

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



Band 17

2008



Vorträge



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

23. – 26. April 2008
in Oldenburg

Vom Erdapfel zum 3D-Modell

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



Band 17

2008

Vorträge

56. Deutscher Kartographentag

28. Wissenschaftlich-Technische
Jahrestagung der DGPF

23. – 26. April 2008
in Oldenburg

Vom Erdapfel zum 3D-Modell

ISSN 0942-2870

Eckhardt Seyfert, Hrsg.

ISSN 0942-2870

Publikationen der
Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung
und Geoinformation (DGPF) e.V.
Band 17, 295 S., Potsdam 2008
Hrsg.: Eckhardt Seyfert

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

Zu beziehen durch:

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

Druck:

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

Vorwort

Mit der 28. Wissenschaftlich-Technischen Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation (DGPF) und dem 56. Deutschen Kartographentag 2008 der Deutschen Gesellschaft für Kartographie (DGfK) in Oldenburg ist es erneut gelungen, eine gemeinsame Veranstaltung der beiden Gesellschaften durchzuführen und damit auf die immer enger werdende Zusammenarbeit im Bereich der Geoinformation hinzuweisen.

Diese Tagung steht unter dem Motto

“Vom Erdapfel zum 3D-Modell“

und spannt den Bogen von kartenhistorischen Fragen (Behaim'scher Erdapfel) bis zu aktuellen Technologien wie der globalen Schaffung von 3D-Stadtmodellen. Das Motto zeigt die Bandbreite der Gemeinsamkeiten, aber auch die Kernkompetenz einer jeden Fachdisziplin. Unter Wahrung dieser Kernkompetenzen ist es der erklärte Wille, auch in Zukunft eng zusammen zu arbeiten, um den vielfältigen Ansprüchen der Zukunft zu genügen. Die Gesellschaften und Berufsvertretungen im Umfeld der Geoinformation stehen dabei in engem Kontakt, um sich auf technischer oder organisatorischer Ebene auszutauschen, neue Themenfelder zu erschließen und gemeinsam für eine stärkere öffentliche Wahrnehmung unserer Fachgebiete zu sorgen.

Geodaten sind zunehmend in den Fokus wirtschaftlicher, politischer und gesellschaftlicher Entscheidungen gerückt. Ihre Qualität, Aktualität und professionelle Präsentation werden daher immer wichtiger. Kürzere Entscheidungszyklen gehen einher mit erhöhten Anforderungen an Fortführung und Pflege. Dies gilt nicht nur für die Geodaten selbst, sondern für sämtliche mit ihnen verknüpfbaren Informationen.

In über 50 Fachvorträgen und zahlreichen Postern berichten Referenten aus Deutschland und dem Ausland über Einzelaspekte wie neue Geodaten, 3D-Modelle, Ausbildungsfragen, Klima und Umwelt, Geoinformatik und viele mehr. Das Besondere dieser Tagung ist, dass wir diese Aspekte nicht mehr nach Fachrichtungen getrennt, sondern gemeinsam behandeln. So gibt es keine reine Vortragsreihe der DGPF und der DGfK, sondern die oben genannten Themen werden in gemeinsamen Themenblöcken jeweils aus dem Blickwinkel der Kartographie und der Photogrammetrie und Fernerkundung beleuchtet. Einige ausgewählte Artikel werden nicht in diesem Tagungsband abgedruckt, sondern erscheinen als eigenständige Artikel in den Kartographischen Nachrichten.

Die Tagung findet an der Fachhochschule in Oldenburg statt, wo in Forschung und Lehre an unterschiedlichsten Fragen der Photogrammetrie und Geoinformatik, Kartographie und Fernerkundung gearbeitet wird. Oldenburg bietet aber auch ein sehenswertes historisches Stadtzentrum und ist idealer Ausgangspunkt für Kurzreisen nach Bremen, Ostfriesland oder an die Nordsee.

Dr. Peter Aschenberner
Präsident der
Deutschen Gesellschaft für Kartographie

Prof. Dr. Thomas Luhmann
Präsident der Deutschen Gesellschaft
für Photogrammetrie, Fernerkundung und
Geoinformation

INHALTSVERZEICHNIS

NEUE GEODATEN

(Leitung: Dr. Klaus Ulrich Komp / Dr.-Ing. Andreas Illert)

ALBERS, C. & SCHMIDT, C.: Methoden zur Verbesserung und Validierung neuer Geodaten unter Einsatz von FME und Oracle Spatial.	9
ARNOLD, S. & BUSCH, A.: Integration von Fernerkundungsdaten in nationale und Europäische Dateninfrastrukturen – Ableitung von CORINE Land Cover-Daten aus DLM-DE.	19
GRASSE, R.: Neue Geodaten müssen passen! Datenintegration am Beispiel von Adressdaten.	23
GRENZDÖRFFER, G.; ENGEL, A. & JÜTTE, K.: Low-cost UAV's in der Lland- und Forstwirtschaft – Eine vergleichende Untersuchung von zwei Mini-UAV's.	27

OPTISCHE 3D-MESSTECHNIK

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

BIENERT, A. & SCHELLER, S.: Verfahren zur automatischen Bestimmung von Forstinventurparametern aus terrestrischen Laserscannerpunktwolken. ...	37
KAHLMANN, T.; BÖSEMANN, W. & GODDING, R.: Erfassung dynamischer Prozesse im industriellen Umfeld.	47
LINDSTAED, M.; KERSTEN, T.; MECHELKE, K.; GÖTTING, M. & HEIDEN, R.: Virtuelles 3D-Modell der antiken Tempelanlage in Sirwah/Jemen zur archäologischen Objektdokumentation durch terrestrisches Laserscanning und Photogrammetrie.	59
LUHMANN, T.; BETHMANN, F.; HERD, B. & OHM, J.: Dynamische 3D Oberflächen- erfassung mit Bildsequenzen.	69
MEIERHOLD, N.; BIENERT, A. & SCHMICH, A.: Linienbasierte Referenzierung zwischen Einzelbildern und Laserscannerdaten für eine bildgestützte Interpretation von Punktwolken in einer CAD-Umgebung.	79
PEIPE, J.; KOZUSCHEK, N. & PRZYBILLA, H.-J.: Erfahrungen bei der mess- technischen Erfassung, Modellierung und Darstellung von kleinförmigen Kunstobjekten.	89

3D-MODELLE

(Leitung: Prof. Dr.-Ing. Monika Sester / Prof. Dr. Manfred Buchroithner)

ROSS, L. & KLEINSCHMIT, B.: Virtuelle 3D-Stadtmodelle im kommunalen Einsatz – Entwicklungen, Trends und Perspektiven.	97
---	----

AUSBILDUNG

(Leitung: Prof. Dr.-Ing. Jochen Schiewe / Prof. Dr.-Ing. Reiner Buzin)

BUCHROITHNER, M.; KOCH, W.G. & RÜLKE, C.: Aktuelle Entwicklungen der Kartographieausbildung an der TU Dresden.	107
--	-----

FERNERKUNDUNG UND KATASTROPHENSCHUTZ

(Leitung: Dr. Horst Weichelt)

BUTENUTH, M. & HINZ, S.: Verification of intact road network in satellite imagery for crises applications.	111
GÄHLER, M. & VOIGT, S.: DeSecure – Satellitengestützte Kriseninformation für Deutschland.	119

COMPUTER VISION

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

BUCHWITZ, M.; HEINIG, T.; HELBIG, M.; GLOAGUEN, R. & ABEBE, B.: Surface deformation mapping employing a kinematic GPS approach.	127
LEIDIG, M. & GLOAGUEN, R.: Estimation of erosion with remote sensing data on large scale – an approach for Tibet.	137
SHAHZAD, F.; MAHMOOD, S.A. & GLOAGUEN, R.: Neotectonics development in North-Eastern Potwar (Pakistan): inferences from Remote Sensing and Geophysical Methods.	143
SPANGENBERG, R. & REULKE, R.: Objektverfolgung mit Partikel-Filtern.	149
VÖLKER, A. & MÜTERTHIES, A.: Landschaftsökologische Modellierung und automatisierte Erfassung von Landschaftselementen für das Monitoring und die Bewertung einer nachhaltigen Kulturlandschaft.	161
WANJING LI; BÖHLER, M.; SCHÜTZE, R.; MARZANI, F.S.; BOOCHS, F. & VOISIN, Y.: Ein stereoskopisches Nahbereichssystem auf Basis von adaptiver Musterprojektion.	171
WIEDEMANN, A.: Inspektion linearer Objekte mit flugzeuggestützten Sensoren. .	181

WIJAYA, A. & GLOAGUEN, R.: Spatial Distribution of Stand Volume through Integration of Field Measurement and Remote Sensing Data: a Case Study of Tropical Rainforest in Central Indonesia.	189
--	-----

GEOINFORMATIK

(Leitung: Prof. Dr.-Ing. Thomas Kolbe / Prof. Dr. Frank Dieckmann)

UEBERHOLZ, R.: Geodateninfrastruktur – Operationelle Koordinierung der GDI-Niedersachsen im Kontext mit INSPIRE und GDI-NI.	199
--	-----

GEOLOGIE UND RESSOURCEN

(Leitung: Dr. Hans-Ulrich Wetzel / Dr. Kristin Asch)

ANDERSON, J.; WETZEL, H.-U.; WALTER, T. & MOTAGH, M.: Messungen von Landabsenkungen im Kashmar Tal, NE Iran, unter Verwendung von Satelliten Radar Interferometrie.	203
ASCH, K. & TROPPEHAGEN, H.-G.: GeoScience Markup Language – „Esperanto„ für geologische Daten.	213
BOOS, S.; HORNUNG, S.; JUNG, P. & MÜLLER, H.: Erfassung und Analyse von Laserscandaten zur Unterstützung der Landschaftsarchäologie.	219
GLOAGUEN, R.: Semi-automatic Remote Sensing River and Fault Analysis for geomorphological and Neotectonics.	229
HEIM, B.; GLÄBER, C.; BORG, G.; REICHERT, J.; THOMAE, M.; CHABRILLAT, S. & RICHTER, W.: Spektroradiometrische Untersuchungen im GEO/BIOLabor ,FND Salzstelle Teutschenthal-Bahnhof' (Halle).	237

QUALITÄTSSICHERUNG

(Leitung: Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Kresse / Dr.-Ing. Stefan Neudeck)

KRESSE, W.: Statusbericht zur Standardisierung für Photogrammetrie und Fernerkundung.	247
NEUDECK, S.: Qualitätssicherung bei der Datenmigration in das Topographische Landschaftsmodell der Schweiz.	251
REULKE, R. & HOFFMANN, R.: Geometrische Datenfusionsverfahren.	259

SENSOREN

(Leitung: Dr. Rainer Sandau)

BAUER, M.; SCHEELE, M. & SCHISCHMANOW, A.: Kalibration mittels Beugung und Goniometermessung im Vergleich.	267
JACOBSEN, K.: Sagt die Anzahl der Pixel im Bild alles?	273
MANSHOLT, U.; & LADSTÄDTER, R. & GRUBER, M.: Ergebnisse aus UltraCamX Testflügen.	283
AUTORENVERZEICHNIS	291

Methoden zur Verbesserung und Validierung neuer Geodaten unter Einsatz von FME und Oracle Spatial

CORD ALBERS¹ & CARSTEN SCHMIDT²

Zusammenfassung: Moderne Datenbanken wie die Oracle Plattform fokussieren immer mehr auf die direkte Verarbeitung, Bereitstellung und Nutzung räumlicher Informationen. Durch den Einsatz spezieller Datentypen wie z.B. SDO_GEORASTER können nunmehr alle Arten von Geoinformationen in einer Standard-Datenbank vorgehalten werden. Darüber hinaus lassen sich unter anderem mit den bekannten Erweiterungen von Oracle Spatial vollständige GIS-Funktionalitäten auf der Datenbank abbilden. Der Beitrag zeigt auf, wie bestehende Datenbestände aus verschiedenen CAD- und GI-Systemen in eine performante Oracle Spatial Datenbank überführt werden können. Dabei werden Fragestellungen sowohl zum Aufbau der Datenstrukturen in Oracle Spatial als auch Methoden zur Verbesserung und Validierung der Daten erörtert.

