgte in siliziklastische Sedimentgesteine der paläoproterozoischen (1700 - 1800 Ma) Earahedy Group und betraf auch das unterlagernde granitoide, archaische Basement. Der heutige Rand der Struktur ist in Luftbildern deutlich anhand des Ausstreichens von dunklen, eisenreichen Gesteinen der Frere-Formation (BIFs) und



klastischen Gesteinen der Yelma-Formation zu erkennen, die in Form einer ringförmigen Synklinale das aufgerichtete archaische Basement im Kraterzentrum umschließen (Abb. 2). Höhere Einheiten der Earaheedy Group (Wandiwarra Group und Princess Range Quartzite) sind nur im NW erhalten. Das heutige Erosionsniveau liegt unterhalb des ursprünglichen Kraterbodens, so dass der äußere Kraterrand und sämtliche Impaktgesteine (Schmelzen und Brekzien) nicht mehr erhalten sind. Schockmetamorphe Indikatoren sowohl makroskopischer wie mikroskopischer Ausbildung beschränken sich auf vereinzelte Vorkommen von Strahlenkegeln (shatter cones) und planaren Deformationslamellen (PDFs) in Quarzkristallen des granitoiden Basement. Große Teile des Kraters werden heute von jungen Salzseeablagerungen, Dünenbildungen und z.T. lateritischen Hartkrustenbildungen bedeckt.



Abb. 2: Landsat-TM-Bild (321 [rgb]) der Shoemaker-Impaktstruktur in Westaustralien. Schematisch angedeutet ist der Verlauf der ringförmigen Synklinale um den granitoiden Kern der Struktur (gestrichelte Linie).

## Strangways-Struktur

Die von SPRAY et al. (1999) auf 676 +/- 6 Ma datierte Strangways-Struktur im Northern Territory (15° 12' S 133° 35' E) wurde zuerst von GUPPY et al. (1971) als Impaktkrater identifiziert. Die detaillierteste geologische Aufnahme als Impaktstruktur stammt von SHOEMAKER & SHOEMAKER (1996), besitzt jedoch nur einen Übersichtscharakter (Abb. 3b). Das Targetmaterial besteht aus wenig deformierten Sedimentgesteinen der meso- bis neoproterozoischen Roper Group und dem unterlagernden granitischen Basement. Ähnlich wie bei dem Shoemaker-Krater werden die granitoiden Gesteine im Bereich der zentralen Aufwölbung kranzförmig von den klastischen Sedimentgesteinen der Roper Group umgeben, wobei mit zunehmender Entfernung vom Kraterzentrum stratigrafisch jüngere Einheiten austreichen. Das heutige Erosionsniveau liegt deutlich niedriger als bei der Shoemaker-Struktur, so dass N<sup>o</sup> des Zentrums lokale Reste der ehemals zusammenhängenden Decke aus Impaktschmelzgesteinen und -brekzien erhalten sind. Makroskopisch im Gestein ausgebildet finden sich shatter cones in den granitoiden Gesteinen des Basement sowie in den ältesten Sedimentgesteinen der Roper Group. Als weiterer mikroskopischer Indikator der Schockbeanspruchung treten in den Graniten und Gneisen zahlreiche planare Deformationslamellen in Quarzen auf (PDFs).

Der SW<sup>o</sup> Bereich der zentralen Erhebung wird von Kreidesandsteinen (Mullamen beds) diskordant überlagert, weite Bereiche des Kraterinneren und Kraterandes werden zudem von känozoischen Ablagerungen bedeckt. Im N wird die Strangways-Struktur von frühkambrischen Vulkaniten diskordant überlagert, die in weiten Teilen Nordaustraliens und in angrenzenden Bereichen Westaustraliens verbreitet sind (Antrim Plateau Volcanics).

## Impaktsignaturen in Fernerkundungsdaten

Für die Analyse beider Impaktstrukturen auf der Basis von Fernerkundungsdaten standen Landsat TM-Daten, Luftbildaufnahmen, Radardaten vom Typ ERS-2, geophysikalische Daten (Aeroradiometrie, Aeromagnetik) und Laser-Altmetriedaten zur Verfügung. Da über die Strangways-Struktur keine geeigneten digitalen Höhendaten vorlagen, wurde auf der Basis topografischer Karten im Maßstab 1 : 100 000 ein digitales Höhenmodell (DEM) generiert.

Nach der statistischen Analyse der Landsat TM-Daten wurden insbesondere Originalkanäle, Ratios und Hauptkomponenten zur Erstellung von Falschfarbkompositen herangezogen, die einen möglichst unkorrelierten, maximalen spektralen Informationsgehalt hinsichtlich der an der Oberfläche austreichenden Gesteinseinheiten aufweisen (zur Methodik vgl. ZUMSPREKEL & PRINZ, 2000). Im Falle der Shoemaker-Struktur ließen sich insbesondere durch eine Kombination der TM-Ratios 5/7, 5/4, 4/2, welche bereits von DAUTH (1997) zur Kartierung vergleichbarer (semi)arider Gebiete Westaustraliens erfolgreich angewendet wurde, Rückschlüsse auf das Austreichen von Impaktlithologien wie auch auf Regolithbildungen ziehen. Farbkompositen aus Hauptkomponenten höherer Ordnung, in denen spektrale Variationen zwischen Kanälen des VIS und NIR wiedergegeben werden, erwiesen sich in beiden Untersuchungsgebieten als besonders geeignet, um den Streichverlauf einzelner Gesteinseinheiten innerhalb proterozoischer Sedimentgesteine differenzieren zu können.

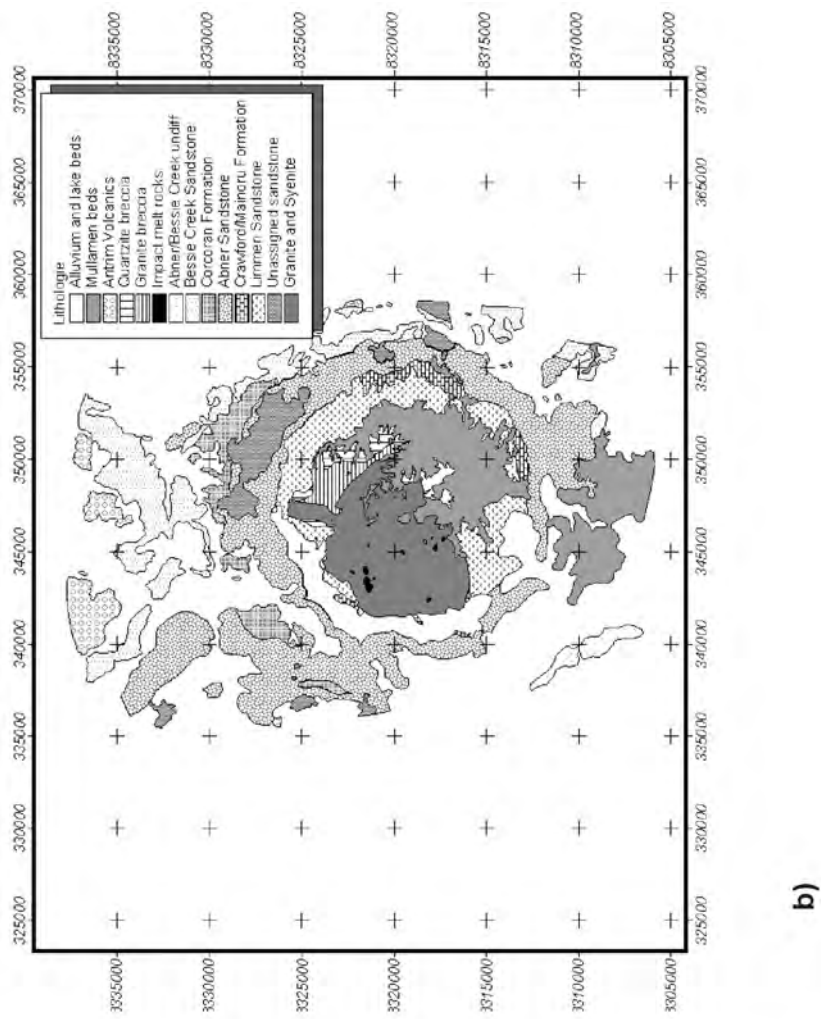
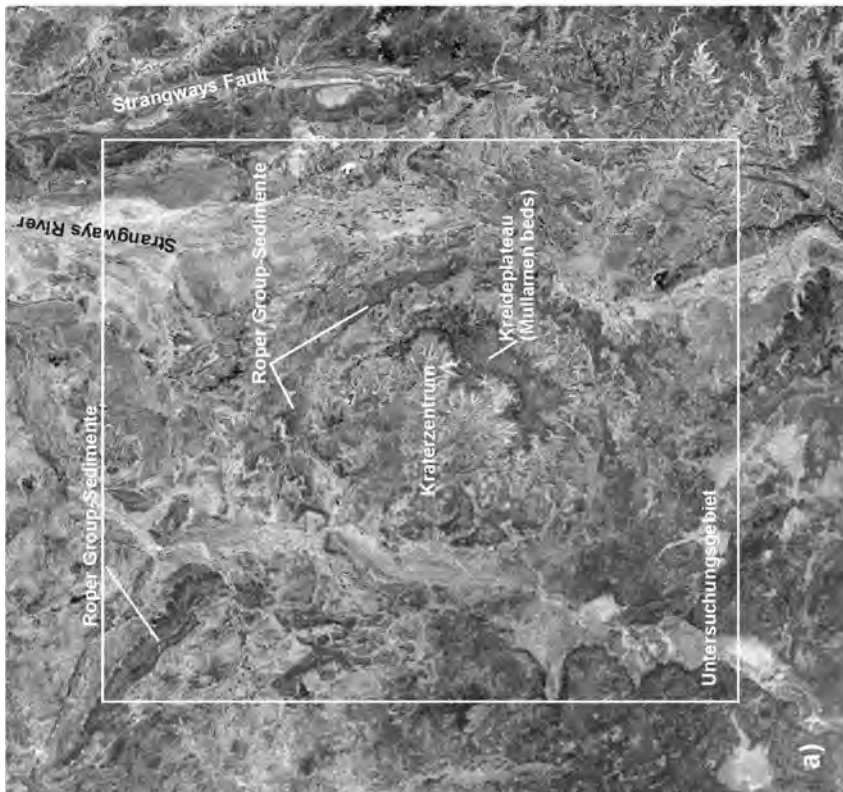


Abb. 3: (a) Landsat-TM-Bild (S/W-Bild der Hauptkomponenten 432 [rgb]) und (b) Geologische Übersichtskarte (modifiziert nach SHOEMAKER & SHOEMAKER, 1996) der Strangways-Impaktstruktur in Nordaustralien.

Im Falle der Strangways-Struktur ist aufgrund der höheren Vegetationsbedeckung eine Ableitung geologischer Information aus multispektralen Daten nur begrenzt möglich. Um die heutige morphotektonische Ausprägung der Kraterstruktur mittels Fernerkundungsdaten beurteilen zu können, wurden die zuvor aufbereiteten ERS-2-Radardaten in Kombination mit dem aus topografischen Karten abgeleiteten DEM in die Gesamtbetrachtung einbezogen (Abb.4). Die konzentrische Anordnung verwitterungsresistenter Sandsteineinheiten der Roper Group kann in 2,5-dimensionalen Betrachtung mit morphologischer Überhöhung deutlich visualisiert werden.

Informationen über die Beschaffenheit des tieferen Krateruntergrundes lassen sich aus den geophysikalischen Daten ableiten. Aeroradiometrische Daten, in denen gesteinspezifische K-, Th- und Uran-Konzentrationen aufgezeichnet sind, erlauben den direkten Rückschluss auf die Verteilung von kristallinem Basement im Bereich des central uplift anhand höherer Kalium-Gehalte. Zusätzlich dient die Betrachtung der aeromagnetischen Information einer Abschätzung kleinräumiger Variationen im Untergrund, wie z.B. basaltischer Gänge oder komplex verstellter Sandsteine im Kraterzentrum. Insgesamt zeichnet sich das Impaktzentrum durch ein ‚magnetisches Hoch‘ aus.