1 Einleitung

Viele Unternehmen und Institutionen speichern ihre Geodaten nach wie vor in proprietären GI-Systemen. Oftmals kommen sogar unterschiedliche GI-Systeme in den verschiedenen Fachbereichen zum Einsatz. Durch eine dezentrale Datenhaltung werden Synergien in den Geodaten und mehrfach erfasste bzw. beschaffte Daten nicht erkannt und wenn doch, fällt ein Austausch durch die unterschiedlichen Formate schwer.

Eine leistungsfähige und zukunftsweisende Lösung stellen moderne Datenbanken wie die Oracle Plattform dar, die immer mehr auf die direkte Verarbeitung, Bereitstellung und Nutzung räumlicher Informationen fokussieren. Durch den Einsatz spezieller Datentypen wie z.B. SDO_GEORASTER können nunmehr alle Arten von Geoinformationen in einer Standard-Datenbank vorgehalten werden. Darüberhinaus lassen sich unter anderem mit den bekannten Erweiterungen von Oracle Spatial vollständige GIS-Funktionalitäten bis hin zur Visualisierung und Auswertung der Daten via Webbrowser realisieren. Durch die OGC-konforme Speicherung der Daten in Oracle Spatial können aktuelle IT-technische Fragestellungen und Anforderungen an eine Serviceorientierte Architektur (SOA) für die Bereitstellung von Geoinformationen abgebildet werden.

2 Datenhaltung in Oracle Spatial

Immer mehr Datenbankhersteller erweitern ihre Objektrelationalen Datenbanken um die Fähigkeit Geodaten zu speichern, zu verwalten und zu analysieren. Ein spezielles Datenmodell, das auf einer Spezifikation (Simple Features Definition) des Open GeoSpatial Consortiums

1) Cord Albers, g.on experience gmbh, Willy-Brandt-Weg 33, 48155 Münster,
E-Mail: cord.albers@gon.de

2) Carsten Schmidt, g.on experience gmbh, Willy-Brandt-Weg 33, 48155 Münster,
E-Mail: carsten.schmidt@gon.de

(OGC) beruht, wird dazu in der Datenbank implementiert. Es stellt die notwendigen Datentypen zur Speicherung sowie umfangreiche Funktionen für die Analyse, Verarbeitung und Auswertung von räumlichen Daten bereit.

2.1 Datenspeicherung

Oracle stellt mit **Oracle Spatial** neben den Datentypen, gemäß der Simple Feature Definition des OGC, wesentliche GIS-Funktionalitäten bereit. Das Schema MDSYS ist das Datenmodell für die Abbildung der räumlichen Objekte und Funktionen [OS UGR]. Die darin enthaltenen Klassen SDO_GEOMETRY und SDO_GEORASTER sind die Geometrieklassen für die Speicherung und Verwaltung von Vektor bzw. Rasterdaten und werden somit bei der Deklaration eines Datentyps in einer Objektklasse angegeben.

Das Objekt **SDO_GEOMETRY** speichert die geometrische Beschreibung eines räumlichen Objekts in einer Zeile und einer Spalte einer Tabelle ab.

```
CREATE TABLE WEGE (
ID          NUMBER(10),          -- ID
NAME        VARCHAR2(50 BYTE),  -- Objektname
GEOM        MDSYS.SDO_GEOMETRY, -- Geometrie
CONSTRAINT PK_WEGE PRIMARY KEY (ID)); -- Primärschlüssel
```

Code 1: Erstellen einer Tabelle mit Geometriespalte

Mit diesem Datentyp können Punkte, Linien, Polygone, Rechtecke, Kreisbögen und daraus zusammengesetzte Objekte abgebildet werden.

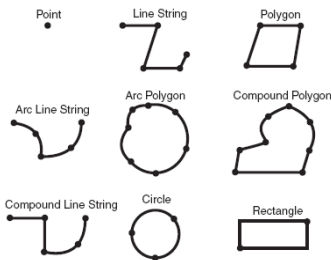


Abb. 1: von Oracle Spatial unterstützte Geometrietypen

Die Definition des räumlichen Objekts in SDO_GEOMETRY erfolgt anhand von:

- Geometrietyp
- Koordinatensystem
- Elementinformationen
- Koordinaten

Für die Abbildung von GeoRaster-Objekten hat Oracle mit der Version 10 den Bestandteil GeoRaster in das Spatial-Paket aufgenommen (BRINKHOFF). Oracle Spatial GeoRaster erlaubt eine Speicherung, Indexierung, Anfrage und Analyse von georeferenzierten Rasterobjekten. Mit

Hilfe der Klassen **SDO_GEORASTER** und **SDO_RASTER** werden Rasterobjekte gekachelt, in Farbbändern getrennt und in Bildpyramiden gespeichert.

Durch diese Art der Datenspeicherung ist es möglich nur einen bestimmten Bereich des Rasterobjekts abzufragen ohne dass der gesamte Datenbestand geladen werden muss. Darüberhinaus können unterschiedliche Kombinationen der Farbbänder ausgegeben werden, so dass aus den Ausgangsdaten für die jeweilige Anwendung zugeschnittene Daten bereitgestellt werden können.

2.2 Metadaten

Zu jeder geometrischen Objektklasse benötigt Oracle Spatial zusätzliche beschreibende Informationen. Diese Metadaten werden für die räumliche Indexierung und Operatoren benötigt. Die Speicherung der Metadaten erfolgt zentral in der Tabelle **SDO_GEOM_METADATA_TABLE** im Schema MDSYS. Die enthaltenen Informationen beschreiben in welcher Spalte, welcher Tabelle, mit welcher räumlichen Ausdehnung und in welchem Koordinatensystem die geometrischen Daten gespeichert sind.

```
INSERT INTO USER_SDO_GEOM_METADATA VALUES ( -- View auf Metadaten des Benutzers
'WEGE', -- Tabellenname
'GEOM', -- Geometriespalte
MDSYS.SDO_DIM_ARRAY( -- räuml. Ausdehnung
MDSYS.SDO_DIM_ELEMENT('X', 2465000.0, 2600000.0, 0.0005),
MDSYS.SDO_DIM_ELEMENT('Y', 5575000.0, 5700000.0, 0.0005),
MDSYS.SDO_DIM_ELEMENT('Z', 0, 0, 0.0005)),
31466); -- Koordinatensystem
```

Code 2: Erstellen von Oracle Spatial Metadaten

2.3 Räumliche Indexierung

Wie ein Index auf „normale“ Daten, wie z.B. der ID, eine Anfrage beschleunigt, führt auch eine Anfrage auf geometrische Daten durch einen räumlichen Index zu effizienteren Antwortzeiten.

```
CREATE INDEX WEGE_S1 ON WEGE(GEOM)
INDEXTYPE IS MDSYS.SPATIAL_INDEX
PARAMETERS('SDO_INDX_DIMS=2 LAYER_GTYPE="LINE"
TABLESPACE=GEOBASISDATEN_IDX');
```

Code 3: Erstellen räumlichen Index

Beim Anlegen des Index wird die räumliche Lage der Elemente durch deren minimal umschreibende Rechtecke gespeichert. Bei räumlichen Anfragen werden diese Rechtecke ausgewertet und die darin enthaltenen Objekte als Abfrageergebnis zurückgegeben.

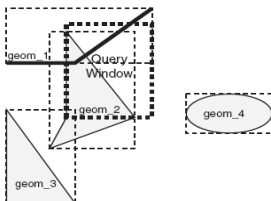


Abb. 2: räumliche Abfrage

2.4 Räumliche Funktionen

Neben der reinen Speicherung räumlicher Daten stellt Oracle Spatial u.a. mit den PL/SQL-Packages SDO_GEOM, SDO_UTIL eine Reihe an räumlichen Funktionen zur Verfügung, wie z.B.:

- Berechnung von Buffer um ein Geoobjekt,
- Bestimmung von Schnittpunkten bzw. -flächen von zwei Geoobjekten,
- Bestimmung des nächsten Nachbarn eines Geoobjekts,
- Bestimmung ob ein Geoobjekt das andere beinhaltet, berührt, schneidet oder überlappt,
- Entfernung doppelter Stützpunkte,
- Generalisierung von Linien und Polygonen,
- ...

3 Datenmigration

3.1 Datenmodellierung in Oracle Spatial

Um einen vorhanden Datenbestand nach Oracle Spatial zu migrieren, muss die vorhandene Datenstruktur (Datenmodell) in der Oracle-Datenbank abgebildet werden. Dazu müssen Objektklassen angelegt, räumliche Indizes und Verknüpfungen zwischen den Objektklassen sauber definiert werden.

Für die Migration der Daten stellen einige CAD- und GI-Systeme eigene interne Werkzeuge, z.B. in Form einer Schnittstelle, für die Speicherung in Oracle Spatial bereit. Dies hat zwar den Vorteil, dass man mit seinem vertrauten Programm arbeiten kann, birgt aber die Gefahr, dass bei der Überführung der Daten noch systemspezifische „Hilftabellen“ benutzt werden. Durch diese „Hilftabellen“ kann das jeweilige GIS effizient mit den Daten arbeiten, aber eine Nutzung durch andere Geoinformationssysteme ist gar nicht oder nur mit Einschränkungen möglich. Weiterhin kann dies eine eingeschränkte Effizienz für Datenzugriffe zur Folge haben. Um die beschriebenen Probleme zu umgehen, sollte das Datenmodell immer direkt in Oracle sauber abgebildet werden. Dadurch wird einerseits die gewünschte Konformität zur OGC-Definition sichergestellt und andererseits die systemspezifische Nutzung von Hilftabellen umgangen.

3.2 Migrationswerkzeuge

Migrationswerkzeuge von systemunabhängigen Herstellern können oftmals Daten aus unterschiedlichen CAD- und GIS-Formaten lesen, verarbeiten/manipulieren und in verschiedenen Formaten wieder speichern. Sie nutzen beim Speichern nach Oracle Spatial das vordefinierte Datenmodell und ermöglichen eine Nutzung der Daten für andere Programme.

Eines der zurzeit vielfältigsten und verbreitetsten Migrationswerkzeuge für Geodaten ist FME der Firma Safe Software aus Vancouver, Kanada, das nachfolgend kurz vorgestellt wird.

3.2.1 FME – Feature Manipulation Engine

Mit FME können geometrische- als auch alphanummerische Daten aus unterschiedlichen Quellformaten und -systemen eingelesen, manipuliert, veredelt und in unterschiedliche Zielformate und -systeme geschrieben werden.