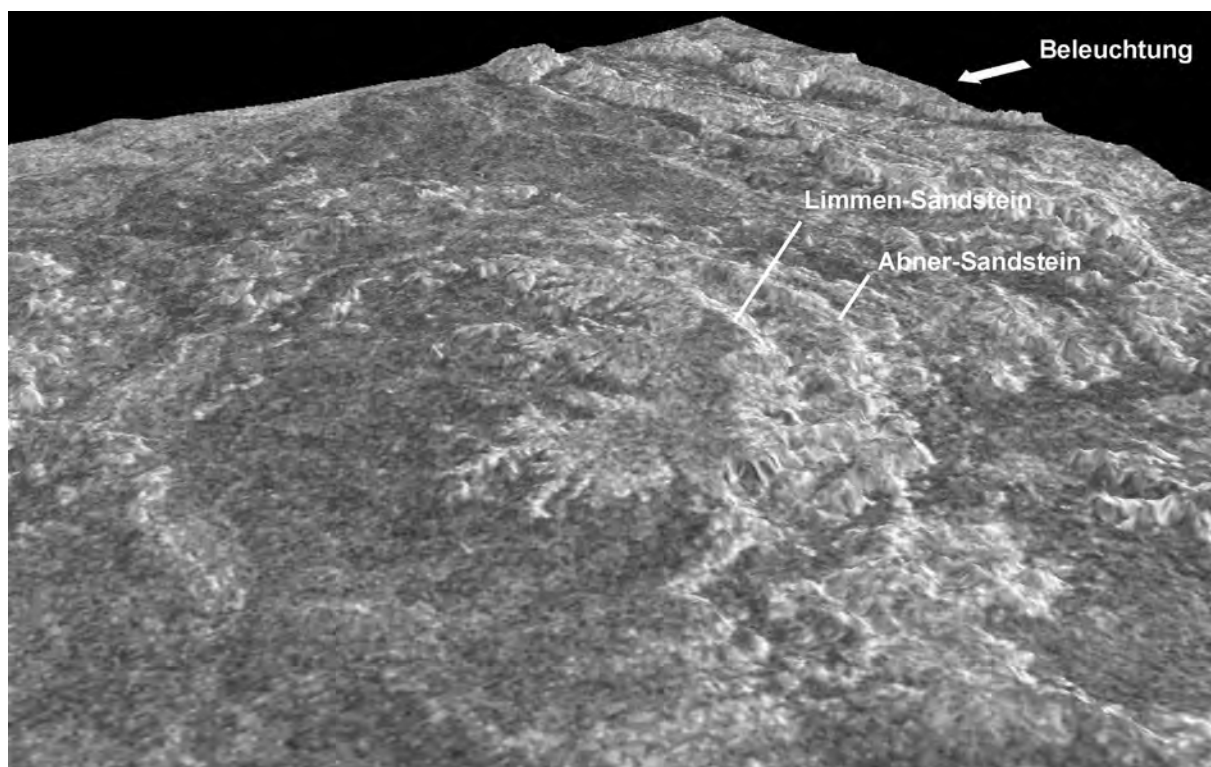


Abb. 4: Kombination aus DEM und ERS-2-Radardaten zur 2,5-D-Visualisierung der morphotektonischen Charakteristika des Strangways-Kraters. Die Beleuchtungsrichtung (Osten) beider Datensätze wurden aufeinander angepasst, wodurch z.B. die Lagerungsverhältnisse der verwitterungsresistenten Sandsteineinheiten im central uplift deutlich werden.

## Analyse im GIS

Aufgrund der Vielzahl indikativer Parameter in dem nahezu geschlossenen geologischen System Impaktkrater liegt ihre Auswertung in einem *Geologischen Informationssystem* (GIS) nahe. Wesentliches Element der Strukturen ist die typische konzentrische Abfolge impaktspezifischer Gesteinsformationen bzw. die impakttektonisch bedingte Verstellung des

Target. Hinzu kommen mineralogische Veränderungen der Gesteine im makro- und mikrokristallinen Bereich, wie z.B. die bereits oben beschriebenen PDFs. Bedingt durch das unterschiedliche Erosionsniveau lassen sich nicht alle typischen Elemente bei der heutigen Betrachtung beider Strukturen in ihrer ursprünglichen Ausdehnung untersuchen. Das geologische Informationssystem bietet nun die Möglichkeit, auftretende Lücken in der regionalen Verteilung eines einzelnen Impaktindikator mit der Komplementärinformation einer anderen Indikativgruppe nach dem Schichtenmodell zu schließen (Abb. 5). Viele wichtige geometrische Kraterparameter, wie z.B. die ursprüngliche Kratergröße, der Durchmesser und die Tiefe der Exkavationshohlform lassen sich durch die Betrachtung der räumlichen Verteilung dieser unterschiedlichen, aber doch voneinander abhängigen Indikatoren berechnen. So entspricht z.B. die Verbreitung von shatter cones nach FRENCH (1998) annähernd der Ausdehnung der ursprünglichen Kraterhohlform. Genauso lässt sich eine derartige Abschätzung aber auch über die stratigrafische Hebungsrates im Zentrum des Kraters ermitteln. Betrachtet man die Strangways-Struktur, finden sich die einzigen aufgeschlossenen shatter cones ausschließlich im N und NW des Kraterzentrums. Im S und SE können diese nicht zur Abschätzung der Geometrie der zentralen Aufwölbung herangezogen werden – hier muss die auf der Basis von multispektralen Fernerkundungsdaten ermittelte Verbreitung des Limmen-Sandsteins die Komplementärinformation liefern. Die synoptische Betrachtung wichtiger Impaktindikatoren kann Theorien und Berechnungen bzgl. seiner ehemaligen Dimensionen und Exkavationstiefe, seines energetischen Haushalts etc. stärken. So werden Kausalabfragen durch die Funktionalität des GIS unterstützt. Hinzu kommen alle Geländeinformationen als Sachdatensätze; ihnen folgen die Spektralmessungen aller wichtigen Gesteinsgruppen. Gerade das Zusammenspiel von GPS-eingemessenen Sachinformationen der Feldkartierung in repräsentativen Testarealen erlaubt ihre Kausalverknüpfung im GIS (Abb.6).

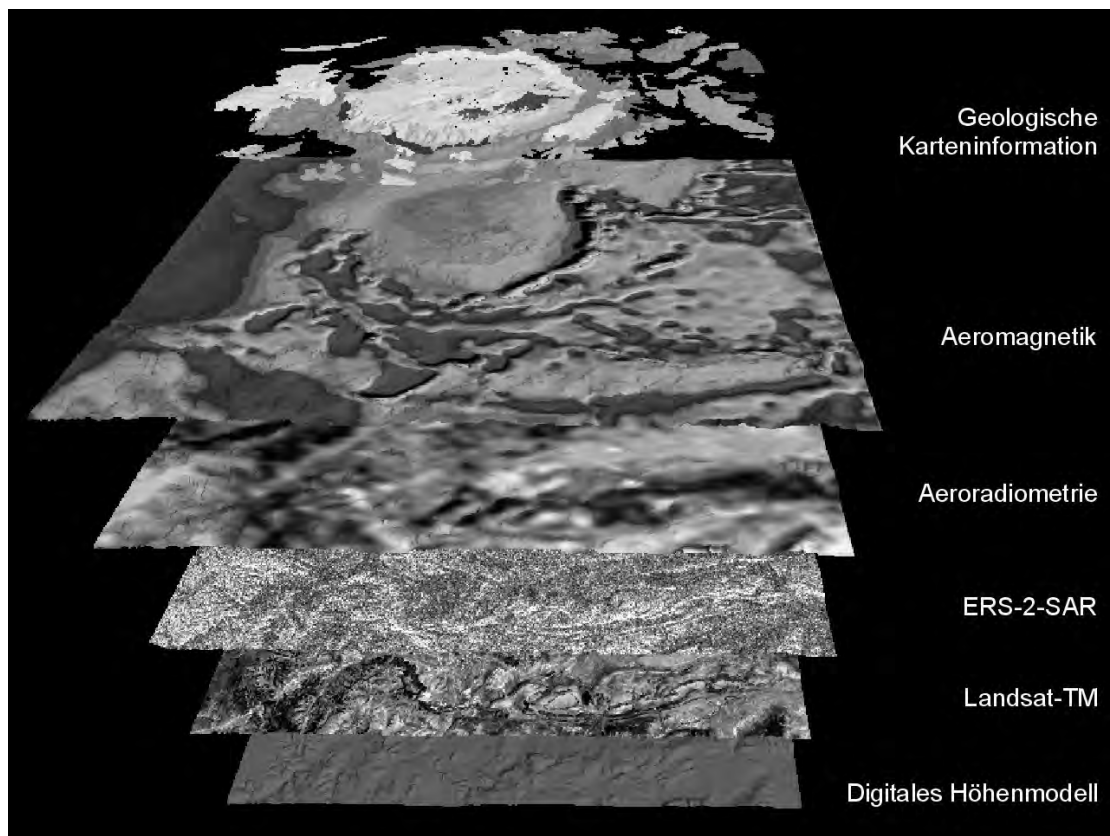


Abb. 5: Virtuelles Schichtenmodell im ‚Krater-GIS‘, basierend auf Fernerkundungsdaten und geophysikalischen Messungen am Beispiel der Strangways-Struktur.

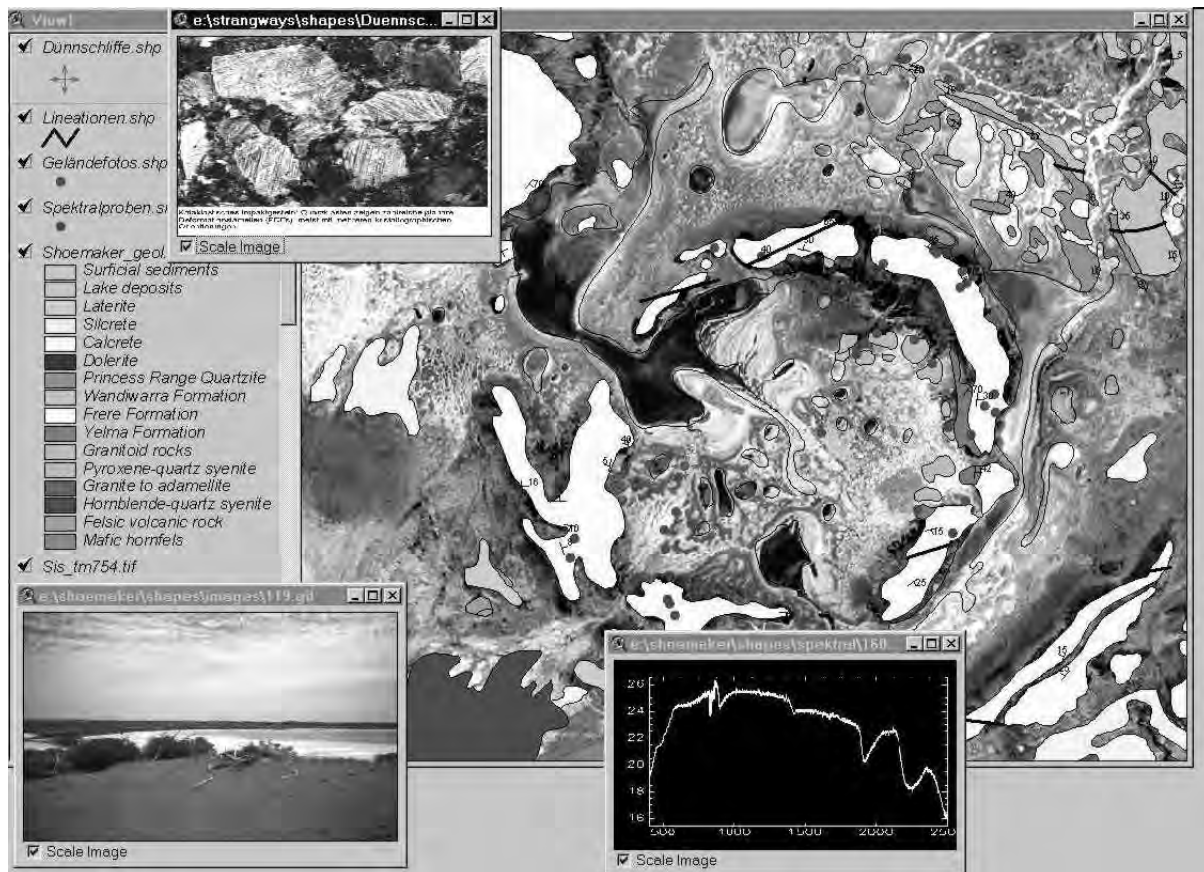


Abb. 6: Verknüpfung von geologischer Karteninformation, Fernerkundungsdaten, Geländebefunden und Labormessungen im ‚Krater-GIS‘ am Beispiel der Shoemaker-Struktur.

## Kratermorphometrie, Schlussfolgerungen und Ausblick

Anhand von eindeutig im GIS definierbaren Größenparametern der heute noch sichtbaren Strukturen können für die Impaktkrater Strangways und Shoemaker Rückschlüsse auf ihre ursprünglichen Dimensionen gezogen werden. Dieser als Kratermorphometrie bezeichnete Prozess basiert auf der empirischen Analyse an lunaren Impaktstrukturen, deren Morphologie besser erhalten ist (z.B. PIKE, 1977). Eine kongruente Übertragung der Morphometrie von lunaren auf terrestrische Impaktstrukturen ist nicht ohne weiteres möglich. So zeichnen sich z.B. einfache Krater auf dem Mond durch eine größere Kratertiefe im Vergleich zum Durchmesser aus als auf der Erde, was nach MELOSH (1989) auf die unterschiedlichen Gravitationskräfte zurückzuführen ist.

Die Ableitung von Gesetzmäßigkeiten nach rein morphologischen Parametern ist bei terrestrischen Impaktstrukturen aufgrund der fortgeschrittenen Erosion oftmals schwierig. An detailliert untersuchten komplexen Strukturen ergibt sich die Möglichkeit, die stratigrafische Hebungsrates (stratigraphic uplift, SU) im central uplift als zusätzliche Größendimension zu erfassen und mit den morphologischen Parametern in Bezug zu setzen (vgl. Abb. 1). Auf diese Weise können auch im Falle von erodierten Strukturen Aussagen über ihre ursprünglichen Dimensionen getroffen werden. In Messungen an terrestrischen Kratern, die seit längerem kontinuierlich fortgeführt werden (z.B. GRIEVE et al. 1981, GRIEVE & PESONEN 1992, GRIEVE & PILKINGTON 1996, GRIEVE 1998), stützt man sich derzeit auf die

stratigrafische Hebungsrates von 24 Impaktstrukturen zur Bestimmung des ursprünglichen Kraterdurchmessers. Anhand der von GRIEVE & PILKINGTON (1996) gezeigten Beziehung  $SU = 0,086 D_{final}^{1,03}$  lässt sich bei einer Mächtigkeit der Sedimentgesteine von 2500 m im Falle von Strangways ein ursprünglicher Mindestkraterdurchmesser von 26 km postulieren, was mit dem heute sichtbaren Kraterdurchmesser korreliert. Das heute angeschnittene Erosionsniveau des granitoiden Basement im Kern der Struktur ist jedoch unbekannt, deshalb kann der ursprüngliche Durchmesser u.U. deutlich größer sein. Eingeschränkt wird diese Aussage durch die regionalgeologische Strangways Fault im E der Struktur (Abb. 3a), die trotz ihres höheren Alters nicht durch das Impaktereignis beeinträchtigt worden ist und sich lediglich in 19 km vom Kraterzentrum befindet ( $D_{final} = \text{max. } 38 \text{ km}$ ).

Für die Shoemaker-Struktur weisen analoge Betrachtungen auf eine stratigrafische Hebungsrates von ca. 3-4 km und einen Mindestdurchmesser von ca. 40 km, obwohl die Zugehörigkeit einiger Gesteinsfolgen zur Zentralerhebung selbst noch ungeklärt sind. Aufgrund der tiefgreifenden Erosion ist noch unklar, ob die gesamte Struktur lediglich den Bereich des central uplift repräsentiert.

In der Gesamtschau aller verfügbaren Daten, insbesondere der Fernerkundungsdaten, ist es außerordentlich bemerkenswert, dass weite Teile beider Impaktstrukturen trotz ihres hohen Alters noch heute erhalten sind. Dies legt unmittelbar die Schlussfolgerung nahe, dass die Krater über längere Zeiträume der Erdgeschichte von jüngerer Ablagerung bedeckt wurden und somit vor Erosion geschützt waren. Für die Strangways-Struktur lässt sich durch die Vorkommen unbeeinträchtigter kambrischer Vulkanite belegen, dass der Krater bereits zu Beginn des Kambriums sein heutiges Erosionsniveau erreicht hatte. Der Zeitraum zwischen Kambrium und Jura ist geologisch nicht überliefert, seit dem Tertiär wird der Krater von den Sedimenten der Kreide erosiv ausgeräumt. Vergleichbares muss auch für die Shoemaker-Struktur angenommen werden; diese Vermutung kann jedoch aufgrund fehlender geologischer Überlieferung in Form jüngerer Ablagerungen nicht belegt werden.

Die oben aufgezeigten verschiedenartigen Untersuchungen belegen klar den hohen Stellenwert eines geologischen Informationssystems für das in sich geschlossene geologische Phänomen eines Impaktereignisses. Aufgrund der starken Erosionsanfälligkeit von terrestrischen Impaktstrukturen ist eine Lückenhaftigkeit in ihrer geologischen Aufnahme mittels Geländebefunden zwangsläufig. Ein übergreifendes geologisches Informationssystem bietet den Wissenschaftlern jedoch die Möglichkeit, interaktiv einen methodischen Schlüssel zur Interpretation dieser bedeutenden geologischen Erscheinungsformen zu erarbeiten und weiterzuführen. Hier ist insbesondere die Berücksichtigung unterschiedlicher, synoptischer Fernerkundungsdatensätze erforderlich, da eines der markantesten Charakteristika jedes Impaktkraters die konzentrische Abfolge lithologischer Einheiten an der Erdoberfläche ist. In Zukunft wird die dreidimensionale Visualisierung von kraterrelevanten Informationen innerhalb eines solchen Informationssystems an Bedeutung gewinnen.

## Dank

Die Autoren danken der Australian Geological Survey Organisation für die Bereitstellung der geophysikalischen Rohdaten und Laseraltimetrie-Daten. Den Besitzern der Eley Station (N.T.) und Cunyu Station (W.A.) sei für die Erlaubnis zur Durchführung der Geländearbeiten und für die logistische Unterstützung während dieser Zeit gedankt. Die Fernerkundungsabteilung der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe stellte für die spektralen Messungen dankenswerterweise ihr Laborspektrometer Lambda-9 zur Verfügung.

## Literatur

- BUNTING, J.A., BRAKEL, A.T. & COMMANDER, D.P., 1982: Nabberu, Western Australia. - 1:250 000 Geological Series map and explanatory note, Geological Survey of Western Australia, Perth.
- BUNTING, J.A., DE LAETER, J.R., & LIBBY, W.G., 1980: Evidence for the age and cryptoexplosive origin of the Teague Ring structure, Western Australia. - Geological Survey of Western Australia, Annual Report for 1980: 125-129.
- BUTLER, H., 1974: The Lake Teague ring structure, Western Australia: an astrobleme?. - Search **5**: 534-536.
- DAUTH, C., 1997: Airborne Magnetic, Radiometric and Satellite Imagery for Regolith Mapping in the Yilgarn Craton of Western Australia. - Exploration Geophysics, **28** : 199-203.
- FRENCH, B.M., 1998: Traces of Catastrophe: A Handbook of Shock-Metamorphic Effects in Terrestrial Meteorite Impact Structures. - 120 S., LPI Contribution. **954**, Lunar and Planetary Institute, Houston.
- GRIEVE, R.A.F., 1981: Constraints on the formation of ring impact structures, based on terrestrial data. - In: SCHULTZ, P.H.; MERRIL, R.B. (Hrsg.): Multi-Ring Basins: Formation and Evolution. - Proc. Lunar Sci. Conf. **12A**: 37-57, Pergamon Press, Houston.
- GRIEVE, R.A.F., 1998: Extraterrestrial impacts on earth: the evidence and the consequences. - in: GRADY, M.M., HUTCHISON, R., MCCALL, G.J.H., ROTHERY, D.A. (Hrsg.): Meteorites: Flux with Time and Impact Effects, Geological Society Special Publications **140**: 105-131, Cambridge University Press, London.
- GRIEVE, R.A.F.; PESONEN, L.J., 1992: The terrestrial impact cratering record. - Tectonophysics **216**: 1-30.
- GRIEVE, R.A.F.; PILKINGTON, M., 1996: The signature of terrestrial impacts. - in: A.Y. GLIKSON (Hrsg.): Australian Impact structures. - AGSO Journal **16** (4): 399-420, Australian Geological Survey Organisation, Canberra.
- GRIEVE, R.A.F., RUPERT, J., SMITH, J., THERRIAULT, A., 1995: The record of terrestrial impact cratering. - GSA Today, **189** (5): 194-196.
- GUPPY, D.J., BRETT, R., MILTON, D.J., 1971: Liverpool and Strangways Craters, Northern Territory: Two Structures of Probable Impact Origin. - Journal of Geophysical Research **76** (26): 5387-5393.
- MELOSH, H. J., 1989: Impact Cratering: A Geologic Process. - 245 S., Oxford Monographs on Geology and Geophysics. **11**, Oxford University Press, New York, Oxford.
- PIKE, R.J., 1977: Size dependence in the shape of fresh impact craters on the Moon. - In: RODDY, D.J., PEPIN, R.O. & MERRIL, R.B. (Hrsg.): Impact and Explosion Cratering: 489-509, Pergamon Press, New York.
- SHOEMAKER, E.M. & SHOEMAKER, C.S., 1996: The Proterozoic impact record of Australia. - in: A.Y. GLIKSON (Hrsg.): Australian Impact structures. - AGSO Journal **16** (4): 379-398, Australian Geological Survey Organisation, Canberra.



PIRAJNO, F., 1999: Nabberu, W.A. Sheet 3046. - Western Australia Geological Survey, 1: 100 000 Geological Series, Perth.

SPRAY, J.G., KELLEY, S.P., DENCE, M.R., 1999: The Strangways Impact Structure, Northern Territory, Australia: geological setting and laser probe  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  geochronology. - Earth and Planetary Science Letters **172**: 199-211.

ZUMSPREKEL, H. & PRINZ, T., 2000: Computer enhanced multispectral remote sensing data: a necessary tool for the geological mapping of Archean terrains in (semi)arid environments. - Computer and Geosciences **26**: 87-100.

## DHM25 Level2

Autor: Dr. Felix Arnet, Bundesamt für Landestopographie

Abstract für Themenbereich GIS

Das momentan genaueste verfügbare digitale Höhenmodell über die ganze Schweiz, das DHM25 des Bundesamtes für Landestopographie, besteht aus einem Basis- und einem Matrixmodell. Grundlage für das Basismodell bilden die digitalisierten Höheninformationen wie Höhenkurven und Höhenkoten der Landeskarte 1 : 25000. Anhand dieser Vektoren wurde auch ein Matrixmodell abgeleitet und ein erster vollständiger Datensatz konnte 1996 erreicht werden. Dieser wird heute mit DHM25 Level 1 bezeichnet.

Um die Genauigkeit in gebirgigen Kretenlagen zu verbessern, wurden zwischen 1994 und 1998 zusätzlich alpine Hauptbruchkanten fotogrammetrisch erfasst. Diese Linien sind jedoch kein Bestandteil des Basismodells von DHM25 Level 1 noch wurden sie für die Berechnung des Matrixmodells verwendet.

Die Integration dieser Bruchkanten in das DHM25 bildete die Hauptaufgabe zur Verbesserung des DHM25 auf den Level2. Dazu wurden in manueller Arbeit die Höhenkurven des Basismodells an die Bruchkanten angepasst. Weitere Arbeiten zur Erreichung des DHM25 Level2 für das Basismodell waren die Nachführung der Gletscherhöhenkurven, wo zum Teil grosse Änderungen aufgetreten sind, sowie zusätzliche Konsistenzprüfungen der Höhenkurven und Kotenpunkte.

Für das Berechnen des Matrixmodell von DHM25 Level2 wurde die Interpolationsart geändert. Für den Level1 wurde eine Methode verwendet, die entlang von 8 regelmässig verteilten Richtungen jeweils die Höhen anhand der Schnittpunkte mit den Höhenkurven interpolierte und die erhaltenen Werte gewichtet mittelte. Zur Berechnung des Matrixmodell von Level2 wurde aus dem Basismodell mittels Dreiecksvermaschung zunächst ein Oberflächenmodell erstellt. Dabei wurde grosses Augenmerk darauf gerichtet, dass Artefakte von flachen Dreiecken, die beim Triangulieren in Tälern und auf Kreten entstehen, bereinigt werden konnten und dass die hydrologischen und topografischen Eigenschaften des Geländes korrekt wiedergegeben werden. Das Matrixmodell wurde anschliessend durch lineare Interpolation innerhalb der Dreiecke des triangulierten irregulären Netzwerkes berechnet.

Mit dem nun vorliegenden Level2 konnte die Qualität des DHM25 deutlich gesteigert werden. Durch das Einführen von Bruchkanten im Gebirge konnten wesentliche Mängel in einem Gebiet behoben werden, wo es fraglich ist, ob in nächster Zeit flächendeckend ein genaueres Höhenmodell erstellt wird. Kurz- und mittelfristig bleibt das DHM25 damit das genaueste Höhenmodell, das einheitlich über die gesamte Schweiz verfügbar ist.

**Strike slip versus normal fault - remote sensing implications from Central Cuba.-  
Bauer, Ch. & K. P. Stanek (Freiberg):**

Technische Universität Bergakademie Freiberg, Geologisches Institut, Bernhard-von-Cotta-Str. 2,  
D-09596 Freiberg; Email: [bauer@orion.hrz.tu-freiberg.de](mailto:bauer@orion.hrz.tu-freiberg.de) | [stanek@orion.hrz.tu-freiberg.de](mailto:stanek@orion.hrz.tu-freiberg.de)

The Central Cuban suture zone has been subdivided by NE-trending faults. The bending of the fore arc fold and thrust belt as well as the Cretaceous island arc units could be interpreted by the combination of remote sensing and geophysical data. The reconstruction of the post-orogenic mid-Tertiary peneplain remains problematically. Spectral satellite data, interpretation of panchromatic airphotographs and surface data support the idea of the development of SE directed extensional structures.

**Digitale Fernerkundungsmethoden zur geologischen Kartierung - Warrawoona  
Synkline / Pilbara-Kraton, WA. -  
Beckmann, L. & L. Bischoff (Münster):**

Westfälische Wilhelms-Universität Münster, Geologisch-Paläontologisches Institut, Corrensstr. 24,  
D-48149 Münster, Email: [beckmal@uni-muenster.de](mailto:beckmal@uni-muenster.de) | [bischol@uni-muenster.de](mailto:bischol@uni-muenster.de)

Im Rahmen einer detaillierten Neukartierung des gesamten Pilbara-Kratons im NW Australiens durch den westaustralischen geologischen Dienst wurde die Warrawoona Synkline im östlichen Teil des Kratons geologisch neu erfasst. Die Genese und Interpretation dieser Struktur wird im Zusammenhang mit der Bildung von archaischen Granit-Grünsteingürteln kontrovers diskutiert.

Zur effizienteren Kartierung des Pilbara-Kratons kommt dem Einsatz von fernerkundlichen Methoden eine wichtige Rolle zu. Neben einer klassischen Luftbilddauswertung werden Satellitenbilddaten vom Typ Landsat TM und SPOT hinzugezogen.

Nach ihrer Aufbereitung und statistischen Betrachtung wurden die Landsat TM-Rohdaten zur Verbesserung der räumlichen Auflösung mit SPOT-Daten und Luftbildern verschnitten. Unterschiedliche Zusammenstellungen originaler Kanäle und weiterverarbeiteter Daten erlauben die Differenzierung unterschiedlicher Gesteinseinheiten im Untersuchungsraum. Zudem wurde auf der Basis einer topographische Karte ein digitales Höhenmodell der Region erstellt, das Zusammenhänge zwischen morphologischen Gegebenheiten und der Verbreitung von Lithologien und Störungzonen verdeutlicht.

Die aufbereiteten Datensätze ermöglichen, einen geologischen Überblick über den Bau der Warrawoona Synkline zu gewinnen. Solche Vorabkartierung bieten sich auch für zukünftig zu kartierende Gebiete des Pilbara-Kratons und vergleichbarer semi-arider Regionen in Westaustralien an.