Beim Einlesen der Daten aus den unterschiedlichen Datenformaten übernimmt FME sowohl geometrische Attribute, wie z.B. geometrische Form, Koordinatensystem, als auch die format-abhängigen Attribute, wie z.B. Ebenen-, Farb- und Größenwerte, der Datensätze. Über die in FME bereitgestellten Transformer können die Daten aufbereitet, manipuliert, transformiert und veredelt werden, um sie dann in ein anderes Datenformat zu schreiben.

Die wichtigsten Merkmale von FME sind:

- lesender und schreibender Zugriff auf mehr als 200 Datenformate, wie z.B. alphanumerische Datenformate, Raster- und Vektordaten, Datenbanken und Webservices.
- FME Workbench als grafische Oberfläche für den Aufbau eines Konvertierungsprozesses.
- 300 Transformer zur Manipulation und Neubildung von Geometrien und deren Attribute,
- Koordinatentransformation zwischen über 1000 vordefinierten Koordinatensystemen,
- Durchführung von Transformationsprozessen über eine Batch-Funktion.

Die **FME Workbench** ist das graphische Werkzeug für die Erstellung eines Datenflusses. Im FME Workbench werden die Quell- und Zieldaten, sowie die Transformer als kleine Bausteine dargestellt. Um einen Datenfluss von den Quelldaten über die Transformer zu den Zieldaten zu definieren, werden die einzelnen Bausteine mit der Maus aus der Transformerliste per drag and drop auf die Oberfläche gezogen und miteinander verbunden. Die Verbindung zwischen der Datenquelle, den Transformatoren und der Zielquelle werden durch Pfeile gekennzeichnet, die auch die Datenflussrichtung anzeigen.

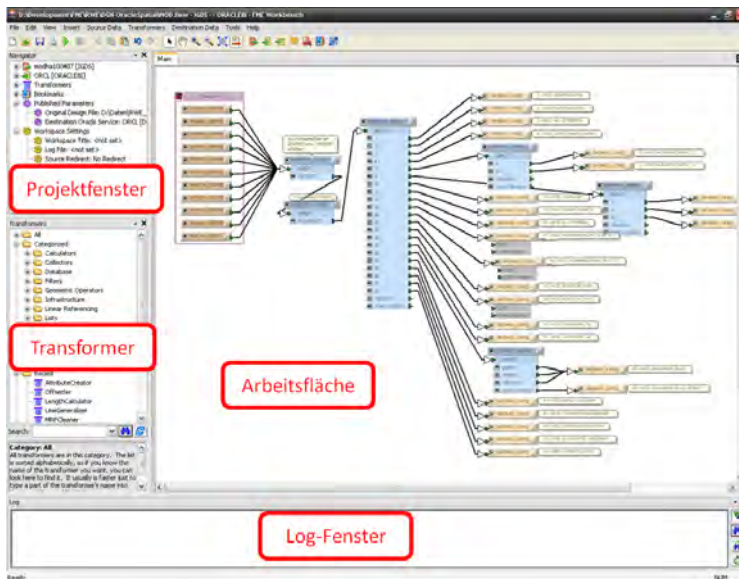


Abb. 3: FME Workbench

Der integrierte **FME Universal Viewer** bietet eine schnelle Ansicht von Daten. Er kann als Transformer in die Datenkonvertierung integriert werden und zeigt die Daten in dem jeweiligen Konvertierungsstand an. Damit können bei Bedarf visuelle Kontrollen zu jedem Zeitpunkt des Bearbeitungsprozesses durchgeführt werden.

FME stellt derzeit mehr als 300 **Transformer** für die Manipulation und Transformation von alphanumerischen-, Vektor- und Rasterdaten zur Verfügung. Für die Bearbeitung von Vektordaten sind u.a. folgende Transformer zur

- Bildung von Polygonen aus Linien,
- Durchführung von SQL-Abfragen und Verknüpfung zu Datenquellen, z.B. MS Access,
- Erstellung eines Puffers um ein einzelnes Objekt,
- Erstellung von Polygonen aus zusammenhängenden Linien,
- Erstellung topologischer Beziehungen,
- Filterung nach Attributwerten und Geometrietyt,
- Generalisierung von Linien und Polygonen,
- Verschmelzung und Verschnidung von Geometrien,

von Bedeutung, da diese eine einfache und schnelle Datenaufbereitung auch von Massendaten ermöglichen und die vorhandenen Daten in Struktur und Qualität verbessern können.

3.3 Migrationsprozess mit FME

Für die Migration von CAD-/GIS-Daten nach Oracle Spatial muss das vorhandene Datenmodell analysiert, ausgewertet und u.a. die folgenden Fragestellungen beantwortet werden. Welche Daten sollen übernommen werden? Wie sind diese Daten zurzeit definiert? Welche geometrische Form haben die Daten? Welche räumliche Ausdehnung haben sie und in welchem Koordinatensystem sind sie gespeichert bzw. sollen sie gespeichert werden? Welche Beziehungen gibt es zwischen den graphischen und alphanumerischen Daten?

Anhand dieser Informationen wird ein Datenmodell in Oracle Spatial definiert. Die einzelnen Objekttabellen mit Attribut- und Geometriespalten werden angelegt, die Oracle Spatial Metadaten gesetzt und die räumlichen Indizes erzeugt. Weiter werden die Beziehungen zwischen den Tabellen mit geometrischen und alphanumerischen Daten, z.B. für Codelisten, definiert.

Die nachfolgend stichpunktartig beschriebene Ausgangssituation, ist häufig in der Praxis bei vielen Unternehmen und Institutionen anzutreffen:

- Bisherige Datenerfassung und -pflege im CAD-Programm Microstation (Bentley).
- Einzelne Themen werden auf verschiedenen Ebenen und mit unterschiedlichen Farbwerten gespeichert (z.B. Wege als Linie auf Ebene 5 mit Farbwert 12).
- Verwendung eines lokalen Koordinatensystems – ohne führende GK-Ziffern, da das Projektgebiet räumlich auf den 2. GK begrenzt ist.
- Eine Sachdatenverknüpfung zu einer Datenbank über die MSLINK-Nummer.

Mit Hilfe von FME können anhand der o.g. Informationen die einzelnen Objektklassen bestimmt, ausgewertet und gezielt verändert werden, um eine korrekte Speicherung in Oracle Spatial zu realisieren. Dazu werden grob skizziert die nachstehenden Operationen mit FME modelliert:

Da die eingelesenen Daten keine gültigen GK2-Koordinaten haben, werden diese als erstes in gültige GK2 umgerechnet. Dazu wird ein fester Rechtswert (2.500.000) und Hochwert (5.600.000) auf die Koordinaten addiert.

Die anschließende Filterung der Attribute, wie z.B. Ebene und Farbwert, teilt die Daten in die unterschiedlichen Objektklassen auf. Zur Speicherung der Daten wird eine Oracle Spatial Zielquelle ausgewählt und die Objektklasse mit den entsprechenden Attributen definiert.

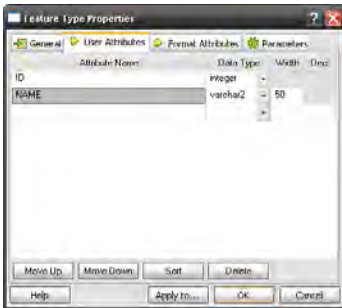


Abb. 4: Oracle Zielquelle in FME

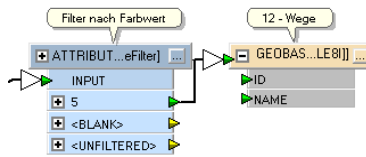


Abb. 5: FME Speicherung Oracle Spatial

3.4 Validierung

Bei der Erfassung oder Migration von räumlichen Objekten können sich kleine Fehler einschleichen, die im Sinn der geltenden Simple Feature Definition eine ungültige Objektgeometrie darstellen. So führen z.B. sich selbst schneidende Linien und Polygone, eine falsche Orientierung und eine mangelnde Objektbildung zu invaliden Geometrien (Definition einer gültigen bzw. ungültigen Geometrie siehe (OGC-SFA, OGC-SFS)).

Dem Aufspüren und der automationsgestützten Behebung von invaliden Geometrien und Objekten kommt für die Datenhaltung in Oracle Spatial eine besondere Bedeutung zu. Einerseits können invalide Geometrien zu ungewünschten Fehlermeldungen in Oracle führen und andererseits verursachen ungültige Objektgeometrien Einbußen in der Performance. Dadurch verlangsamten sich z.B. auch die Lade- und Verarbeitungszeiten der zugreifenden Systeme, so dass ein performantes Arbeiten in verteilten Umgebungen und mit einer großen Anzahl von Nutzern nicht möglich ist.

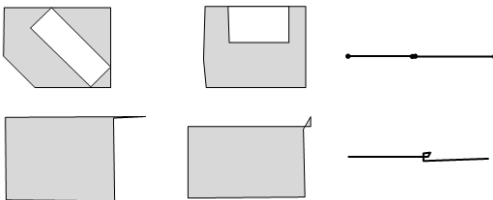


Abb. 6: Invalide Geometrien

Doch nicht nur die Gültigkeit der Geometrien ist bei der Migration zu überprüfen, ebenso muss darauf geachtet werden, dass nur die Geometrietypen in eine Objektklasse überführt werden, die dafür zugelassen sind.

3.4.1 Validierung mit FME

FME stellt für die Bestimmung invalider Geometrien und zur korrekten Speicherung der Geometrietypen verschiedene Transformer zur Verfügung. Nachfolgend werden einer für die Geometrievalidierung und einer für die Filterung nach Geometrietyp kurz vorgestellt.

Der Transformer GeometryValidator filtert gemäß der OGC-Spezifikationen (OGC-SFA, OGC-SFS) aus den eingehenden Daten die ungültigen Geometrien heraus. Dieser Filter erlaubt es, dass die Objekte mit den gültigen Geometrien weiter verarbeitet werden. Die ungültigen können in einem weiteren Prozess für eine Nachbearbeitung dokumentiert werden. Diese Dokumentation kann z.B. in einer Ausgabe der fehlerhaften Objekte in einer DGN-Datei erfolgen.

Nachdem, wie unter Kap. 3.3 beschrieben, aus den Quelldaten über die verschiedenen Filter die Daten für eine Objektklasse bestimmt wurden, kann nun eine Überprüfung des korrekten Geometrietyps erfolgen. Dazu stellt FME den Transformer GeometryFilter zur Verfügung. Dieser Filter prüft jede eingehende Geometrie auf ihren Typ und leitet sie in die entsprechenden Ausgangskanäle weiter. Da in dem o.g. Beispiel die Objektklasse 'WEGE' gefüllt werden soll, werden nur die Linienobjekte in Richtung der Zielquelle weitergeleitet. Alle anderen Objekte werden entweder nicht berücksichtigt, oder besser als Dokumentation für den fehlerhaften Geometrietyp für diese Objektklasse in einer DGN-Datei gespeichert.

3.4.2 Validierung mit Oracle Spatial

Auch Oracle Spatial stellt Funktionen zur Validierung von Geometrien zur Verfügung. In dem PL/SQL-Package SDO_GEOM wird z.B. der Inhalt einer Geometriespalte über die Funktion VALIDATE_GEOMETRY_WITH_CONTEXT auf invalide Objekte überprüft.