# Landnutzungsklassifikation multitemporaler ETM-Daten unter Verwendung von Zusatzdaten

Ralf Donner, Dirk Müller  
Technische Universität Freiberg, Fakultät für Geowissenschaften<sup>1</sup>

## Zusammenfassung

Für verschiedenen ökosystemare Modellierungen werden von landwirtschaftlich genutzten Flächen Größe, Lage und Fruchtart der Schläge als Modellparameter benötigt. Die geforderte Lagegenauigkeit der Flächen liegt mit 15 m in der Größenordnung des Auflösungsvermögens des panchromatischen Kanals der Landsat 7-ETM-Daten. Um die notwendige Differenzierung der Fruchtarten zu erreichen, werden zwei multitemporale Datensätze dieses Fernerkundungssystems (3. Mai und 14. August 2000) analysiert. Der Schwerpunkt der Untersuchung liegt in der Berücksichtigung der verschiedenen, aus der Vergangenheit bereits bekannten Informationen. Beispielsweise unterliegen nur etwa 20 % der Schlaggrenzen einer jährlichen Änderung. Daneben wird u. a. versucht, das Wissen aus der wahrscheinlichen Fruchtfolge in die rechnergestützte Auswertung einzubeziehen. Da die Integration dieses zusätzlichen Wissens durch das sonst genutzte Bildverarbeitungsprogramm unzureichend unterstützt wird, werden Fuzzy-Logik-Programme für die Klassifizierung verwendet.

---

<sup>1</sup> Fakultät für Geowissenschaften Agricolastraße 1, DE-09599 Freiberg, E-Mail: [Ralf.Donner@mabb.tu-freiberg.de](mailto:Ralf.Donner@mabb.tu-freiberg.de); Telefon: 49 3731 392606, Fax: 49 3731 393601

# Geodäsie und Geoinformation an der Universität der Bundeswehr München

Egon Dorrer, München

## ABSTRACT

Die am 1. Oktober 1973 gegründete Universität der Bundeswehr München zählt zu den neun Hochschulen in Deutschland mit einem universitären Studiengang zur Ausbildung von Vermessungsingenieuren. In dem folgenden Beitrag wird versucht, das besondere Ausbildungskonzept dieser Universität vor dem Hintergrund ihrer Entwicklung darzulegen. Dies erscheint auch deshalb angebracht, weil im Zivilbereich immer noch Unklarheiten – wenn nicht sogar Ressentiments – über Ziel und Zweck dieser Bildungseinrichtung bestehen, obwohl sie heute in der Hochschullandschaft national wie international etabliert ist. Bestehend aus einem universitären Bereich und einem Fachhochschulbereich gleicht die Universität der Bundeswehr München einer Gesamthochschule.

Zusammen mit seinem Abschluss ist das in die Offiziersausbildung mit ihrer Gesamtdauer von maximal 12 Jahren chronologisch eingebundene Studium jenem an Landesuniversitäten gleichwertig. Die wesentlich kürzere, auf  $3\frac{1}{4}$  Jahre bemessene Regelstudienzeit bedingt jedoch eine Einteilung in Trimester statt Semester.

Neben dem eigentlichen Fachstudium stehen als Besonderheit des mit der Gründung der Universitäten der Bundeswehr verfolgten Reformkonzepts die erziehungs- (EA) und gesellschaftswissenschaftlichen (GA) Anteile des Studiums. Dieses "EGA-Begleitstudium" soll den besonderen Bedürfnissen der studierenden Offiziere nach Berufs- und Gesellschaftsbezug der akademischen Ausbildung zur Bewältigung pädagogischer und sozialer Anforderungen entgegenkommen.

Dem Grundsatz der „Einheit von Lehre und Forschung“ als essentielle Voraussetzung für ihren wissenschaftlichen Charakter wurde bei Gründung der Hochschule durch die Schaffung angemessener zentraler Forschungseinrichtungen, wie Bibliothek, Rechenzentrum, Medienzentrum, und dezentraler Labore Rechnung getragen. Da die Ausstattung mit Planstellen für wissenschaftliche Mitarbeiter dabei aber vorrangig die Lehraufgaben zu erfüllen hatte und seither kein weiterer personeller Ausbau stattfand, konnte eine Intensivierung der Forschung und die effiziente Ausschöpfung der dafür geschaffenen Infrastruktur erst mit einer Steigerung der eingeworbenen Mittel gelingen (Drittmittelforschung).

Die Studienplätze an der Universität der Bundeswehr München, an der heute etwas über 3000 Studenten studieren, sind für einen jährlichen Zuwachs von 775 Studienanfängern im universitären und 117 im Fachhochschulbereich ausgelegt, insgesamt also für 946. Für Geodäsie und Geoinformation ist die Planzahl auf 35 festgelegt. Bei einer Regelstudienzeit von  $3\frac{1}{4}$  Jahren ergeben sich so 3075 notwendige Studienplätze (Geo: 114).

Das Studium der Geodäsie und Geoinformation (so benannt ab 1.3.2000; vorher: Vermessungswesen) wird in einem eigenen Studiengang innerhalb der Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen angeboten, die sich aus zwölf Instituten zusammensetzt. Davon werden sieben zum Studiengang Bauingenieurwesen und Umwelttechnik, vier zu Geodäsie und Geoinformation und eines zu beiden gezählt. Im Zeitraum 1973–1998 haben 626 Studenten das Studium Vermessungswesen aufgenommen, im Durchschnitt pro Jahr also 24; erfolgreich abschließen konnten es bis 1993 nur 385 Studenten, so dass im Mittel pro Jahr 18 Diplome ausgehändigt wurden. Dies entspricht einer Erfolgsquote von 75%. Der mit dem Abschluss erhaltene *Dipl.-Ing.* ist dem entsprechenden Grad einer Landesuniversität formal gleichwertig.

Das Studium steht grundsätzlich Offizieren und Offiziersanwärtern aller Truppengattungen offen. Ein enger fachlicher Bezug besteht zu den Aufgaben des Militärgeographischen Dienstes. Für einen Teil der dort tätigen Offiziere ist dieses Studium obligatorisch. Die Artillerie hat ebenfalls einen großen Bedarf an den so ausgebildeten Offizieren. Aus diesem Bereich kommt die größte Zahl der Studierenden. Marine und Luftwaffe sind dagegen nur sehr schwach vertreten.

Das Studium zum Vermessungsingenieur ist in 9 Vorlesungstrimester plus einem Trimester für die Bearbeitung einer Diplomarbeit unterteilt. Mit 85 Trimesterwochenstunden (TWS) schließt das *Grundstudium* nach 4 Trimestern und bestandener Vordiplomprüfung ab. Der 97 TWS umfassende allgemeine Teil des *Hauptstudiums (Grundfachstudium)* macht den Studenten mit den eigentlichen, derzeit als relevant erachteten Fachgebieten des Vermessungswesens vertraut. Mit dem 38 TWS umfassenden *Vertiefungsstudium* in den letzten 3 Trimestern wird dem Studenten eine Spezialisierung ermöglicht. Er bestimmt dabei „seine“ Vertiefungsrichtung durch Wahl von zwei aus den vier Vertiefungsblöcken

- Allgemeine Geodäsie
- Erdmessung und Navigation
- Geoinformationssysteme, Planung und Bodenordnung
- Photogrammetrie, Kartographie und Fernerkundung.

Der äußerst enge Personalrahmen – begründet durch die relativ geringe Anzahl von Studenten in Geodäsie und Geoinformation – bürdet dem akademischen Personenkreis eine schwere Last in der Lehre und erhebliche Beschränkungen hinsichtlich Forschungsaktivitäten auf. Trotzdem – oder gerade deshalb – haben sich die meisten Professoren in beträchtlichem Umfang mit Forschungs- und Entwicklungsarbeiten engagiert, die durch Dritte gefördert werden. Zusätzlich zum „normalen“ Hochschulpersonal (11 Wiss. Mitarbeiter) werden gegenwärtig an die 40 Wissenschaftliche Mitarbeiter über Drittmittelforschung von aussen für befristete Zeit finanziert.

Neben weiteren Besonderheiten des akademischen Bereichs der Universität der Bundeswehr wird in dem Beitrag auch der Einsatz der Absolventen der Geodäsie und Geoinformation bei der Bundeswehr analysiert.

# **Die Anwendung geographischer und räumlicher Daten für humanitäre Hilfsgemeinschaften**

**Daniele Ehrlich**  
**Joint Research Centre, Ispra**

Abstract:

Naturkatastrophen und durch Menschen verursachte Krisen stehen zunehmend auf der Tagesordnung in der heutigen Zeit. Auch mit Beginn des neuen Jahrhunderts sind wir Zeugen bestehender, durch Menschen verursachter und nicht enden wollender Krisen, neuer Krisenherde in Ländern, deren Lage als stabil angesehen wurde, sowie Zeugen einer zunehmenden Anzahl von Naturkatastrophen und deren negativen Folgen für den Menschen. Zudem betreffen die meisten dieser Krisen Entwicklungsländer, die nicht über genügend Mittel verfügen, um effektive Massnahmen zu ergreifen, egal ob nun vor, während oder im Anschluss an eine Krisensituation.

Die Aufgabe internationaler Hilfe ist es, betroffenen Regierungen Ressourcen und technische Hilfsmittel, sowie „Know How“ zur Verfügung zu stellen, damit diese die Krisen besser bewältigen können. Diese Hilfe kann in 2 Phasen unterteilt werden:

- a) Humanitäre Hilfsmissionen unmittelbar im Anschluss an Krisen gefolgt von
- b) langfristigen, zukunftsorientierten Entwicklungsprogrammen mit dem Ziel die aktuellen Probleme in Krisengebieten zu entschärfen, die Wiedereingliederung von Volksgruppen voranzutreiben oder den Wiederaufbau der von Krisen geschüttelten Gebiete zu ermöglichen.

Digital gespeicherte, geographische Informationen spielen bei diesen Aufgaben eine wichtige Rolle und werden auf vielfache Art und Weise genutzt. Zum Beispiel beim Aufbau eines Krisen-Forums als Informationsmedium für Hilfsorganisationen, um einen präzisen Überblick zu (noch) bestehender Infrastruktur zu liefern, um Informationen zu visualisieren und um daraus Entwicklungsindikatoren zu generieren.

Die Einrichtung eines solchen Krisen-Forums zum Thema internationale Hilfe sollte auf geographischen Daten basieren und als Referenz-Datenbank fungieren. Diese enthielte die Informationen, welche Art von Projekten von welchen Gebern unterstützt werden und wie hoch die Zuwendungen in den einzelnen Projekten sind, ermöglichte aber auch die Visualisierung von Schlüsselfaktoren der Projekte in Karten und Statistiken.

Der Prototyp eines solchen Forums befindet sich im Moment in Entwicklung beim Space Applications Institute (SAI) der Gemeinsamen Forschungsstelle (GSF = JRC/Joint Research Centre) der Europäischen Kommission in Ispra/Italien . Dieses „Digital Map Archive (DMA)“ wurde von der „Preparedness Group“ des SSSA Units (SAI Institute) entwickelt und erfüllt



die Anforderungen, die in Zusammenarbeit mit dem European Commission Humanitarian Office (ECHO) aufgestellt wurden.

Um im Krisenfall schnell und effizient entscheiden zu können, benötigen Entscheidungsträger von Hilfsorganisationen möglichst aktuelle Informationen über die in Krisengebieten anzutreffenden Bedingungen. Diese Landschaftsinformationen umfassen die Infrastruktur der bestehenden Verkehrswege (Strassen, Schienennetz und Flughäfen), die Verteilung von Ansiedlungen aller Grössenordnungen, sowie land- und forstwirtschaftlich genutzter Gebiete.

Die Verbindung dieser Daten mit sozio-ökonomischen Informationen wie z.B. Einwohnerzahlen, Bevölkerungsdichte oder der Dichte des Netzes ärztlicher Versorgung, hilft den aktuellen Status der von einer Krise betroffenen Bevölkerung besser einzuschätzen. Dies erleichtert wiederum erforderliche Hilfsmassnahmen besser planen und steuern zu können.

Das „Digital Map Archive (DMA)“ adressiert genau diesen Aspekt der koordinierten, möglichst umfassenden Zusammenstellung von räumlichen Informationen und erlaubt interaktiven Zugriff auf diese Informationen über das Internet.

Die Internet Adresse des DMA lautet: <http://humanitarian-aid.sai.jrc.it/> !

Auch die Bereitstellung von Schadens-Abschätzungen oder Indikatoren über das Fortschreiten des Wiederaufbau in Krisengebieten basieren auf geographischen Komponenten. Internationale Organisationen wie World Bank, UNEP und UNHCR sowie Entwicklungshilfe-Organisationen wie GTZ oder die Kreditanstalt für Wiederaufbau werden sich in der Zukunft immer mehr auf den Wiederaufbau in Krisenregionen konzentrieren müssen. Dazu benötigen diese Institutionen Methoden und Werkzeuge, die ihnen erlauben den Erfolg ihres Langzeit-Engagements zu beobachten und zu messen. Hierbei sind Methoden, die auf Fernerkundung basieren, besonders wertvoll, wenn der Einfluss der Hilfsmassnahmen über grössere Gebiete hinweg beurteilt werden soll, da gerade sie es ermöglichen in kurzen Zeiträumen Informationen über weite Areale zu erheben. Allerdings bedarf es dafür aber auch sinnvoller räumlicher Indikatoren, die angewendet werden können, um den Einfluss von Wiederaufbaumassnahmen zu dokumentieren.

## **Geologische Interpretation des ERS-1 Radarmosaiks von Deutschland.- Franzke, H.-J. (Clausthal-Zellerfeld)<sup>1</sup> & H.-U. Wetz (Potsdam)<sup>2</sup>:**

<sup>1</sup>Technische Universität Clausthal, Institut für Geologie und Paläontologie, Leibnizstr. 10, D-D-38678 Clausthal-Zellerfeld; e-mail: [hans.joachim.franzke@tu-clausthal.de](mailto:hans.joachim.franzke@tu-clausthal.de)

<sup>2</sup>GeoForschungsZentrum Potsdam, Aufgabenbereich 1 Kinematik und Dynamik der Erde, Telegrafenberg, D-14473 Potsdam ; e-mail: [wetz@gfz-potsdam.de](mailto:wetz@gfz-potsdam.de)

Das Deutsche Fernerkundungsdatenzentrum (DFD) der DLR hat aus ERS-1-Daten der Jahre 1992 bis 1994 ein Radarmosaik von Deutschland zusammengestellt und mit digitalen Geländedaten in Höhenstufen von je 100 Metern verknüpft und synthetisch eingefärbt. Die bildliche Darstellung mit einer Grundauflösung von ca. 100 Metern wird von der DLR vertrieben und ist von uns als Grundlage verwendet worden, um lithostratigraphische und strukturelle Einheiten auf traditionelle Weise fernerkundlich zu kartieren (zu interpretieren).

Eine wesentliche Rolle als Interpretationshilfen spielten neben unserem geologischen Backgroundwissen über die Geologie Deutschlands vor allem die stark akzentuierten Reliefmerkmale und Texturmerkmale des Bildes, die eine Unterscheidung von gefaltetem Grundgebirge (Variscikum) und nicht gefaltetem, aber stark bruchtektonisch zerteiltem Deckgebirge ermöglichen. Darüber hinaus ist durch die Verknüpfung von Relief- und Texturmerkmalen auch eine innere Differenzierung in den Schichtfolgen des Deckgebirges, z. B. die Aufgliederung der Trias des Thüringer Beckens oder des Jura der Schwäbischen Alb, anhand von Leithorizonten durchführbar. Im variscischen Unterbau dominieren ebenfalls die morphologisch akzentuierten Bruchstrukturen, während die Gefügeformen des Kristallins und des Schiefergebirges (Foliation bzw. Schieferung, Sattel- und Muldenstrukturen, plutonische Körper) nur ansatzweise erkennbar sind. In größeren Ausstrichbereichen des variscischen Unterbaues, vor allem im Rheinischen Schiefergebirge und im Thüringisch-Vogtländischen Schiefergebirge, ist der Verlauf der Schichtfolgen besser kartierbar. Die gewählten Höhengschritte von 100 Metern führten leider dazu, daß wenig reliefierte Gebiete wie das Innere des Oberrheingrabens bis zur Wetterau, die Niederrheinische Bucht, die Leipziger Tieflandsbucht, das Münsterländer Kreidebecken und die große Fläche des Norddeutschen Tieflandes wie „gespiegelt“ wirken und nur sehr generalisiert innere Differenzierungen erkennbar werden.

Die Abgrenzung der alpinen Deformationsfront (Überschiebungen, gefaltete Molasse) gegen die ungefaltete Molasse des Bayerischen Molassebeckens ist in großer Detailgenauigkeit erfolgt. Die schwäbische Schichtstufenlandschaft nördlich und östlich des Schwarzwaldes (Trias und Jura) und die daran ansetzende bumerangartige Form des Schwäbischen Jura mit dem Ries und dem anschließenden Fränkischen Jura lassen sich durch die ausgeprägte morphologische Gliederung in der Genauigkeit einer geologischen Übersichtskarte auskartieren. Im Kristallin des Schwarzwaldes, des Odenwaldes, des Spessart und des ostbayerischen Kristallins sowie des sächsischen Erzgebirges dominieren Bruchstrukturen das Bild. Ihre Verfolgung über das Deckgebirge der Süddeutschen Scholle hinweg erweitert unsere Kenntnisse über regionale Bruchzusammenhänge im Süddeutschen Raum. So setzt sich zum Beispiel die Elztalstörung des Schwarzwaldes (SW-NE) über das Schwäbische Lineament an der NW-Flanke des Schwäbischen Jura fort und vergittert sich dann mit den WNW-ESE-Brüchen am Westrande des ostbayerischen Kristallins (Donaurandbruch, Fränkische Linie). Im mitteldeutschen Raum sind NW-SE-Bruchzonen zwischen Fränkischer Linie und Elbelinie in großräumigen Zusammenhängen überschaubar und die Fortsetzung dieser Strukturen über die Hessische Senke (SSW-NNE) hinweg in das Niedersächsische Tektogen (u. a. Osning, Teutoburger Wald) ist mit Sicherheit gegeben.

Frei, M. (München)<sup>1</sup> & Crouvi, O. (Jerusalem)<sup>2</sup>

## **Rauhigkeitsuntersuchungen zur geologischen Analyse von Radardaten am Beispiel Timna /Israel.-**

<sup>1</sup>Universität München, Institut für Allgemeine und Angewandte Geologie, Arbeitsgruppe Fernerkundung, Luisenstr. 37, D-80333 München; email: [michaela.frei@iaag.geo.uni-muenchen.de](mailto:michaela.frei@iaag.geo.uni-muenchen.de)

<sup>2</sup>Hebrew University, Institute of Earth Sciences  
Jerusalem, Israel, email: [crouvi@vms.huji.ac.il](mailto:crouvi@vms.huji.ac.il)

Das Gebiet von Timna in der Negev Wüste /Israel wurde ausgewählt um die Aussagekraft von Radardaten für die Differenzierbarkeit von Gesteinseinheiten und alluvialen Fächern zu bewerten. Die physikalischen Oberflächenparameter, die das Radarrückstreusignal kontrollieren werden durch die spektrale Information aus Hyperspektraldaten ergänzt. Die Region um den Berg Timna ist durch kambrische Sandsteine, Karbonate und alluviale Fächer aus dem Pleistozän und Holozän charakterisiert und durch die Lage am Westrand der Störungszone des Dead Sea Rift tektonisch bedeutsam. Der Berg Timna selbst wird durch Magmatite unterschiedlichen Chemismus und zahllose Gänge geprägt. Das gesamte Gebiet ist kartiert, die Kartierung erfolgte im Hinblick auf die Fernerkundungsrelevanz der erhobenen Geländeparameter. Detailuntersuchungen zur Klassifikation der Lithologie, Mineralogie, Stratigraphie, Korngrößenverteilung, Oberflächenrauhigkeit und den Verwitterungszustand wurden durchgeführt.

Es wurden Geländemessungen zur Erfassung der Oberflächenrauhigkeit erhoben. Die stereoskopischen Bilder werden als Basis für Höhenmodelle der Einzelflächen herangezogen und die Standardabweichung (RMS) der Höhe wird berechnet. Die RMS ist der Parameter der Oberflächenrauhigkeit und kann mit dem Radarrückstreuquerschnitt korreliert werden.

Das SIR-C Sensorsystem bietet die einmalige Möglichkeit multifrequente und multipolarisierte Daten zu analysieren. Die Sensibilität der unterschiedlichen Wellenlängen im X-, C- und L-Band variiert in Abhängigkeit vom Einfallswinkel von 0,13 - 27 cm absoluter RMS. Die berechneten RMS Werte reichen von 0,25 bis 7, dies entspricht einer glatten Oberfläche mit Korngrößen von einigen mm und einer grobkörnigen Oberfläche mit Blöcken von bis zu 50 cm. Die Oberflächenrauhigkeiten sind die Grundlage für die überwachte Klassifizierung der Radardaten und deren Korrelation mit den lithologischen Einheiten.

**Titel:** Bereitstellung eines Digitalen Geländemodells für den Hochwasserschutz an der Oder

**Autoren:** Meike Girk, Landesumweltamt Brandenburg (LUA)  
Eckhardt Seyfert, Landesvermessungsamt Brandenburg (LVermA)

### **Zusammenfassung:**

Während des Hochwassers an der Oder im Sommer 1997 war neben vielen anderen Einsatzkräften auch das Landesvermessungsamt Brandenburg aktiv beteiligt. Zur Orientierung der Einsatzkräfte, zur Dokumentation der Ereignisse, zur vorsorgenden Sicherung der Deiche und zur vorbereitenden Planung von eventuell einzuleitenden Evakuierungen wurden ständig aktuelle Luftbildmaterialien, Kartenunterlagen und Höheninformationen über das Flussgebiet und das von Überschwemmungen gefährdete Deichhinterland benötigt.

Schon kurz nach den Hochwasserereignissen entstanden erste Ideen, zur Vorhersage solcher Naturkatastrophen und zur Bewältigung des Katastrophenmanagements zukünftig digitale Daten einzusetzen. Aus diesem Grunde haben das LUA, das LVermA und die BfG das gemeinsame Projekt einer Laserscannerbefliegung zum Aufbau eines DGM an der Oder initiiert.

Im Beitrag werden auf die gemeinsame Koordinierung, Planung und Finanzierung des Projektes eingegangen und die Abstimmungen mit den polnischen Fachkollegen kurz angerissen.

In einem kurzen Abschnitt werden die Anforderungen an die Datengenauigkeit, die Datendichte, das geodätische Bezugssystem und die Datenaufbereitung formuliert.

Weiterhin können Aussagen zur Genauigkeitskontrolle der Laserdaten innerhalb vorgegebener Flächen und zur Genauigkeit des Laserscannerverfahrens bei der Erfassung von Höhendaten im Bereich der Bühnen gemacht werden.

Über den Einsatz der Daten in weiteren Projekten und die Einbindung in einem grenzübergreifenden polnisch-deutschen Informationssystem zum Hochwasserschutz wird abschließend berichtet.

**Neue Methoden zur Bestimmung von Bodenoberflächen- und Vegetationsparametern  
entwickelt aus polarimetrischen und interferometrischen E-SAR Daten  
I. Hajsek, K. P. Papathanassiou, R. Horn, R. Scheiber & A. Moreira (DLR)**

Die bereits etablierten Konstellationen der Polarimetrie und Interferometrie in der Radarfernerkundung bilden ein vielseitiges Instrumentarium zur Erfassung des Natur und Kulturräumens. In dieser Arbeit werden neue Methoden zur Bestimmung von Bodenoberflächenparametern, volumetrische Bodenfeuchte und Oberflächenrauigkeit, sowie von Vegetationsparametern, Vegetationshöhen vorgestellt. Die entwickelten Methoden werden am Beispiel des flugzeuggetragenen E-SAR System der DLR, Institut für Hochfrequenztechnik und Radarsysteme, und den simultan aufgenommenen Geländedaten qualitative und quantitative nach ihrer Genauigkeit bewertet.

**Fernerkundung des Bodenseelitorals  
Thomas Heege, Andreas Albert, Anke Bogner**

**Thomas Heege  
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt  
Oberpfaffenhofen  
D-82234 Wessling  
Germany**

**E-Mail: [thomas.heege@dlr.de](mailto:thomas.heege@dlr.de)  
Tel.: +49-8153 - 28 2716  
Fax.: +49-8153 - 28 1444**

Abstract: Zustandsinformationen von Ufer- und Flachwasserbereichen können wesentlich zum Gesamtverständnis von Binnengewässern beitragen. So dienen Informationen über die Verteilung der submersen Makrophytenvegetation als Indikatoren zur Beurteilung regionaler Unterschiede in der Nährstoffbelastung von Uferbereichen.

Flächendeckende und räumlich aufgelöste Informationen können durch Fernerkundungsaufnahmen mit Multi- oder Hyperspektralsensoren gewonnen werden.

Automatisierbare Verfahren zur Ableitung von Wasserinhaltsstoffen aus diesen Daten sowie die Bestimmung prinzipieller Grenzen der Ableitbarkeit in Flachwasserbereichen lassen sich nur in physikalisch basierten Lösungsansätzen erreichen. Für die Klassifizierung von sub- und emersen Makrophyten bringt eine Kopplung mit dem physikalisch basierten Atmosphärenkorrektur- und Inversionsverfahren MIP (modular inversion program) ebenfalls deutliche Vorteile.

Als Anwendungsbeispiele werden aktuelle Arbeiten aus dem Fernerkundungsteilprojekt im Sonderforschungsbereich 454 "Bodenseelitoral" vorgestellt.

Flugzeuggestützte Aufnahmen mit Multi- und Hyperspektralsensoren des DLR liefern die Datengrundlage der berechneten Verteilungskarten von Wasserinhaltsstoffen sowie litoralen Über- und Unterwasserpflanzenbeständen.

## **SWISSIMAGE – Das neue flächendeckende Farbborthofoto der L+T**

Autoren: Christoph Käser, Dr. André Streilein, Thomas Czaka, Martin Roggli, Bundesamt für Landestopographie

Abstract für Themenbereich GIS

Mit der Anschaffung des Digitalen Photogrammetrischen Systemes (DPS), bestehend aus einem Rollfilmscanner sowie der Software für Automatische Aerotriangulation, Geländemodellberechnung, Orthophotoherstellung und eines digitalen Stereoplotter wurde 1996 am Bundesamt für Landestopographie (L+T) der Schritt in die Digitalen Photogrammetrie vollzogen.

Die erste grössere Anwendung wurde 1998 mit dem Projekt SWISSIMAGE zur Erstellung eines flächendeckenden Farbborthofotos in Angriff genommen. Die Farbbildflüge im Bildmasstab 1:30'000 erfolgten in den Jahren 1998, 1999 und 2000 während der Vegetationszeit. Die Luftbilder wurden direkt ab Rolle am SCAI-Scanner und PHODIS-SC von Zeiss gescannt und in einem zentralen Datenspeicher (Bandroboter) archiviert. Die Aerotriangulation (AT) erfolgt in Blöcken zu 200 – 400 Bildern mit einem mittleren Fehler von 1.0m in der Lage und 1.5m in der Höhe mit Match-AT von inpho. Für die grafische Qualitätskontrolle der AT wurde ein eigenes Programm (VISAT) in Visual Basic entwickelt. Als Geländemodell wird sofern vorhanden das neue DTM-AV mit einer Genauigkeit von 0.5m in der Höhe verwendet, ansonsten das DHM25 Level2 (mit Neuinterpolation mit photogrammetrischen Bruchkanten). Die Orthofotoberechnung erfolgt mit SocetSet von LH Systems und die Bildmosaikierung mit OrthoVista von StellaCore. Um die gewünschte Bildqualität zu erreichen wird eine manuelle Bildbearbeitung mit Photoshop durchgeführt. Für die Orthofotoverwaltung und –auslieferung wird im Projekt RAHDIS zusammen mit den Höhendaten eine neue Lösung gesucht.