Das nachfolgende Beispiel validiert den Inhalt der Spalte GEOM der Tabelle WEGE. Über einen Toleranzbereich, der Distanz zwischen zwei Punkten (im Beispiel 0,005), kann die Genauigkeit der Validierung beeinflusst werden. Das Ergebnis liefert die ID der invaliden Objekte zurück.

```
SELECT ID FROM WEGE WHERE
      SDO_GEOM.VALIDATE_GEOMETRY_WITH_CONTEXT(WEGE.GEOM, 0.005) <> 'TRUE';
```

Code 4: Abfrage nach invaliden Objekten

Dieser Befehl kann auch für die Erstellung einer View verwendet werden. Wird der SQL-Befehl noch um die Rückgabe der Geometriespalte erweitert, dann kann die View auch als „neue“ Datenquelle in einem GIS verwendet werden. Somit kann bei einer manuellen Bereinigung der Originaldaten diese View zur Bestimmung der fehlerhaften Objekte genutzt werden.

3.5 Verbesserung von Daten

Da im Zuge einer Migration alle Objektklassen neu gebildet und neu strukturiert werden müssen, sollte die „alte“ Datenstruktur analysiert und kritisch hinterfragt werden. Besteht eine Verknüpfung zu Sachdaten? Wo und in welchem Format sind diese abgelegt? Wie sind die bisherigen geometrischen Objekte gebildet? Werden viele Stützpunkte und viele kleine

Liniensegmente genutzt, um eine längere Linie abzubilden? Kann durch eine Verschmelzung von Objekten die Datenkomplexität sinnvoll verringert werden? Kann durch die Verschneidung mit anderen Themen ein Thema, z.B. um weitere neue Attribute, aufgewertet werden?

Diese Fragestellungen können bei der Erstellung des Datenmodells und des Migrationsprozesses berücksichtigt werden. Durch die verschiedenen Oracle Spatial Funktionen und FME Transformer können Verknüpfungen zu Sachdaten hergestellt, Geometrien vereinfacht, Verschmelzungen und Verschneidungen durchgeführt werden.

3.5.1 Datenverbesserung mit FME

Durch die Vielfältigkeit der FME Transformer können die o.g. Fragestellungen schon während der Transformation sehr gut abgebildet werden. Der Transformer SQLExecutor führt SQL-Abfragen auf verschiedene Datenbanken, wie z.B. Oracle, MS SQLServer, MS Access, durch. In den Abfragen können auch Attribute des geometrischen Objekts, wie z.B. MSLINK, mit aufgenommen werden. Eine Generalisierung und somit Vereinfachung von Linien oder Polygonen erfolgt durch die Transformer Line- bzw. AreaGeneralizer. Um Linien oder Flächen können Buffer, z.B. als Schutzzone, über den Transformer Bufferer erstellt werden.

Zusammenhängende Objekte, die durch ihre Attribute eigentlich identisch sind, können über den Transformer LineJoiner bzw. Dissolver (für Flächen) zusammengefasst werden. Aus nicht verbundenen Linien können über eine Verlängerung der Linienden (Extender) und den daraus resultierenden zusammenhängenden, geschlossenen Linienzügen (Snapper bzw. LineCloser) die Schnittpunkte der Linien (Intersector) oder aber auch neue Polygon-Objekte (PolygonBuilder) erzeugt werden. Die räumlichen Filter, wie z.B. Matcher und SpatialFilter, stellen eine räumliche Beziehung zwischen Objekten her, so dass deren Attribut- bzw. Sachdaten miteinander ausgetauscht werden können.

3.5.2 Oracle Spatial

Die bereits gespeicherten Daten können durch die mitgelieferten Oracle Spatial Funktionen auf- und nachbearbeitet werden. Der Funktionsumfang steht denen eines herkömmlichen GIS in nichts nach. Die nachfolgenden Beispiele geben eine kleine Auswahl wieder (vergl. auch Oracle Spatial – User’s Guide and Reference (OS UGR)).

So stehen auch in Oracle Funktionen zur Vereinfachung von geometrischen Objekten, wie z.B. zur Entfernung doppelter Stützpunkte (SDO_UTIL.REMOVE_DUPLICATE_VERTICES) und zur Generalisierung (SDO_UTIL.SIMPLYFY), zur Verfügung.

Aus den bereits gespeicherten Geometrieobjekten können über folgende Funktionen neue erstellt werden. So ist es möglich einen Puffer über die Funktion SDO_GEOM.SDO_BUFFER zu erstellen, Schnittpunkte bzw. -flächen zwischen zwei geometrischen Objekten (SDO_GEOM.SDO_INTERSECTION) zu bilden. Durch die Verschneidungs- und Verschmelzungsfunktionen (SDO_GEOM.SDO_XOR, SDO_GEOM.SDO_UNION) werden neue Geometrien erzeugt, die neue zusammengefügte bzw. die Differenzflächen darstellen.

Bei den räumlichen Abfragefunktionen wie z.B. SDO_FILTER und SDO_RELATE werden die Objekte einer Objektklasse zurückgeliefert, die mit dem abfragenden Objekt in einem räumlichen Bezug, wie z.B. sich gegenseitig beinhalten, berühren, schneiden oder überlappen.

Der große Vorteil bei der Verwendung der Oracle Spatial Funktionen für die Abfrage, Analyse und Erstellung von Geometrien ist, dass sie als WHERE-Bedingung in ein SQL-Select-Statement verwendet und somit auch in eine View eingebaut werden können. Bei der Erstellung einer solchen View auf eine vorhandene Objektklasse wird eine komplett neue Datenschicht erstellt, die wiederum in ein GIS geladen werden kann. Somit kann durch eine intelligente Nutzung der Oracle Spatial Funktionen aus wenigen Ausgangsobjektklassen eine Vielzahl neuer, darauf beruhender, Objektklassen erstellt werden. Da es sich bei diesen neuen Objektklassen um Views handelt, werden sie bei einer Aktualisierung der Grundobjekte stets mit aktualisiert.

4 Ausblick

Der derzeitige Entwicklungsstand der Oracle Spatial Datenbank im Hinblick auf die Verwaltung, Analyse und Bereitstellung von räumlichen Daten und Funktionen bietet alle Möglichkeiten eines vollständigen GIS. Durch eine GIS-neutrale Modellierung der Daten direkt in Oracle Spatial kann eine zentrale Geodatenbereitstellung für Unternehmen und Institutionen auf Basis anerkannter IT-Standards realisiert werden. Da die Daten letztlich den wahren und den nachhaltigsten Wert eines jeden Systems darstellen, kommt diesem Punkt besondere Bedeutung zu.

Die zahlreichen CAD-Datenbestände können mit den beschriebenen Verfahren und Werkzeugen aufbereitet und zum großen Teil automationsgestützt in Oracle Spatial überführt werden. Mit den damit verbundenen Möglichkeiten zur Auswertung, Verknüpfung mit anderen Daten sowie der Visualisierung über entsprechende Webtechnologien werden existierende Daten veredelt und somit auch zu neuen Geodaten.

Die oben beschriebenen Ansätze und Verfahren behandeln im Wesentlichen zweidimensionale Objekte. Mit der Version Oracle 11g werden Funktionalitäten rund um die dritte Dimension, wie Dreiecksvermaschung, Oberflächen oder komplexe 3-D Objekte zur Verwaltung von Laserscannerdaten bereitgestellt. Damit wird ein weiterer wichtiger Schritt zur standardisierten Modellierung und Verarbeitung von Real-Weltobjekten beschrritten.

5 Literatur

- BRINKHOFF, T., 2003: Geodatenbanksysteme in Theorie und Praxis, Wichmann Verlag 2005
FME: Homepage Safe Software: <http://www.safe.com>
FMEDIA: Homepage fmepedia – FME-Userforum: <http://www.fmepedia.com>
OPEN GEOSPATIAL CONSORTIUM, 2006: Simple Feature Access Specification, Part 1: Common architecture, Version 1.2.0 (OGC-SFA)
OPEN GEOSPATIAL CONSORTIUM, 2006: Simple Feature Access Specification, Part 2: SQL option, Version 1.2.0 (OGC-SFS)
ORACLE, 2003: Oracle Spatial Best Practices – An Oracle Technical White Paper (OS TWP)
ORACLE, 2007: Oracle Spatial 11g Advanced Spatial Data Management for Enterprise Applications - An Oracle White Paper (OS ASDM)
ORACLE, 2005: Oracle Spatial – User’s Guide and Reference 10g Release 2 (OS UGR)
KOTHURI, R.; GODFRIEND, A. & EURO, B., 2004: Pro Oracle Spatial, Apress

Integration von Fernerkundungsdaten in nationale und europäische Dateninfrastrukturen

Ableitung von CORINE Land Cover-Daten aus DLM-DE

STEPHAN ARNOLD & ANDREAS BUSCH¹

1 Hintergrund des Projektes

Eine der Hauptaufgaben des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie (BKG) ist es, die kartographische Grundversorgung der Bundeseinrichtungen zu gewährleisten. In diesem Zusammenhang hat das BKG das Konzept eines Digitalen Landschaftsmodells für die Zwecke des Bundes (DLM-DE) entwickelt. Wichtigstes Ziel ist die Integration topographischer Basisdaten und thematischer Fachdaten entsprechend der Grundsätze der INSPIRE-Richtlinie. Dieser Beitrag widmet sich der Integration von Informationen zur Landnutzung und Landbedeckung, die aus Fernerkundungsdaten gewonnen wurden, in das DLM-DE.

Die Mitgliedstaaten der EU und deren Nachbarstaaten beteiligen sich gemeinsam mit der Europäischen Kommission (EC), der Europäischen Umweltagentur (EEA) und der Europäischen Raumfahrtagentur (ESA) an der Aktualisierung von CORINE Land Cover (CLC) 2006. Das Umweltbundesamt (UBA) ist in Deutschland nationale Ansprechstelle und koordiniert in dieser Funktion die Entwicklungen zu CLC. Aufgrund ihrer überregionalen und länderübergreifenden Vergleichbarkeit fanden CLC-Daten im Laufe der Zeit immer mehr Anwendung auch auf lokaler/kommunaler Ebene. Damit einher gingen gesteigerte Anforderungen der breiten Nutzergemeinschaft an CLC-Daten hinsichtlich ihrer räumlichen und zeitlichen Auflösung.

Da diese Anforderungen durch die Nutzung der vorhandenen topographischen Basisdaten kostengünstiger erfüllt werden können, arbeiten UBA und BKG in einem entsprechenden Projekt zusammen. In diesem Rahmen wollen UBA und BKG, unterstützt vom Deutschen Fernerkundungsdatenzentrum (DFD) des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR), die CLC-Aktualisierung zukünftig effizienter bei gleichzeitig höherer räumlicher Auflösung und Genauigkeit im Gegensatz zur herkömmlichen EEA-Methodik des CLC-Updates durchführen. Das DLM-DE beruht auf der Struktur und den Daten des ATKIS-Basis-DLM (erhoben die durch Landesvermessung) und soll in Zukunft - neben aktuellen Satellitendaten als Hauptinformationsquelle - für die Erstellung des CLC-Datensatz verwendet werden.

¹ Stephan Arnold und Andreas Busch, Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, Richard-Strauss-Allee 11, 60598 Frankfurt/Main; Email: stephan.arnold@bkg.bund.de

2 Ausgangssituation und Vorbereitungen

Das CLC-Datenmodell ist auf Anwendungen in kontinental-europäischer Dimension ausgerichtet. ATKIS-Daten hingegen finden hauptsächlich auf lokaler und regionaler Ebene Anwendung. Dabei steht das ATKIS-Datenmodell mit einer höheren räumlichen Auflösung und einer größeren Anzahl von Objektarten mit z.T. breiter gefassten Definitionen der CLC-Nomenklatur mit einer geringeren räumlichen Auflösung und weniger Landbedeckungsklassen mit z.T. enger gefassten Definitionen gegenüber.