Um ein effizientes Arbeiten in dieser heterogenen Systemumgebung zu ermöglichen, wurden die verschiedenen Arbeitsprozesse optimal aufeinander abgestimmt und so stark wie möglich automatisiert mit Eigenentwicklungen. Dazu gehören eine photogrammetrische Metadatenbank und Scriptprogramme zur AT-Blockvorbereitung und Orthofotoberechnung sowie VISAT.

Die resultierende Lagegenauigkeit (mittlerer Fehler) von SWISSIMAGE beträgt mit dem DTM-AV 1.0m und mit dem DHM25 Level2 2.5 – 10m (Mittelland – Gebirge).

Der Datenvertrieb erfolgt über die gleichen Stellen wie bei den übrigen Geodaten der L+T. Dazu wird auch stark mit Wiederverkäufern und Value Adding Resellern (VAR) zusammengearbeitet.

Mit dem flächendeckenden Farbborthofoto SWISSIMAGE wird die Produktpalette der L+T mit einem informativen und aktuellen Bilddatensatz abgerundet, der sich einfach mit den bestehenden Geodaten der L+T (Pixelkarten, VECTOR25, DHM25, etc) kombinieren lässt.

# ***Estimation of vegetation parameters from multispectral remote sensing data using radiation transfer models***

Franz Kurz and Olaf Hellwich  
Chair for Photogrammetry and Remote Sensing, Technical University München  
Arcisstraße 21, 80290 München  
Tel: 089/28922676  
Fax: 089/2809573  
E-Mail: franz.kurz@bv.tum.de

## **Abstract:**

We propose a general framework to set up a method to estimate vegetation parameters from multispectral remote sensing data using radiation transfer model and a moderate amount of ground control data. This framework is exemplarily demonstrated for winter wheat fields imaged by the Daedalus multispectral scanner using the SAIL+PROSPECT model as physical model for leaves combined to a canopy layer. The vegetation parameters estimated with help of the devised method are used to derive information about soil heterogeneities, which are important for precision farming.

The purpose of the approach is to estimate a set of important vegetation parameters which are input of the SAIL+PROSPECT model: specific dry matter, specific water content, chlorophyll content and leaf area index. Other input parameters are suggested to be constant inside of agricultural fields and are, therefore, of minor interest.

In order to estimate this set of vegetation parameters the SAIL+PROSPECT model has to be inverted. The inversion of the SAIL+PROSPECT model is conducted by simulated annealing followed by least-squares adjustment.

To be able to utilise the major advantage of empirical models which is the possibility of individually fitting the SAIL+PROSPECT model to local characteristics and sensor specifics we plan to use a small number of ground control points in the suggested approach. The ground control points provide a means to adjust the theoretical grey values being a function of vegetation and imaging parameters to the grey values actually occurring at the investigated site using simple parameters such as offset and scale.

In order to be able to validate the model with real data it was tried to measure as many model parameters as possible directly, i.e. as ground truthing data. For a 2 ha test field with winter wheat this was done in a dense grid providing a framework to derive a strategy for the use of control points. Daedalus multispectral scanner data operating in 11 spectral bands and ground truthing data were acquired on 28 June 2000.



## **Titel: Neue Hyperspektrale Fernerkundungssysteme**

**Andreas Mueller (DLR)**  
**Hermann Kaufmann (GFZ)**  
**Joachim Hill (Univ. Trier)**

Das DLR zusammen mit dem GFZ-Potsdam führen seit mehr als 10 Jahren gemeinsame Forschungsprojekte im Bereich spektral hochauflösender optischer Fernerkundung durch. In den vergangenen Jahren wurden dazu vorrangig das DLR-eigenen Bildspektrometer DAIS 7915 eingesetzt. Beide Institutionen haben eine gemeinsame Initiative gestartet, einen neuen flugzeuggetragenen Hyperspektralsensor als Nachfolger für DAIS 7915 zu beschaffen. Dieses Instrument wird neben einer weiteren spektralen Abdeckung und engeren Spektralbändern eine deutlich erhöhte radiometrische Auflösung und Stabilität aufweisen. Damit können der europäischen Forschergemeinschaft Daten neuer Qualität für ein breites Anwendungsspektrum zur Verfügung gestellt werden. Parallel zu den Flugzeugaktivitäten sind Projektanträge in Vorbereitung, die eine hyperspektrale Weltraummission zum Ziel haben. In der Präsentation wird die technische Auslegung beider Instrumente vorgestellt.

## Abstract

### **d i l a s (Digital Landscape Server) – Eine Servertechnologie für die webbasierte Verwaltung und Visualisierung beliebig grosser, hochaufgelöster virtueller Landschafts- und Stadtmodelle**

Prof. Dr. Stephan Nebiker

FHBB Fachhochschule beider Basel

Gründenstrasse 40

CH-4132 Muttenz

s.nebiker@fhbb.ch

Mit dem Aufbau städtischer, regionaler und sogar nationaler 3D-Landschaftsmodelle wird deren effiziente Verwaltung, Verbreitung und Visualisierung zu einer grossen Herausforderung. Die Anforderungen an eine solche Verwaltungslösung sind vielschichtig und anspruchsvoll zugleich. Sie umfassen unter anderem die kombinierte Verwaltung vieler komplexer (3D-) Vektorobjekte mit sehr grossen Rasterobjekten, die Integration von 2D- und 3D-Daten, die anspruchsvolle Unterstützung von Mehrfachauflösung und Mehrfachrepräsentation, effiziente räumliche Zugriffsstrukturen, eine enge Kooperation mit 3D-Visualisierungslösungen und selbstverständlich die Internetfähigkeit.

Bisherige Lösungsansätze, welche nur Teilaspekte zu befriedigen vermögen, können in zwei Kategorien unterteilt werden: GIS-orientierte Ansätze mit einer topologisch strengen Modellierung und einer üblicherweise relationalen Speicherung. Diese sind sehr aufwändig, wenig flexibel und weisen, bedingt durch den erforderlichen Objektrekonstruktionsprozess, eine schlechte Skalierbarkeit auf. Demgegenüber stehen grafikorientierte, filebasierte Ansätze (z.B. auf VRML-Basis) mit einer weitgehend fehlenden GIS-Funktionalität.

Das Lösungskonzept von dilas baut auf bewährter Datenbanktechnologie auf und ergänzt diese durch objektorientierte Datenbank- und Programmierkonzepte sowie neue Internet- und Geodatenstandards. Zu den unterstützten Datentypen gehören Rasterbilder, Geländemodelle, 3D- und 2D-Geoobjekte, Objekttexturen, Szenenobjekte, Animationen und Hyperlinks. Bei der Modellierung der verschiedenen Objekttypen kommen relationale und objektorientierte Ansätze sowie XML zum Einsatz. Letzterer wird vor allem für die Modellierung und Verwaltung von 3D-Objekten (X3D) und 2D-Objekten (GML und INTERLIS-2) eingesetzt. Der Einsatz von XML erlaubt dabei eine sehr flexible, ausbaufähige Modellierung und Speicherung. Für die Speicherung der Raster-, DHM- und XML-Objekte werden BLOBs (binary large objects) in Kombination mit effizienten Indizierungsverfahren verwendet. Bei der Konzeption von dilas wurde von Beginn weg auf eine optimale Verteilbarkeit von Applikation, Daten und Rechenlast geachtet, um im Intranet und Internet einen optimalen Einsatz zu gewährleisten. Hierbei flossen wichtige Erfahrungen aus dem Vorgängerprojekt und dem mittlerweile kommerzialisierten Geobildatenserver GRIDS ein.

Die Machbarkeit des dilas-Konzepts wurde im Rahmen einer Diplomarbeit nachgewiesen. Das dabei entwickelte Prototypsystem ermöglicht eine datenbankgestützte Verwaltung von 3D-Stadtmodellen auf XML-Basis. Es unterstützt räumliche und thematische Selektionen sowie die 'on-the-fly'-Generierung von 3D-Szenen, wahlweise in VRML oder im Nachfolgestandard X3D. Die erzielten kurzen Antwortzeiten zeigen das Potential des XML-basierten Lösungsansatzes deutlich auf.

Das dilas-Projekt wird durch Industriepartner und die KTI (Kommission für Technologie und Innovation) des Bundesamtes für Berufsbildung und Technologie BBT finanziert.

## **EFS-1 Electronic Film System - Digitale Bilder mit analogen Kameras**

**Jürgen Peipe**  
**Institut für Photogrammetrie und Kartographie**  
**Universität der Bundeswehr München**  
**D- 85577 Neubiberg**  
**Tel. 089 - 60043454**  
**e-mail: j-k.peipe@unibw-muenchen.de**

### Kurzfassung

In der Nahbereichsphotogrammetrie werden zunehmend digitale anstelle analoger Kameras eingesetzt. Dies gilt vor allem für Industrieanwendungen, weniger z.B. bei Aufgabenstellungen der Architekturphotogrammetrie. Hier werden zwar digitale 3D-Objektmodelle aus den Ergebnissen der photogrammetrischen Auswertung am Rechner generiert, visualisiert und präsentiert, die photogrammetrische Objekterfassung erfolgt jedoch oft noch mit analogen Kameras. Anders als in der Industrie ist es ja in der Regel nicht nötig, die Auswertung parallel zur Aufnahme vor Ort oder im direkten Anschluß daran durchzuführen.

In diesem Bericht soll auf eine Möglichkeit hingewiesen werden, analoge und digitale Aufnahmetechnik in einer Kamera miteinander zu verbinden bzw. wechselweise anzuwenden. Es wird das neu entwickelte "Elektronische Film System EFS-1" vorgestellt, bei dem ein digitaler Sensor anstelle der Filmpatrone in eine analoge 35 mm - Spiegelreflexkamera eingesetzt werden kann, ohne diese zu modifizieren. Man erhält also digitale Bilddaten mit einer analogen Kamera, kann diese aber auch jederzeit mit einer konventionellen Filmpatrone bestücken. Die technischen Spezifikationen des mit einem 1.3 Megapixel CMOS-Sensor ausgerüsteten Systems werden beschrieben. Zur Beurteilung der Brauchbarkeit des EFS-1 für photogrammetrische Zwecke werden Testfeldmessungen herangezogen.

# **Abnahme und Überwachung photogrammetrischer Systeme nach VDI 2634, Blatt 1**

U. Rautenberg  
Volkswagen AG, Wolfsburg

In der industriellen Anwendung gewinnen digitale optische Messsysteme aufgrund verbesserter Leistungsfähigkeit der verwendeten Hardware und steigendem Automatisierungsgrad immer mehr an Bedeutung. Dies beinhaltet sowohl eine wachsende Anwenderzahl, die nicht notwendigerweise umfangreiche Fachkenntnisse auf diesem Gebiet besitzen müssen, als auch die Notwendigkeit, die Messgenauigkeit der Systeme im industriellen Fertigungsprozess mit möglichst geringem Aufwand nachzuweisen. Zu diesem Zweck existiert seit kurzem die VDI-Richtlinie 2634 Blatt 1;2. Sie ist im Fachausschuss "Optische 3D-Messtechnik" der VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik (GMA) und im Arbeitskreis "Nahbereichsphotogrammetrie" der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung (DGPF) erarbeitet worden und stellt praxisnahe Verfahren zur Abnahme und Überwachung optischer 3D-Messsysteme bereit.

In dem Beitrag sollen Untersuchungen der Volkswagen AG beschrieben werden, diese Richtlinien in der praktischen Anwendung umzusetzen. Zu diesem Zweck wurden neuartige optisch antastbare Kohlefasermaßstäbe entwickelt, die neben der Fähigkeit der Kalibrierbarkeit mit einer Unsicherheit von weniger als  $5\mu\text{m}$ , mit einer Länge von 2,7m die Möglichkeit aufweisen, entsprechend große Volumina zu verkörpern. Diese wurden eingebunden in einem Gerüst, besonders zur Implementierung der Vorschläge aus Blatt 1 der Richtlinie verwendet. Grundlegend dient die Längenmessabweichung als unabhängig ermittelte Kenngröße des Verfahrens. Es wurden verschiedene Konfigurationen theoretisch untersucht, beurteilt und anschließend in einem Praxistest angewandt.

Als Ergebnis der theoretischen Untersuchung durch Simulation der Aufnahmekonfigurationen wurden zwei grundsätzlich verschiedene Konfigurationen jeweils in einem Rundumverband und einem Halbverband als Vorschlag für die einheitliche Prüfung photogrammetrischer Systeme formuliert. Insgesamt sind die Ergebnisse als positiv zu bewerten und stellen einen Schritt der Forschungsaktivitäten der Volkswagen AG dar, sinnvolle Realisierungen der Beschreibung sowohl der geräte- als auch der aufgabenspezifischen Messunsicherheit photogrammetrischer Messsysteme zu schaffen.