2.1 Semantische Transformation von ATKIS-Objektarten nach CLC-Klassen

Um die vollständige Ableitung von CLC-Daten aus dem DLM-DE zu ermöglichen, wurde seitens des BKG die Nomenklatur des ATKIS-Objektartenkatalogs (OAK) auf ihre semantische Kompatibilität mit der CLC-Nomenklatur hin überprüft und entsprechend modifiziert bzw. durch bisher nicht vorhandene Objektarten erweitert. In Tab. 1 ist auszugsweise die Zuordnung von ATKIS-Objektarten zu CLC-Klassen aufgelistet, inklusive zu verwendender Zusatzinformationen.

Tab. 1: Semantische Ableitung von CLC-Klassen aus ATKIS-Objektarten, Auszug Transformationstabelle

ATKIS DLM-DE					Zusatzdaten	CLC2000	
Code	Objektart	Attribut	Attributwert	Beschreibung	z.B. GSE, FTS	Code	Klassenname
2111	Wohnbaufläche	offene Bebauung (BEB)	1000	offen	Versiegelung < 80%	112	Nicht durchgängig städtische Prägung
			9997	Attribut nicht anwendbar	Versiegelung > 80%	111	Durchgängig städtische Prägung
2112	Industrie- und Gewerbefläche					121	Industrie- und Gewerbeflächen

2.2 Test-Ableitung von CLC-Daten mit Hilfe DLM50.1-Datensatz in ArcGIS

Für einen Testlauf zur Ableitung von CLC-Daten aus ATKIS-Objekten für ganz Deutschland wurden die Daten des DLM50.1 verwendet, welches eine einfachere Datenstruktur und geringere Datenmenge aufweist. Die Testableitung wurde mit ArcGIS durchgeführt und visualisiert. Tab. 2 zeigt den prozentualen Anteil der ATKIS-Objekte, die nach der vorläufigen semantischen Transformation eindeutig einer CLC-Klasse zugeordnet werden konnten, aufgelistet nach Bundesländern².

Tab. 2: Eindeutig ableitbare CLC-Flächenobjekte aus dem DLM50.1 in % nach Bundesländern²

SH	HH	NI	NW	RP	SL	HE	BW	BY	MV	BB	ST	TH	SN
98,4	87,2	68,7	91,1	99,1	84,8	98,2	78,4	97,6	97,9	96,7	98,2	79,7	97,7

² Die ATKIS-Daten des DLM50.1 von Bremen sind in Niedersachsen (NI), die Daten von Berlin in Brandenburg (BB) enthalten.

Die statistische Analyse des Tests ergab, dass der Anteil von eindeutig nach CLC-Klassen zuordenbaren ATKIS-Objekten in acht von 14 Bundesländern über 90 Prozent liegt. Die z.T. deutlichen Abweichungen der Werte in den einzelnen Bundesländern sind u.a. mit dem unterschiedlichen Aktualitätsstand der Attributierung in den Länder-Datensätzen zu erklären.

2.3 Geometrische Übereinstimmung von ATKIS und CLC

Beim Vergleich der verwendeten Daten des DLM50.1 mit dem schon bestehenden Datensatz CLC2000 hinsichtlich ihrer geometrischen Übereinstimmung zwischen den Objekten der beiden Datensätze traten erwartungsgemäß einige, z.T. deutliche Abweichungen auf. Die Gründe hierfür sind u.a. Unterschiede bezüglich der Objekterfassungsregeln, der semantischen Definitionen der Objektarten bzw. CLC-Klassen und vor allem der Mindestkartierflächen (MKF), wie in Abb. 1 und Abb. 2, ausschnittsweise dargestellt am Beispiel Ladenburg am Neckar, zu erkennen ist.

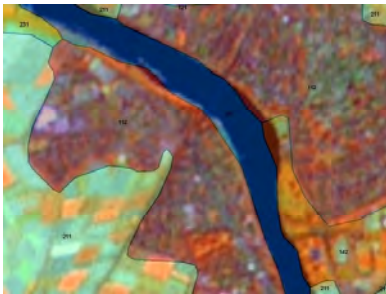


Abb. 1: CLC 2000 über Image 2000 (LANDSAT 7)

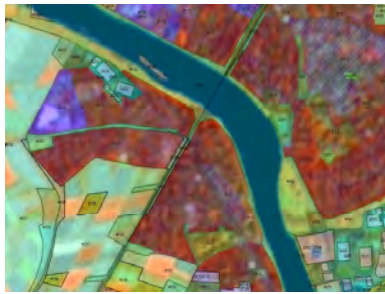


Abb. 2: ATKIS DLM50.1 (aggregiert³) über Image 2000 (LANDSAT 7)

2.4 Erweiterung des DLM-DE-Objektartenkatalogs

Die Hauptaufgabe des gemeinsamen Projektes von UBA und BKG ist es, CLC-Daten weitestgehend automatisch aus dem DLM-DE abzuleiten. Je nach Bundesland ist in manchen Fällen jedoch eine direkte Ableitung aus bereits genannten Gründen (Unterschiede in Erfassungsregeln, Definitionen der Objektarten/Klassen, MKF) noch nicht ohne zusätzliche Informationen oder Regeln möglich. Daher müssen nach den vorangegangenen Überlegungen zur semantischen Transformation bisher fehlende oder abweichende CLC-Definitionen in den OAK des DLM-DE integriert werden durch

- Erstellung neuer Objektarten,
- Einführung zusätzlicher Attribute in bereits existierende ATKIS-Objektarten,
- Verwendung bestehender Attribute als CLC-Klasse und
- Aggregierungsregeln von ATKIS-Objekten bei komplexen CLC-Klassen.

³ Flächen gleicher benachbarter Objektarten wurden zusammengefasst.

3 Aktualisierung des DLM-DE und Erfassung zusätzlicher CLC-relevanter (neuer) Objektarten

Für das Bezugsjahr 2006 sollen im laufenden Vorhaben nach vollendeter Erweiterung des OAK die Geometrien des DLM-DE überprüft und bei Bedarf aktualisiert werden, um daraus in der Folge den CLC Update 2006 abzuleiten. Daher sollen für flächenhafte, die Landnutzung und Landbedeckung betreffende Objektarten aus dem DLM-DE für gesamt Deutschland die Veränderungen der bestehenden Geometrien sowie die Geometrien neuer CLC-relevanter Objektarten in einem separaten „Veränderungs-Layer“ erfasst werden.

Datengrundlage der Bildinterpretation wird das Mosaik Image2006 (SPOT 4/5) sein. Zum Vergleich werden im Zweifelsfall die Bilder des Mosaiks Image2000 (LANDSAT 7) herangezogen. Weiterhin sollen Informationen aus den beiden FTS-Layern *Built-up Area and Soil Sealing* und *Forest* in die Aktualisierung des DLM-DE mit einfließen.

Um die Durchführbarkeit dieses Ansatzes zu prüfen, wird derzeit im Auftrag des BKG vom DLR eine Machbarkeitsstudie durchgeführt. Aus Gründen mangelnder Verfügbarkeit wurden während der Testphase beim DLR alternativ zum FTS Soil Sealing Layer die Daten des REFINA-Projektes⁴ verwendet. Zur Interpretation und Objekterkennung wurden SPOT PAN-Daten (2,5 x 2,5 m²) eingesetzt, deren räumliche Auflösung für die Zwecke des DLM-DE als ausreichend betrachtet wird. Für das Testgebiet Dresden wurden zusätzlich Daten aus der DeCOVER-Testproduktion⁵ hinzugezogen.

4 Zusammenfassende Bewertung der Vorgehensweise

Der vorgestellte Ansatz beinhaltet eine koordinierte Erfassung der Landbedeckungsinformation für Deutschland. Vorteile und Synergien sind

- die Ausrichtung auf künftige, höher aufgelöste Datensätze,
- erhebliche Kostenersparnis unter Ausnutzung vorhandener Dienste und Daten, wie das hier beschriebene DLM-DE des BKG, wenn möglich auch weiterer Erhebungen sowie neuer GMES-Entwicklungen bei der Ableitung von CLC,
- die Berücksichtigung von Datensatzdifferenzen bedingt durch einen Methodenwechsel bei der CLC-Erstellung (Vgl. herkömmliche EEA-Methode zu Ableitung aus DLM-DE),
- die Interoperabilität von topographischen Basisdaten und Landbedeckungsdatensätzen,
- die Integration in Geodateninfrastrukturen entsprechend der Prinzipien der INSPIRE-Richtlinie und
- die damit verbundene bessere, kostengünstigere Nutzbarkeit in der Bundesverwaltung und der EU.

⁴ „Forschung für die Reduzierung der Flächeninanspruchnahme und ein nachhaltiges Flächenmanagement“, <http://www.refina-info.de/>

⁵ <http://www.de-cover.de/>

Neue Geodaten müssen passen! Datenintegration am Beispiel von Adressdaten

RICHARD GRASSE¹⁾

Einleitung

Über 80% aller Informationen haben Raumbezug, davon wird ein Großteil über die postalische Adresse verortet. Die genaueste geographische Referenz stellt hierbei die gebäudescharfe Information mittels Adressdaten dar.

Durch den enormen Bedarf an solchen bundesweiten Daten wurde das Projekt „Georeferenzierte Adressdaten – Bund“ (GAB) beim Bundesamt für Kartographie und Geodäsie initiiert.

Der GAB ist in seiner Vollständigkeit und Qualität einzigartig, da unterschiedliche Datenbestände aus unterschiedlichen Quellen zusammengeführt und abgeglichen werden. Es handelt sich hierbei um einen bundesweiten, homogenisierten Adressdatensatz mit hochgenauem Lagebezug.

Datenquellen und Referenzdateien für den neuen Datensatz „Georeferenzierte Adressdaten-Bund“ (GAB)

Start des Projektes Georeferenzierte Adressdaten – Bund war im Jahre 2002. Nach zahlreichen Datenanalysen und Tests verschiedener Datenanbieter hat sich das BKG, nicht zuletzt aus lizenzrechtlichen Gründen, für Daten der Gemeinschaft zur Verbreitung von Hauskoordinaten (GVHK) der Länder und für Daten vom Institut für angewandte Sozialwissenschaft (infas), als primäre Datenquellen, entschieden.