## **Einsatz von Satellitenfernerkundung und GIS-Technologie zur Untersuchung der Hangrutschungsgefährdung in Kyrgyzstan (Zentralasien).-** Roessner, S. ; Wetzel, H.-U. (Potsdam)<sup>1</sup> & M. Lehner (Wessling)<sup>2</sup>:

<sup>1</sup>GeoForschungsZentrum Potsdam, Aufgabenbereich 1 Kinematik und Dynamik der Erde, Telegrafenberg,  
D-14473 Potsdam, e-mail: [roessner@gfz-potsdam.de](mailto:roessner@gfz-potsdam.de) | [wetz@gfz-potsdam.de](mailto:wetz@gfz-potsdam.de)

<sup>2</sup>Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Institut für Methodik der Fernerkundung, Postfach 1116, D-82230  
Wessling, e-mail: [manfred.lehner@dlr.de](mailto:manfred.lehner@dlr.de)

Kyrgyzstan befindet sich im Bereich der aktiven Kollisionsfront zwischen Eurasischer und Indischer Platte. Die mit der anhaltenden tektonischen Aktivität verbundene Auffaltung und Hebung der Pamir-Tianshan Region hat ein gehäuftes Auftreten von Erdbeben und Massenbewegungen zur Folge. Massenbewegungen großen Volumens (z. T. mehr als eine Million m<sup>3</sup> Massenverlagerung pro Ereignis) konzentrieren sich in den Randbereichen des intramontanen Fergana-Beckens und bedrohen damit bedeutende Teile des in Kyrgyzstan ohnehin begrenzten Siedlungsraumes (94% der Landesfläche höher als 1000 m). Aufgrund der Größe und der teilweise schweren Zugänglichkeit des Gebietes sind die lokalen Behörden (Ministerium für Notstandssituationen und Zivilverteidigung) sehr an der Entwicklung von fernerkundlichen und GIS-basierten Methoden zur effektiven Analyse der Hangrutschungssituation im regionalen Maßstab interessiert. Dabei steht die Entwicklung von effektiven Methoden zur Erfassung der Hangrutschungssituation (Inventarisierung) und zur räumlich differenzierten Charakterisierung der natürlichen Bedingungen, die zur Auslösung von Hangrutschungen führen, im Mittelpunkt. Ziel ist die Entwicklung eines GIS-basierten Ansatzes, der eine kombinierte Auswertung von fernerkundlichen Informationen und anderweitig erhobenen Daten ermöglicht.

Zu diesem Zweck wurde eine digitale Datenbasis aufgebaut, die Satellitendaten (Landsat-TM, MOMS-2P) unterschiedlicher Aufnahmezeitpunkte der letzten 10 Jahre, geologische und topographische Informationen sowie existierende Hangrutschungsdaten und Ergebnisse von Feldbegehungen enthält. Die stereoskopisch auswertbaren MOMS-2P Daten (Mode D) ermöglichen die Erzeugung eines Digitalen Geländemodells (DGM) mit einer räumlichen Auflösung von 25 m. Außerdem bildete das DGM die Grundlage für eine Orthorektifizierung der beiden spektralen Nadir-Kanäle und der beiden panchromatischen Stereo-Kanäle. Der resultierende vierkanalige Datensatz (Bodenauflösung 17 m) dient aufgrund seiner im Vergleich zu den Landsat-TM Daten höheren räumlichen Auflösung als wichtige Grundlage für geologische und geomorphologische Auswertungen. Die bisherigen Untersuchungen haben gezeigt, dass die zeitgleiche Verfügbarkeit von Relief- und Oberflächeninformationen von entscheidender Bedeutung für die Ableitung von räumlichen Zusammenhängen zwischen dem Auftreten von Hangrutschungen und sie verursachenden geologisch-geomorphologischen Strukturen ist. Damit führt der Einsatz von Fernerkundungs- und GIS-Technologie zu einem verbesserten Verständnis der regionalen Verbreitungsmuster von Hangrutschungen und zu einer Neubewertung der für eine Gefährdungseinschätzung wesentlichen Faktoren.

**Digitale Höhenmodelle aus Stereopaaren selbst erstellen – Ein beispielhafter  
Produktionsablauf mit IMAGINE OrthoBASE Pro und Stereo Analyst  
Irmir Runkel (Geosystems GmbH)**

Digitale Höhenmodelle sind nicht immer in der benötigten Qualität verfügbar. Diese Lücke kann mit der Generierung eigener Höhenmodelle aus Stereo-Luft- oder Satellitenbildpaaren geschlossen werden. Dieser Vortrag stellt eine neue Softwarelösung aus dem Hause ERDAS® vor, IMAGINE OrthoBASE Pro, mit der digitale Höhenmodelle durch eine automatische Bildzuordnung aus Luftbildern, SPOT-, IRS-1C- und IKONOS-Daten erstellt werden. Anhand anwendungsbezogener Beispiele wird der gesamte Produktionsweg erläutert und insbesondere auf neuartige Filteralgorithmen eingegangen, mit denen unerwünschte Objekte im DGM entfernt werden. Weiterhin werden die unterschiedlichen Ausgabeformate (z.B. Raster und TIN) erläutert. Die Diskussion erreichter Genauigkeiten und eine mögliche Fehlerabschätzung stellen einen weiteren wichtigen Aspekt dieses Vortrags dar. Um die so erstellten - oder auch anderweitig bezogene - Höhenmodelle einer Qualitätskontrolle zu unterziehen, ist eine orthogenaue dreidimensionale Darstellung von Nöten. Es wird gezeigt, wie mit Stereo Analyst™ Version 1.1, einem Windows-basierten Produkt, direkt am Bildschirm 3D Vektorlayer (ESRI 3D Shape Files) in Stereo überprüft und korrigiert werden. Der Stereo Analyst stellt Stereo-Satellitenbildpaare, Luftbilder und auch nicht-metrische Bilddaten stereoskopisch dar, wobei die Stereomodelle auf unterschiedliche Weise generiert werden: Entweder werden sie aus IMAGINE OrthoBASE importiert, Triangulationsdaten anderer Programme verwendet, im Stereo Analyst eigens berechnet oder einfach relativ orientiert.

## Auswertung von CIR-Luftbildern zur Bilanzierung der Auswirkungen des Extremhochwassers 1999 auf die Uferrohrichte des Bodensees

K. Schmieder, M. Dienst und W. Ostendorp

### Zusammenfassung

Als Folge des Extremhochwassers von 1999 am Bodensee traten im Hochwasserjahr starke Vitalitätsverluste am Schilfröhricht auf, die nachhaltige Schäden in den Röhrichtbeständen erwarten ließen. Innerhalb eines 3-jährigen, vom Land Baden-Württemberg geförderten Forschungsprojektes sollen die Schäden flächenscharf bilanziert und strukturelle Veränderungen infolge des Extremhochwassers in Abhängigkeit vom Schädigungsgrad dokumentiert werden. Hierzu wurden fünf Schadstufen definiert, die als Grundlage für die Auswertung von CIR-Luftbildern aus den Jahren 2000, 2001 und 2002 und deren Vergleich mit Farbluftbildserien aus den Jahren 1993 und 1999 (alle im Maßstab 1:5.000) dienen. Die Bestandsgrenzen unterschiedlicher Schädigungsgrade werden am Planicomp P 33 (Zeiss, Oberkochen) digitalisiert und im Geographisches Informationssystem/ GIS (ARC/INFO, ESRI, Kranzberg) analysiert. Weiterhin wurde, differenziert nach den fünf Schadstufen, ein Monitoring von 50 Testflächen mit Erfassung von Bestandsstruktur, Biomasse, Halm- und Blattmorphologie sowie Speicherstoffen in den Rhizomen durchgeführt. Die erhaltenen Daten werden mit Hilfe des GIS flächenscharf übertragen und Veränderungen des Degenerations- bzw. Regenerationsprozesses in den Jahren nach dem Extremhochwasser in Abhängigkeit vom Schädigungsgrad erfasst. Hieraus soll ein Modell für die Schilfregeneration erstellt werden, das mittelfristige Prognosen zur Bestandsentwicklung in Abhängigkeit vom Wasserstandsgang und anderen Stressoren ermöglicht sowie eine Abschätzung der Auswirkungen zukünftiger Extremereignisse erlaubt.

Die Ergebnisse nach dem ersten Projektjahr ergaben starke Schädigungen besonders der tiefgelegenen aquatischen Röhrichte. Die Schäden äußern sich vor allem in geringeren Halmdichten und der Ausbildung zunehmend schwächerer Halme mit steigendem Schädigungsgrad. Es gibt lokal Totalverluste im Größenbereich von mehreren Hektar. Auffallend gering sind die Schäden im Mündungsbereich größerer Zuflüsse.

## **Ableitung von Landoberflächenparametern aus flugzeuggetragenen multiparametrischen E-SAR-Daten**

Christian Thiel, Tanja Riedel, Christiane Schmullius, Volker Hochschild, Carsten Pathe,  
Martin Herold & Steffen Grünler

Institut für Geographie, Lehrstuhl für Geoinformatik, Friedrich-Schiller-Universität Jena,  
Löbdergraben 32, 07743 Jena, Deutschland

Multifrequente, multipolarimetrische SAR Daten besitzen Anwendungspotential zur Ableitung von Landoberflächenparametern wie Landnutzung, Bodenfeuchte, Oberflächenrauigkeit und Vegetationscharakteristika. Bei der Auswertung der Daten ist jedoch zu berücksichtigen, dass die Radarrückstreuung im Tagesgang u.a. aufgrund von Veränderungen des auf Pflanzenoberflächen befindlichen Wassers aus Taubenetzung, Guttation und Interzeption variiert. Ziel des von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten Projektes PHYMO ist die Ableitung flächenhafter Inputparameter aus SAR-Daten für die Modellierung von Stofftransporten und anderen hydrologischen Fragestellungen. Das vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderte Projekt TerraDew hingegen verfolgt die Zielsetzung, den Einfluss von benetzten Vegetationsbeständen systematisch zu untersuchen und quantitativ zu erfassen sowie ein Radarrückstreu-Modell zu entwickeln. Datengrundlage bilden jeweils multifrequente, polarimetrische E-SAR Daten des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR). Bei den Überfliegungsgebieten handelt es sich um das Trinkwassertalsperreneinzugsgebietes Zeulenroda/Südthüringen (PHYMO) und andererseits um das Testgebiet Alling/Südbayern (TerraDew). Während der Befliegungen fanden intensive Geländearbeiten statt. Um den Einfluss benetzter Vegetationsoberflächen im Testgebiet Alling zu quantifizieren, wurden dort zusätzlich 30 mikroklimatologische Stationen installiert.

Für die polarimetrische Interpretation wurden aus den E-SAR SLC-Daten auf Basis der Cloude-Dekomposition die drei Eigenwerte und Eigenvektoren extrahiert und aus ihnen die Parameter Entropy, alpha-Winkel und Anisotropie berechnet. Die Radar-Intensitätswerte wurden mit *Isodata Clustering* und dem *Maximum-Likelihood* Algorithmus klassifiziert. Die Dekompositions-Parameter wurden mittels Kombination eines *Fuzzy-Logic* Klassifikators und einem Neuronalen Netz bearbeitet. Der Informationsgehalt der Radarparameter Polarisation, Intensität und Hauptkomponenten wurde hinsichtlich Bodenfeuchteinformation, Oberflächenrauigkeit und Biomasse empirisch mit Hilfe linearer Regressionsanalysen ermittelt und entsprechende thematische Karten generiert. Um den Einfluss von freiem Vegetationswasser auf die Klassifikationsgenauigkeit abzuschätzen, wurde die zeitliche Veränderung des Rückstreusignals hinsichtlich des Rückgangs des freien Vegetationswasser für verschiedene Feldfrüchte untersucht. Die Untersuchung des Einflusses von freiem Vegetationswasser auf die Radarrückstreuung zeigt für verschiedene Feldfruchtarten deutliche Unterschiede. Beachtliche Unterschiede treten im Tagesgang für Sommergerste und Grünland auf.



**Untersuchungen zur Bestimmung des Modalbestands saurer bis intermediärer magmatischer Gesteine mit Hilfe thermaler Reflexionsspektroskopie.-  
Schodlock, M.(Potsdam):**

GeoForschungsZentrum Potsdam, Aufgabenbereich 1 Kinematik und Dynamik der Erde,  
Telegrafenberg, D-14473 Potsdam ; e-mail: [mscho@gfz-potsdam.d](mailto:mscho@gfz-potsdam.d)

Die Reflexionsspektroskopie ermöglicht eine stoffliche Differenzierung verschiedener Materialoberflächen. Dabei werden je nach Material verschiedene Bereiche der elektromagnetischen Strahlung analysiert. Für die spektrale Untersuchung magmatischer Gesteine ist der wichtigste Wellenlängenbereich die Thermalstrahlung (FTIR). In diesem Bereich zeigen silikatische Minerale charakteristische spektrale Merkmale, die auf Vibrationsbewegungen (Fundamentalschwingungen) der Moleküle und Atome zurückzuführen sind. Bei Gesteinen wird jedoch eine Auswertung spektraler Merkmale und damit die Bestimmung des Gesteinstyps erschwert, da sie eine Vergesellschaftung verschiedener Minerale darstellen. Das gemessene Gesteinsspektrum entspricht daher einem Mischspektrum der einzelnen Mineralspektren. Eine Gesteinsbestimmung setzt somit Kenntnisse über die gesteinsbildenden Minerale und dem Modalbestand voraus. Das Ziel dieser Arbeit ist die Bestimmung des Modalbestandes auf der Grundlage von Reflexionsspektren. Dazu wurden umfangreiche Labormessungen mit Hilfe des Perkin Elmer FTIR Spektrometers Spektrum GX durchgeführt. Zur spektralen Bestandsaufnahme der Einzelminerale wurde ein FTIR Mikroskop verwendet, welches punktgenaue Messungen an der Gesteinsoberfläche ermöglicht. Die so ermittelten Spektren wurden hinsichtlich ihrer charakteristischen Eigenschaften analysiert, mit dem Ziel gesteinsrelevanter Merkmale zu bestimmen. Die Gesteinsspektren wurden mit einer Integrationskugel des PE FTIR Spectrum GX gemessen. Dabei wurde ein Mischspektrum der Minerale über eine Fläche von ca. 1,5 cm im Durchmesser gemessen. Die Analyse dieser Mischspektren erfolgte hinsichtlich der bei der Mineralanalyse ermittelten gesteinsrelevanten Merkmalen. Basierend auf diesen Ergebnissen kann somit der Modalbestand mit Hilfe eines Mischmodells bestimmt werden. Solch ein Mischmodell könnte auf Fernerkundungsdaten übertragen werden und so zum Beispiel zur genaueren flächenhaften Differenzierung magmatischer Gesteine eingesetzt werden.