Zur Erstellung der GAB-Daten findet ein Datenabgleich über folgende Referenzdatenbestände statt:

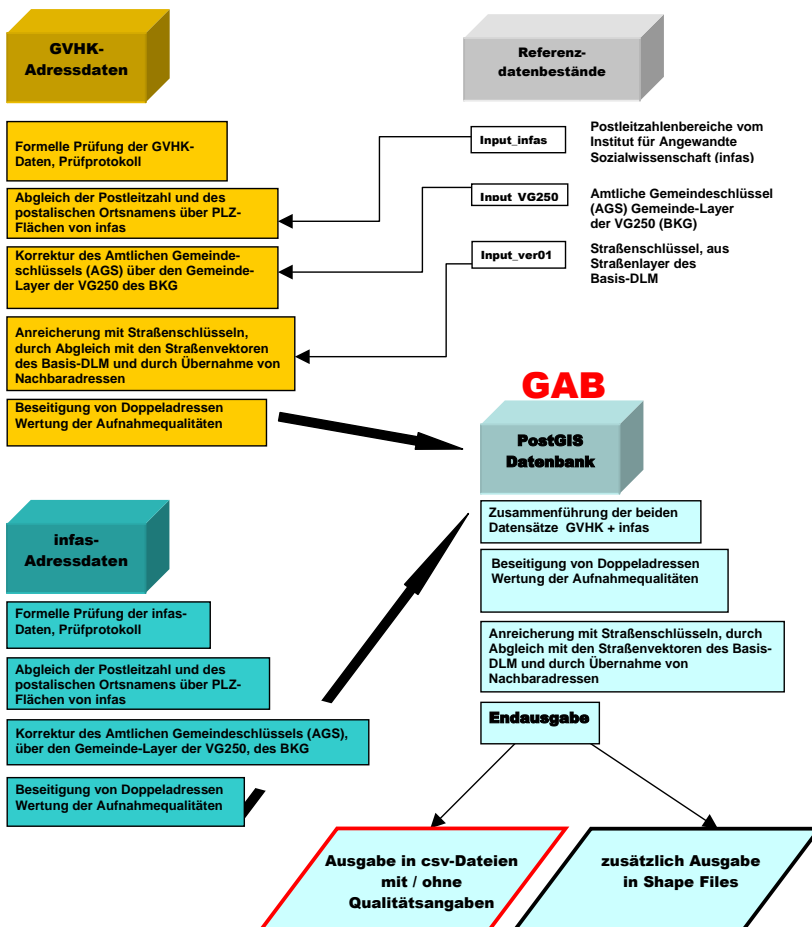
- Abgleich der Postleitzahl (PLZ) und des postalischen Ortsnamens (ORT) über die Postleitzahl-Flächen des Instituts für angewandte Sozialwissenschaft (infas).
- Abgleich des Amtlichen Gemeindegrenzen (AGS) über den Gemeindegrenzenlayer der Verwaltungsgrenzen 1: 250.000 (VG250) des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie (BKG).
- Anreicherung von Straßenschlüsseln aus dem Straßenlayer des Basis-DLM und von Nachbaradressen der GVHK.

Verfahrensablauf zur Erstellung des Datensatzes „Georeferenzierte Adressdaten-Bund“ (GAB)

Seit der Projektinitiierung ist durch ständige Verfahrensentwicklung und Verbesserung folgender Verfahrensablauf entstanden.

Der Verfahrensablauf stellt ein klassisches Beispiel moderner Geodatenintegration dar.

¹⁾ Bundesamt für Kartographie und Geodäsie,



Die gelieferten Adressdaten werden zunächst auf formelle Richtigkeit überprüft.

Danach erfolgt, der Abgleich der PLZ und Ortsnamen.

Im nächsten Schritt werden die Amtlichen Gemeindegrenschlüssel (AGS), über den Gemeindegrenschlüssel-Layer der Verwaltungsgrenzen 1: 250.000 (VG250)des BKG, abgeglichen.

Des Weiteren erfolgt die Anreicherung mit Straßenschlüsseln durch Abgleich mit den Straßenvektoren des Basis-DLM oder durch Übernahme von Nachbaradressen.

Durch Zusammenführung beider Datensätze (GVHK + infas) entsteht der neue Datensatz „Georeferenzierte Adressdaten-Bund“ (GAB).

In diesem, durch Datenzusammenführung neu geschaffenen Datensatz, werden wiederum die Straßenschlüssel abgeglichen, da in diesem Stadium infas-Daten Straßenschlüssel von GVHK-Nachbaradressen annehmen können.

Danach werden doppelt vorhandene Adressen eliminiert. Als Qualitätskriterium wird hierbei das Attribut „Q“ (Qualität der georeferenzierten Gebäudeadresse) verwendet.

Im GAB Datenbestand existieren folgende Erfassungsqualitäten

A = Koordinate liegt sicher innerhalb der Gebäudefläche	GVHK
B = Koordinate liegt sicher innerhalb der Flurstücksfläche, auf der das Gebäude steht	GVHK
T = Koordinate liegt sicher innerhalb der Gebäudefläche	infas
I = Interpolierte Koordinate	infas

Werden in einem Untersuchungsradius von 300 Meter Adressen mit identischer Postleitzahl, Straßename, Hausnummer und Hausnummerzusatz entdeckt, gelten folgende Auswahlkriterien:

- A eliminiert B, T, I, d.h. A bleibt erhalten
- T eliminiert B, I, d.h. T bleibt erhalten
- B eliminiert I

Der aktuelle GAB (Stand Januar 2008) enthält 22,3 Mio. Adressen. Davon sind 19,7 Mio. Adressen von den Ländern (GVHK) und 2,6 Mio. Adressen vom Institut für angewandte Sozialwissenschaft (infas) übernommen worden. Somit steht mit den GAB ein vollständiger, hochgenauer und bundesweiter Adressdatensatz zur Verfügung, der den hohen Anforderungen der heutigen Informationsgesellschaft genügt.

Das BKG hat die Adressdaten der GVHK und des Instituts für angewandte Sozialwissenschaft für die Bundesverwaltung lizenziert. Der GAB steht daher ausschließlich Bundesbehörden zur Verfügung.

Low-cost UAV's in der Land- und Forstwirtschaft – Eine vergleichende Untersuchung von zwei Mini-UAV's

GÖRRES GRENZDÖRFFER¹, ANGELA ENGEL² & KAI JÜTTE³

Zusammenfassung: Mini- oder Micro-UAV's mit einem Gewicht unter 5 kg, sind als Träger von bildgebenden Systemen vielfältig für land- und forstwirtschaftliche Zwecke einsetzbar, da Flüge mit ihnen gegenüber herkömmlichen Luftbildbefliegungen für kleine Gebiete flexibler und wetterunabhängiger durchführbar sind. Praktische Tests mit zwei verschiedenen Systemen an verschiedenen Orten zeigten, dass einerseits die beiden untersuchten Systeme in der Lage waren flächendeckende Luftbildaufnahmen zu erzeugen, andererseits war der Nachbearbeitungsaufwand, um von Bildern zu photogrammetrisch verwertbaren Informationen zu kommen, obschon des großen Potentials, noch sehr groß. Dies ist in erster Linie darauf zurückzuführen, dass den Herstellern bzw. Entwicklern der UAV's die Bedeutung der speziellen Anforderungen der Photogrammetrie, z.B. metrisch hochwertige Kamera, systematische Bildaufnahme, präzise Näherungswerte der äußeren Orientierung etc. noch nicht bewusst war.

1 Einleitung

Der Bedarf an hochauflösenden und aktuellen Luftbildern, die in einem Geo-Informationssystem eingebunden und verarbeitet werden, nimmt ständig zu. Die Georeferenzierung, der auf verschiedene Art und Weise und mit unterschiedlichen Genauigkeiten und Aufwand realisiert werden kann, ist zwingend notwendig, um die fernerkundlichen Informationen mit anderen Daten raumbezogen zu verknüpfen und analysieren zu können.

Flugzeuggetragene klassische und digitale Luftbildsysteme sind allerdings bei kleineren Gebieten sehr teuer und durch die große Wetterabhängigkeit nicht flexibel genug. Dies trifft für land- und forstwirtschaftliche Anwendungen im Besonderen zu. Hier ist gerade eine hohe zeitliche Auflösung sehr wichtig, z.B. zur Ermittlung der aktuellen Biomasse oder zur aktuellen Erkennung von Forstschädlingen.

Ein wesentlicher Schritt hin zu zivil / militärisch verwertbaren Lösungen unbemannter Fluggeräte ist die Entwicklung von miniaturisierten autonomen Steuerungen, die per GPS und inertialer Messtechnik eine selbstständige Flugführung ermöglichen. Nur über den programmierbaren Autopiloten können systematische und koordinatenbezogene Aufnahmen gemacht werden, da bei einem vom Boden aus gesteuerten Modellflugzeug die Navigation und Auslösesteuerung auch über eine Videovorschau nie systematisch sein kann.

Jedoch ist der spezielle Aufwand ein UAV für fernerkundliche bzw. photogrammetrische Zwecke einzusetzen für viele potentielle Nutzer zu groß, da es bisher an die jeweilige Fragestellung angepasste hardwareseitiger Entwicklungen bedarf bzw. methodische Untersuchungen fehlen, um die richtige Lösung zu finden.

¹ Dr.-Ing. G. Grenzdörffer, Universität Rostock, Institut für Management ländlicher Räume, J.-v.-Liebig Weg 6, 18059 Rostock, email: goerres.grenzdorffer@uni-rostock.de

² Dipl. Ing. (FH) Angela Engel, email: Angela.Engel@gmx.de

³ Dipl. Ing. (FH) Kai Jütte, Landesforst Mecklenburg-Vorpommern, Betriebsteil Forstplanung, Ver-suchswesen, Forstliche Informationssysteme, Sachgebiet: Fernerkundung, Zeppelinstraße 3, 19061 Schwerin, email: Kai.Juette@lfoa-mv.de

2 Anwendungspotentiale

Die im Wesentlichen vom Militär getriebene Entwicklung (>80 %) der UAV's mündet seit wenigen Jahren auch im zivilen Sektor in viele Forschungsaktivitäten (UAS, 2007). In der Bundesrepublik wird – neben den USA, Frankreich, England, Schweden und Israel am intensivsten an der Entwicklung von UAV's gearbeitet. Aufgrund der technologiegetriebenen (militärischen) Entwicklung der letzten Jahre haben sich UAV's für zivile fernerkundliche Anwendungen trotz eines großen Potentials aus verschiedenen Gründen noch nicht durchsetzen können. Einige wichtige Gründe seien hier genannt:

- Die vorhandenen Systeme sind in ihrer Bedienung am Boden und in der Luft zu komplex und erfordern einen hohen Einarbeitungs- und Wartungsaufwand.
- Die standardmäßig an den Fluggeräten montierten (Video)Kameras sind vielfach für eine visuelle Auswertung und Objekterkennung z.B. mit Zoomfunktion ausgestattet und nicht geometrisch kalibriert, d.h. eine nachträgliche geometrische bzw. radiometrische Auswertung und Mosaikierung der Bilder ist nicht oder nur sehr aufwendig möglich.
- Die Positions- und Lagebestimmung von Micro- und Mini-UAV's in der Luft ist für die Navigation des Fluggeräts optimiert (möglichst leicht und bezahlbar!), aber nicht für eine automatische direkte Orientierung der Bilder ausreichend. Allerdings muss an dieser Stelle erwähnt werden, dass die für eine automatische hochgenaue photogrammetrische Anwendung benötigten Navigationseinheiten um den Faktor 200 besser sein müssten. Eine solche Genauigkeitssteigerung ist unter den gegebenen Rahmenbedingungen (minimales Gewicht und Kosten) nicht zu erwarten. Deshalb müssen alternative photogrammetrische Verfahren entwickelt bzw. genutzt werden.
- Die Micro und Mini UAV's sind in der Regel zu teuer (15.000 – 200.000 €), um sie z.B. in der landwirtschaftlichen Beratungspraxis als Dienstleistung einzusetzen. Erst bei preiswerten Systemen, die speziell an die jeweiligen Bedingungen angepasst sind, ist mit einer größeren Verbreitung zu rechnen.

2.1 Rechtliche Rahmenbedingungen

Für zivile Anwendungen werden in der Regel so genannte Micro-UAV's eingesetzt. Ein Micro UAV ist gemäß der UAS ein Fluggerät mit einem Gewicht unter 5 kg, einer Flugzeit von < 1 h und einer Reichweite von < 10 km. Ein Mini-UAV ist ein Fluggerät mit einem Abfluggewicht bis 30 kg, einer Flugzeit von < 2 h und einer Reichweite von < 10 km (UAS, 2007). In Deutschland, wie auch auf internationaler Ebene, existieren zurzeit noch keine Zulassungsbestimmungen für autonom operierende UAV's. Deshalb ist ihr Betrieb (zumeist militärisch) derzeit ausschließlich innerhalb von Flugbeschränkungsgebieten möglich, wenn diese Lufträume hierfür genutzt werden dürfen und der UAV-Betreiber diesen Luftraum "exklusiv" nutzt, um eine Gefährdung anderen Luftverkehrs auszuschließen. Ein Ausweg besteht, wenn UAVs nach den einschlägigen Bestimmungen für Modellflug (§16, 16a LuftVO) als Flugmodelle deklariert werden können. Dieses ist natürlich im Grundsatz nur dann zulässig, wenn auch alle Auflagen für "Flugmodelle" erfüllt sind. Im Einzelnen bedeutet das, eine erlaubnisfreie Nutzung des unkontrollierten Luftraums (Luftraum (F)-G) ist bei einem Gesamtgewicht < 5 kg, mit Verbrennungsmotor in einer Entfernung von mehr als 1,5 Kilometern von Wohngebieten und Flugplätzen möglich ist. Gleichzeitig heißt das auch, dass ein exklusiver autonomer Betrieb oder Betrieb außerhalb der Sichtweite des Piloten unzulässig ist. Dies ist darauf zurückzuführen, dass im Sichtflug das Prinzip "See and Avoid" (sehen und ausweichen, oder sehen und gesehen werden) gilt. Dieses Prinzip bzw. eine intelligente Flugführung kann

von den marktüblichen UAV's noch nicht erfüllt werden. Deshalb muss beim Einsatz eines UAV's jederzeit eine manuelle Eingriffsmöglichkeit des Piloten bestehen.

Fazit: Im ländlichen Raum können UAV's bis in einer Höhe von 300 m (1.000 ft) recht problemlos eingesetzt werden. Die relative geringe Flughöhe bedeutet allerdings auch, das bei einem Bildflug viele Einzelaufnahmen entstehen, die möglichst effizient verarbeitet, d.h. mit hinreichender Genauigkeit georeferenziert werden müssen. So deckt, z.B. eine Weitwinkel-aufnahme aus 300 m Entfernung gerade einmal eine Fläche von $200 * 300$ m ab.

2.2 Anwendungsfelder

In der Forstwirtschaft gibt es mehrere Schwerpunkte für den Einsatz von UAV's:

- Überwachung des Waldgesetzes, als Beweismittel bei Verstößen
- Beweismittel bei Rückforderungen von Förderungen (Erstaufforstung)
- Monitoring im Forstschutz
- Überwachung und Dokumentation von Veränderungen in Naturwaldreservaten

Alle Einsatzgebiete sind gekennzeichnet durch eine relative geringe Flächenausdehnung von unter 1.500 ha und die Notwendigkeit einer schnellen Verfügbarkeit der Daten. Die Anforderungen an die Lagegenauigkeit sind vergleichsweise gering, d.h. < 1 m.

In der Landwirtschaft liegen die möglichen Einsatzschwerpunkte unter anderem in folgenden Bereichen:

- Feldversuchswesen und Forschung, z.B. ANNEN & NEBIKER, 2007
- Dokumentation der erbrachten Arbeit zur Qualitätssicherung, Einhaltung gesetzlicher Vorschriften (Abstandsregeln etc.) und zur Darstellung zusätzlicher Aufwendungen (Abrechnung von Dienstleistungen).
- Precision Farming, z.B. Ermittlung der Verunkrautung für gezielte teilflächenspezifische Herbizidanwendungen zur Reduzierung des Einsatzes von Pflanzenschutzmitteln oder teilflächenspezifischer Fungizideinsatz im Kartoffelanbau zur Reduzierung des Einsatzes von Pflanzenschutzmitteln, z.B. REIDELSTÜRZ et al., 2007
- Abreifemonitoring von Getreide und Mais zur Ernte- und Logistiko Optimierung

3 Stand der Forschung

Allerdings sind bestehende preiswerte UAV's noch nicht in der Lage die oben genannten Anforderungen und die Anwendungspotenziale vollständig zu befriedigen. In den letzten Jahren sind UAV's nur sehr sporadisch in das Blickfeld zivil genutzter Photogrammetrie gelangt. Die Ansätze und Ergebnisse unterschieden sich stark in Abhängigkeit des verwendeten UAV und der jeweils an Bord befindlichen Sensorik, d.h. digitale Kamera und GPS/INS, z.B. EISENBEISS et al., 2005, HAARBRINK & KOERS, 2006. Je nach der Genauigkeit des GPS und des inertialen Messsystems (INS) können die Daten im Rahmen einer Aerotriangulation unterschiedlich intensiv zur Automation und zur Genauigkeitssteigerung genutzt werden. Generell gilt, um die GPS-Signale als ausschließliche Referenz im Rahmen einer Aerotriangulation zu verwenden, ist eine Zentimeter/(Dezimeter) Genauigkeit erforderlich, z.B. GRENZDÖRFFER, 2006. Dies ist zurzeit nur mit einem geodätischen 2-Frequenz GPS-Empfänger mit Postprocessing realisierbar. Zukünftige Möglichkeiten können sich im Rahmen von Galileo ergeben. Die größten Schwierigkeiten in der photogrammetrischen Verarbeitung von einzelnen Bildern und Bildverbänden eines Micro-UAV sind:

- Unsystematisch aufgenommene bzw. verkippte Bilder, die z.B. bei windigen Verhältnissen oder durch eine unzureichende Stabilisierung der Kamera hervorgerufen werden. Um dennoch eine komplette photogrammetrische Abdeckung zu erhalten, muss die Längs- und Querüberlappung großzügig (z.B. 70 / 40 % statt 60 / 25 %) gewählt werden.
- Veränderungen in der inneren Orientierung der Kamera zwischen und vor allem während eines Bildflugs.
- Keine oder nur sehr ungenaue Startwerte des GPS/INS für eine Aerotriangulation.
- Schwierigkeiten in der Passpunktbestimmung (Anzahl, Genauigkeit, Verteilung).

4 Praktischer Systemvergleich zweier Drohnen

Ein Schwerpunkt des Beitrags liegt in der Vorstellung eines praktischen Vergleichs zweier Systeme, den ENGEL, 2007 in ihrer Diplomarbeit durchgeführt hat.

4.1 Modellflugzeug „Carolo P330“

Die Mavionics GmbH entwickelt und vertreibt autonome Fluggeräte für alle Anwendungsbereiche. Darunter auch das UAV-System „Carolo P330“, das für die Tests zum Einsatz kam (Abbildung 1). Das UAV besteht aus der Flugzelle selbst, dem Mavionics Autopilotensystem inklusive Datenverbindung, der Mission Control Software (MCS) und einer Fernsteuerung. Die Fernsteuerung dient dem manuellen Flug.



Abbildung 1: UAV „Carolo P330“

4

Angetrieben wird die Flugzelle durch einen bürstenlosen Elektromotor. Standardnutzlast ist eine preiswerte digitale Fotokamera (Canon Powershot S60). Die technischen Parameter des Modellfliegers sind vergleichend in *Tabelle 1* dargestellt.

Die Funktionsweise und die nötigen Arbeitsschritte für photogrammetrische Flüge sind in drei Teilschritten darstellbar. Zu Beginn wird das zu befliegende Gebiet als Ausschnitt einer georeferenzierten Karte in die Mission Control Software (MCS) eingefügt. Als nächstes werden die Flugstreifen mit den nötigen Angaben über Streifenabstand, Flughöhe und Fluggeschwindigkeit von der MCS generiert. Jeder Flugstreifen besitzt von dort an so genannte „Way Points“, welche das UAV Punkt für Punkt abfliegt. Ist das Ende eines Flugstreifens erreicht, wird der Abstand, der zwischen den beiden benachbarten Flugstreifen liegt, als Radius geflogen. Hierbei kann es bei dicht nebeneinander liegenden Streifen zu Problemen führen, da der zu erfliegende Kurvenradius direkt an den Rollwinkel um die Längsachse (x-Achse) des Flugzeugs in Flugrichtung gekoppelt ist. Um ein Abstürzen des Modellflugzeugs zu verhindern, ist der Winkel von der MCS auf 30° begrenzt, was direkt den minimalen Kurvenradius beschränkt. Zudem verliert der Modellflieger bei stark abgekippter Lage möglicherweise GPS-Satellitensignale, welches die autonome Flugführung beeinträchtigt.

Das in dem Autopiloten angebrachte GPS-Modul der Firma U-Blox⁵ lässt einerseits die Navi-

⁴ www.mavionics.de

gation bei den Missionen zu, andererseits liefert es die Koordinaten für die Bildmittelpunkte. Hierfür erfolgt eine kontinuierliche Aufzeichnung der GPS-Daten, die später mit den Zeitstempeln der gespeicherten Bilddaten abgeglichen und zugeordnet werden. Das inertielle Sensorsystem des Autopiloten misst die Drehgeschwindigkeit und translatorische Beschleunigung, die dann mit den GPS-Daten gekoppelt zu einer Lageinformation verarbeitet werden (sog. Inertial Navigation System INS). Damit sind genäherete äußere Orientierungsparameter für jedes einzelne Bild verfügbar. Das Start- und Landemanöver wird noch manuell gesteuert. Nachdem die Auslösung der Kamera eingestellt worden ist, lenkt der Pilot mit der Fernsteuerung den Flieger auf den gewünschten Kurs. Über einen Laptop kann der Navigator den Flug am Bildschirm verfolgen und dem Piloten Richtungsanweisungen vorgeben. Sobald sich das UAV auf ungefähre Höhe und Lage befindet, wird die Steuerung an die Software übergeben. Nachdem alle notwendigen Streifen befliegen und die Bilder aufgenommen worden sind, wird der Flieger mit manueller Führung zum Boden gesteuert.

4.2 Low-cost Drohne „Susi“

Die von der französischen Firma ABS Aérolight hergestellte low-cost Drohne namens „Susi“ bietet für den Landesforst Mecklenburg Vorpommern weitreichende Möglichkeiten für die Erfüllung und Unterstützung vielfältiger Aufgaben in der Forstwirtschaft. Grundgerüst des UAV ist ein leichtes Rohrgerüst, welches sich auf drei Niederdruckrädern befindet. An diesem Gerüst sind in bestimmter Anordnung der Motor, die Kamera, die GPS-Antenne(n), die Servosteuerung, nötige Akkus, der Benzintank und falls notwendig eine Videokamera arretiert.



Abbildung 2: Drohne „Susi“ im Flug

Während des Fluges befindet sich ein Gleitschirm mit einer Oberfläche von $3,8 \text{ m}^2$ an der Drohne, der eine langsame Fluggeschwindigkeit, ein gutmütiges Flugverhalten sowie eine hohe Sicherheit für eventuelle Ausfälle des Motors garantiert (THAMM & JUDEX, 2005).