Tetzlaff, A., Altermann, W. & Frei, M. (München):

## **Landsat-TM Anwendungen zur Prospektion sedimentärer Lagerstätten in Südafrika**

Ludwig-Maximilians-Universität München, Institut für Allgemeine und Angewandte Geologie, Arbeitsgruppe Fernerkundung (AGF) Luisenstr. 37, D-83330 München, Email: [wladimir.altermann@iaag.geo.uni-muenchen.de](mailto:wladimir.altermann@iaag.geo.uni-muenchen.de)

Ein 2400km<sup>2</sup> großes Testgebiet um die neoarchoische Pb/Zn MVT-Lagerstätte Pering in Griqualand West, Kaapvaal Kraton, Südafrika wurde anhand von Landsat TM Daten untersucht. Das Testgebiet auf dem Ghaap Plateau umfaßt Gesteinseinheiten der 2.64 Ga alten Schmidtsdrif Subgruppe (Quarzite, basische Laven, peritidale Karbonate und Schiefertone) sowie stromatolithische Plattformkarbonate und untergeordnet Cherte und Schiefertone der 2,55 Ga bis 2,51 Ga alten Campbellrand Subgruppe. Diese Gesteinseinheiten fallen allesamt regional mit etwa 3-5° nach Westen ein. Im Testgebiet ist ein weit gespanntes Mulden- und Sattelsystem mit NNW-SSE streichenden Achsen ausgebildet. Hauptstörungsrichtungen verlaufen E-W bis WNW-ESE sowie N-S bis WNW-ESE. Untergeordnet treten auch NE-SW und NW-SE Störungen auf. Die Störungen werden z.T. von basaltischen Gängen der mesozoischen Karoo Formation gefolgt.

Die Lagerstätte befindet sich innerhalb einer flachen Senke die durch eine Mulde gebildet wird. Die strukturelle Gebundenheit der Lagerstätte an hauptsächlich N-S und untergeordnet NW-SE streichende Lineamente, konnte aufgezeigt werden. Eine Orientierung der Erzmineralisationsbreccie entlang dieser Richtungen ist aus dem Abbau bekannt. Damit ist die Lagerstätte an die regional ältesten, neoarchoischen bis paläoproterozoischen tektonischen Richtungen gebunden. Die jungproterozoischen Lineamentrichtungen (E-W) sind in der direkten Umgebung der Lagerstätte nicht vertreten.

Da es im Bereich der MVT-Lagerstätte nicht zur Ausbildung von einer Alterationszone mit OH-Gruppen Mineralen gekommen ist, und weil die umgebenden Karbonate einen ebenso hohen Eisengehalt aufweisen wie die mineralisierte Breccie, ist die Mineralisation selbst mit Hilfe der spektralen Auflösung der TM-Daten nicht erfassbar. In *situ* durchgeführte Laborspektrometernmessungen der Mineralisationszone und der Karbonate der Umgebung zeigen jedoch Unterschiede im Spektralverhalten, die zusammen mit der lithologisch- und strukturgeologischen Interpretation Ansätze zur Entwicklung eines Fernerkundungsprospektionsschemas auf diesen Lagerstättentyp ermöglichen.

**Fernerkundung und softwaregestützte Bildauswertung für die Erdölexploration im  
Oman.-  
Volk, P. & T. Wever (München):**

Gesellschaft für angewandte Fernerkundung mbH, Arnulfstr. 197, D-80634 München,  
Email: [volk@gaf.de](mailto:volk@gaf.de) | [weve@gaf.de](mailto:weve@gaf.de)

Die Satellitenfernerkundung wird heute von größeren Unternehmen oder Konzernen, die im upstream Bereich des Erdöl- und Erdgassektors arbeiten, bereits vielfältig eingesetzt. Leider beschränkt sich die Nutzung in vielen Fällen bei der Exploration auf Reconnaissance Kartierungen und zur Planung von Explorationsaufgaben und Infrastrukturmassnahmen bei der Produktion.

Das Potential moderner operationell verfügbarer Satellitendaten wird damit nur zum Teil genutzt. Einer intensiveren Nutzung steht vor allem das Fehlen spezifischer, standardisierter und marktgerecht aufbereiteter Informationsprodukte entgegen, die bei der Erledigung routinemäßiger Aufgaben (z.B. der Auswertung seismischer Massendaten) einfach eingesetzt werden können. Vor diesem Hintergrund entwickelt die GAF auf der Grundlage einer langjährigen Zusammenarbeit zusammen mit einem größeren Erdölproduzenten marktgerechte fernerkundungsbasierte Informationsprodukte die diesem Anspruch gerecht werden sollen.

Diese Entwicklungen laufen im Zusammenhang mit weiteren Dienstleistungen, Software- und Datenprodukten, die für den geologischen Anwendungssektor maßgeschneidert sind. Der Vortrag wird einen Überblick der zur Zeit laufenden Entwicklungen am Beispiel dreier Pilotprojekte im Oman geben.

# Erstellung von DGM's aus Laserscannerdaten mit Detektion und Korrektur von Problemzonen

Roland Wack

roland.wack@joanneum.at

Institut für Digitale Bildverarbeitung des Joanneum Research (Graz/A)

Bei einer Aufnahme mit Laserscanner, zur Erstellung eines digitalen Geländemodells(DGM), gibt es Bereiche dichter Vegetation, die der Laserimpuls nicht zu durchdringen vermag. Besonders großflächig tritt dieser Zustand im Bereich von Jungwäldern, Maisfeldern und Schilf auf. Für die Erstellung eines DGM's existiert nun auf großer Fläche keine Bodenpunkte, was zur Folge hat, daß in diesen Bereichen das Bodenmodell bei der Berechnung nach oben gezogen wird.

Für den am Institut für Digitale Bildverarbeitung des Joanneum Research im Zuge des EU Projekts HIGHSCAN(Assessing forest attributes by integrated use of high-resolution satellite imagery and laserscanner) entwickelten Algorithmus zur Erstellung von DGM's aus Laserscannerdaten, wurde nun innerhalb des ACV/K+ Projekts ein Verfahren entwickelt, um diese Problemzonen zu detektieren und in weiterer Folge zu korrigieren.

Die Detektion erfolgt durch eine Rasterbildkombination des fehlerbehafteten DGM's, einem digitalen Oberflächenmodell(DSM) aus last pulse Daten sowie einem Differenzbild DSM-last pulse - DSM first pulse. Als Resultat entsteht ein Binärbild das den fehlerhaften Bereich des DGM's ausweist.

Nachdem die Problemzonen eruiert wurden, wird nun eine erneute Berechnung des DGM's durchgeführt. Dabei wird zuerst ein stark geglättetes Modell generiert, dessen Werte dann nur im Bereich der Problemzonen bei der DGM-Berechnung mit einer Standardparametereinstellung übernommen werden.

Als Ergebnis dieses Prozesses steht nun ein bereinigtes DGM zur Verfügung.

## **Untersuchungen zur Landschafts- und Umweltkartierung mittels moderner Radarsensoren - Erste Ergebnisse aus dem Projekt ProSmart II - DEKALUMP**

H. Weichelt, H.-G. Klaedtke, M. Pilarski

Im Rahmen der ProSmart-Initiative zur Entwicklung eines kommerziell betreibbaren satellitengestützten Erdbeobachtungssystems auf der Basis moderner Radartechnologien, wurde ein wachsender Bedarf an diesen Daten für Planungszwecke und Kartographie mit Schwerpunkten in der Regional- und Umweltplanung ermittelt. Dabei besteht der primäre Bedarf in an einer flächenhaften Erfassung der aktuellen Landnutzung bzw. -Bedeckung, wogegen die hochgenaue Erfassung der Lage und Geometrie der Objekte nur von zweitrangiger Bedeutung ist.

Für die kommerziellen Nutzer in diesem Anwendungsbereich ist dabei eine Anpassung der Ergebnisse an die in ihren Bereichen üblichen bzw. gültigen Nomenklaturschlüsseln eine ganz wesentliche Forderung. Dies erfordert die Entwicklung von operationellen Auswerteverfahren, die eine Transformation von den unmittelbar aus den Fernerkundungsdaten ableitbaren Klassen in die für die Nutzer fachlich relevante Nomenklaturen leistet. Ein weiterer ganz wesentlicher Punkt in der Forderungsliste ist die Sicherung einer hohen Datenverfügbarkeit zu beliebigen definierten Zeitpunkten. Daraus leitet sich die Forderung nach regelmäßig verfügbaren, wetterunabhängigen Daten ab, die aus gegenwärtiger Sicht nur von einem satellitengestützten Radaraufnahmesystemen erfüllbar ist.

Weitere Forderungen betreffen die Datenqualität und geometrische Auflösung eines solchen Systems, die sich aus den jeweiligen thematischen Aufgaben und den in Betracht gezogenen Maßstabsbereichen ableiten. Auf Grund der unterschiedlichen Betrachtungsdimension sind dabei entsprechend unterschiedliche Maßstabsbereiche gefordert, die für den regionalen Bereich bis etwa 1 : 10 000 betragen und für den überregionalen Bereich bei 1 : 25 000 bis 1 : 100 000 liegen.

Das auf dieser Basis im August 2000 begonnenen Projekt ist auf die Nutzung multifrequenter und multipolarisierter SAR-Daten fokussiert. Sie werden im Rahmen der ProSmart II-Befliegungen als Simulationsdaten zukünftiger InfoTerra Satellitendaten bereitgestellt. Die Anwendung eines neuen segmentbasierten Klassifikators speziell für die Auswertung von multifrequenten SAR-Daten in einer geeigneten GIS-Umgebung zur Einbeziehung der für die Nomenklatur-Transformationen benötigten Zusatzdaten bilden den Hintergrund der operationellen Datenauswertung.

Für die Realisierung der Arbeiten wurde dazu ein Untersuchungsgebiet nordwestlich von Ehingen (Schwäbische Alb) ausgewählt, das auf Grund seiner kleinräumigen Strukturen sowohl an die Daten als auch an die Auswerteverfahren außerordentlich hohe Anforderungen stellt. Dabei kommt der Validierung der Ergebnisse durch die potentiellen Referenzpartner eine zentrale Bedeutung zu. Paralell zu dieser Auswertung wird ein Teil dieses Gebietes durch das Landesamt für Flurneuordnung und Landentwicklung in Baden-Württemberg bearbeitet, welches Ihre Ergebnissen dieser Auswertung gegenüberstellt. Weitere Referenzpartner sind das Landesvermessungsamt Baden-Württemberg, das Ministerium für den Ländlichen Raum Baden-Württemberg, das Umweltbundesamt und das Geographic Information Management SA in Luxembourg.

Im Vortrag werden die Zielstellung des Projektes auf der Basis der Nutzeranforderungen erläutert, Datenbeispiele aus der InfoTerra-SAR Befliegung gezeigt und erste Ergebnisse der Datenauswertung präsentiert.

## **'Was passiert in der nächsten Regenzeit? Die Prävention von Flutkatastrophen.'**

Peter Zeil,  
Zentrum für Geographische Informationsverarbeitung Salzburg ZGIS

In Mozambique führten im vorigen Jahr vier, in kurzer Zeit aufeinanderfolgende Regenfronten zu verheerenden Überschwemmungen. In diesem Frühjahr, lösten heftige Regenfälle im Hochland von Angola eine Überflutung im Unterlauf des Zambesi aus, die ein Gebiet von 12 400 qkm und ca. 80000 Menschen bedrohte.

Die Aufarbeitung der Erfahrung von 2000 und 2001 stellt drei wichtige Aspekte für ein wirkungsvolles Frühwarnsystem in den Vordergrund:

- Für Vorwarnung, Management und Prävention bedarf es genauer und zeitnaher Information.
- Diese Information erzielt nur dann ihre Wirkung, wenn sie durch bereits erprobte Kommunikationskanäle verteilt wird.
- Beim Empfänger angekommen, muss dieser über die Fähigkeit und die Macht verfügen, auf der Basis der Information Entscheidungen zu treffen.

Drei Thesen:

1. Die Satelliten-gestützte Fernerkundung ist für eine globale wirkungsvolle Frühwarnung noch nicht operationell nutzbar. Von dieser Aussage können lediglich die geostationären Wettersatellitensysteme ausgenommen werden. Sowohl optische als auch Radar-Systeme halten vielfältige Anwendungsmöglichkeiten bereit, liefern jedoch keine ausreichende Überdeckung oder befinden sich noch im experimentellen Stadium.
2. Für erfolgreiche Präventionsmaßnahmen stehen keine digitalen Höhenmodelle mit der erforderlichen Genauigkeit zur Verfügung.
3. Die FE kann nur dann eine entscheidende Rolle bei Prävention bzw. Management von Flutkatastrophen wahrnehmen, wenn langfristig eine fachliche und institutionelle Kapazität in den betroffenen Gebieten aufgebaut wird. Die Akzeptanz der FE als effektive Observierungsmethode wird dadurch gefördert.