Herzstück der Drohne ist der Aufnahmesensor. Um möglichst stets die vertikale Ausrichtung zu gewährleisten, wird die Kamera an einer kardanisch aufgehängten, gedämpften Halterung befestigt. Die Bildauslösung, wie auch die Navigation der Drohne, erfolgt über eine Fernsteuerung. Um äußere Orientierungsparameter näherungsweise für die Bilder zu erhalten, wird von einem GPS-Data Logger GlobalSat DG 100 sekundlich ein NMEA-String aufgezeichnet. Dieser wird nach dem Flug mit der Auslösezeit der Bilder verschnitten und dient dann als Näherungswert der Äußerer Orientierung. Darüber hinaus wird von einer GPS-Antenne der NMEA Sting per Funk an einen Empfänger am Boden gesendet. Der Empfänger ist über eine serielle Schnittstelle mit einem Laptop verbunden. Mit dem GPS-Signal wird die tatsächliche Position der Drohne am Rechner verfolgt. Als Hintergrundlayer wird eine georeferenzierte topographische Karte oder ein Luftbild gelegt, auf dem Kilometerquadrate dargestellt sind. Entsprechend den Quadratkennzeichnungen lenkt der Pilot nach Anweisung des Navigators

⁵ www.u-blox.com/products/sam_ls.html, 20.06.2007

die Drohne in einer möglichst geraden Flugbahn. Befindet sich die Drohne auf der gewünschten Flugroute, wird die Bildauslösung manuell aktiviert. Angetrieben wird das Fluggerät mit einem 4,2 kW Zweitaktverbrennungsmotor. Die Flugzeit ist abhängig von der Größe des Tanks. Der zurzeit verwendete Tank fasst ca. 1 Liter Benzin und ermöglicht eine Flugdauer von ungefähr zwei bis drei Stunden. Die wichtigsten technischen Parameter sind vergleichend in *Tabelle 1* zusammengefasst.

Tabelle 1: Vergleich der beiden Mini-UAV's „Carolo P330“ und „Susi“

	UAV Carolo P330	UAV „Susi“
Art des Flugsystems	Modellflugzeug	Drachenflügler
Gewicht	5 kg (max. Nutzlast 0.4 kg)	5 kg (max. Nutzlast 5 kg)
Geschwindigkeit	16 m/s - 30 m/s	0 m/s - 8 m/s
Reichweite	+++	++
Flugdauer	max. 60 min	max. 140 min
Witterungs- / Windabhängigkeit	++	+++
Sensorplattform	Kamera im Flugzeugrumpf	kardanische Halterung
GPS	Modul im Flugzeugrumpf	Antenne am Rohrgestell
GPS Übertragung / Speicherung	im Flugzeug auf Halbleiterplatte	GlobalSat DG 100 GPS Data Logger
Synchronisation GPS/Kamera	nicht vorhanden	nicht vorhanden
Sensor	Canon PowerShot S60	Sony DSC R1
Sensorgöße (berechnet)	7.176 * 5.319 mm	21.5 * 14.4 mm
Auflösung	2.592 * 1.944 Pixel	3.888 * 2.592 Pixel
Pixelgröße (berechnet)	2,7 µm	5,5 µm
Chipart	CCD	CMOS
Bildauslösung	automatisch alle 5 s	manuell
Auslöseverzögerung	nicht angebracht (~ 0,15 s)	nicht angebracht
Navigation	autonom (Way Points)	manuell (Verfolgung am PC)
	Hohe Anforderung an den Piloten	Geringe Anforderung an Pilot
	Mittel Robust	Sehr Robust

4.3 Innere Orientierung

Da bei beiden Mini-UAV's handelsübliche Digitalkameras zum Einsatz kommen, ist die Bestimmung der inneren Orientierung unerlässlich. Die Bestimmung der Inneren Orientierung erfolgte mit der Software „Australis“ Version 6.0 der Firma Photometrix⁶, die intern eine freie Netzausgleichung als mathematische Grundlage verwendet. Die Testfeldkalibrierung wurde mit einem ebenen Testfeld, das auf der Decke eines Seminarraums angebracht ist, durchgeführt. Das Testfeld bestehend aus insgesamt 35 Retrotargets und einer Ausdehnung von ca. 3,5 * 4 m, wurde von fünf Standpunkten mit der jeweiligen Kamera möglichst formatfüllend aufgenommen. Ingesamt wurden 14 stark konvergierende Aufnahmen gemacht. Eine graphische Darstellung der radialen Verzeichnung der beiden Kameras (*Abbildung 3*) zeigt, dass die

⁶ www.photometrix.com.au

Sony DSC R1 nahezu verzeichnungsfrei ist, verglichen mit der Canon PowerShot, die eine sehr starke radiale Verzeichnung aufweist.

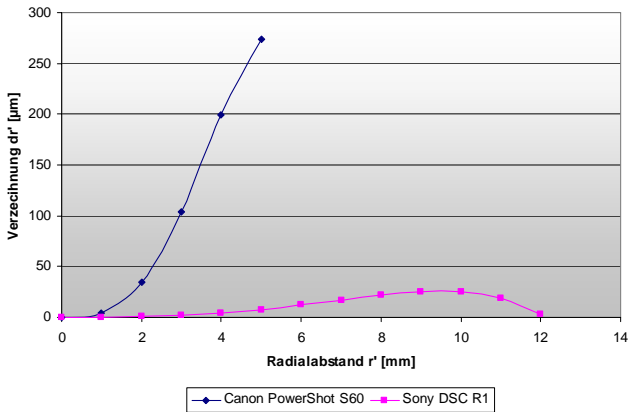


Abbildung 3: Gemessene Radialverzeichnung der Canon PowerShot S60 und Sony DSC R1

5 Ergebnisse

5.1 Testflüge

Für praktische Untersuchungen wurden insgesamt drei Testflüge durchgeführt. Zwei Testflüge erfolgten am 04.05.2007 mit dem System Carolo P 330 in Merklingsen. Neben der photogrammetrischen Auswertung war das Ziel der Testflüge, pflanzenbauliche Aussagen über die Bestandsentwicklung auf den Feldversuchsflächen der FH Soest zu erhalten. Die Witterungsbedingungen bei der Befliegung waren, bis auf einen Wind mit ca. 3 Beaufort optimal. Aufgrund der geringen Größe des ersten Testgebiets und daraus resultierend engen Kurvenradien, war eine manuelle Steuerung notwendig. Das zweite Testgebiet wurde autonom abgeflogen. Mit dem System Susi fand auf einer größeren Brachfläche von 300×500 m am 23.05.2007 ein Testflug bei Wahlsdorf (Mecklenburg-Vorpommern) statt. Wechselnde Winde verhinderten einen systematischen Bildflug, so dass mehrere Anläufe bzw. Bildflugstreifen notwendig waren, um das Gebiet optimal abzudecken.

5.2 Auswertung

Der Workflow der photogrammetrische Datenauswertung vom Einzelbild zum Orthophotomosaik unter der Verwendung der Software Leica Photogrammetry Suite (LPS) 9.1 ist in Abbildung 4 dargestellt. Ziel war eine möglichst automatisierte Datenverarbeitung. Dies stellte sich aber aufgrund verschiedener Probleme beim Bildflug als schwierig heraus. Da die automatische Navigation der Fluggeräte nur eingeschränkt funktionierte, was recht unsystematische Bildflugstreifen zur Folge hatte, musste aus der Vielzahl der verfügbaren Bilder manuell die besten Bilder selektiert werden. Außerdem waren die GPS/(INS) Näherungsdaten der äußeren Orientierung für eine automatische Verknüpfung benachbarter Bilder zu ungenau, da die Zeitsynchronisation zwischen den Bildern und der registrierten GPS-Position unzureichend war. Deshalb mussten die Bildverbände in einem ersten Schritt manuell relativ miteinander verknüpft werden. Anschließend konnten automatisch weitere Verknüpfungspunkte

gefunden werden, die die Blöcke weiter stabilisiert haben. Zur weiteren Stützung der Bildverbände wurden die beobachteten GPS-Positionen, wenn auch nur mit einer sehr geringen Gewichtung und einer *a priori* Genauigkeit von ± 4 m in die Aerotriangulation mit eingeführt.

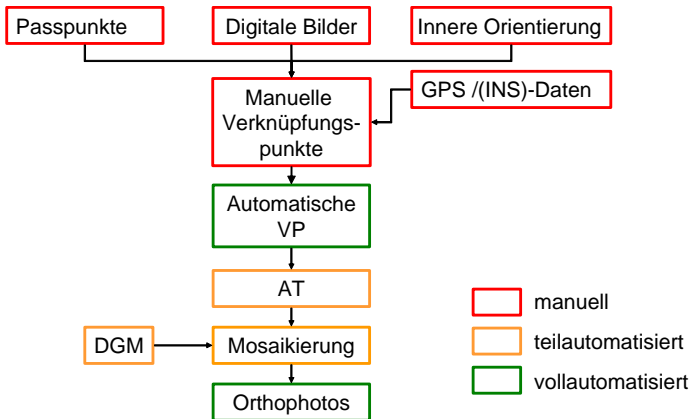


Abbildung 4: Photogrammetrischer Workflow zur Auswertung der Luftbilder

5.2.1 Flug 2 Merklingsen

Beispielhaft für die Detailergebnisse soll der 2. Flug in Merklingsen näher vorgestellt werden. Eine Längsüberlappung von 60% konnte in den selektierten 45 Luftbildern durch die höhere Geschwindigkeit während des autonomen Fluges und durch auftretende Windböen nicht erreicht werden. Die geforderte Querüberlappung ist ebenfalls an manchen Stellen unzureichend bzw. gar nicht vorhanden, vgl. Abbildung 5.

Die innere Genauigkeit des Blocks, unter Verwendung der 20 Passpunkte, mit $\pm 1,54$ Pixel ($= \pm 4,2 \mu\text{m}$) in X und mit $\pm 1,17$ Pixel ($= \pm 3,2 \mu\text{m}$) in Y in Bildkoordinaten ist unter den gegebenen Flugbedingungen sowie der verwendeten Kamera akzeptabel. Die äußere Genauigkeit liegt im Bereich eines wird mit 0,14 m in X , 0,08 m in Y und 0,27 m in Z als Ergebnis der Triangulation angegeben. In erster Linie fällt die Abweichung in der Höhe auf. Ein systematischer Höhenfehler bei der GPS-Messung, wie z.B. Antennenoffset oder eine Abweichung in der Kamerakonstante können diese Residuen begründen. Letzt genannte ist als wahrscheinlich anzusehen.

Die radiometrische Bildqualität der aufgenommenen Bilder ist recht unterschiedlich. Hinzu kommt, dass die Aufnahmen teilweise deutlich von der Lotrechten abweichen, was zusätzliche radiometrische Unterschiede in einem Orthophotomosaik hervorruft, die auch durch ein sorgfältiges Color Balancing, bzw. Image Dodging kompensiert nicht vollständig werden können, vgl. Abbildung 6.

Die photogrammetrische Auswertung des System „Susi“ ergab für den Flug Wahlsdorf folgende Ergebnisse: Der Block Wahlsdorf wies eine hohe Längs- und Querüberlappung von 80 % resp. 60 % auf, was die Ergebnisse der inneren Genauigkeit des Blocks (RMS) $\pm 0,36$ Pixel ($= \pm 2 \mu\text{m}$) in Bildkoordinaten bei einem Bildmaßstab von 1:14.300 und einer Bodenauflösung von 0,08 m unterstreichen. Die äußere Genauigkeit liegt mit $\pm 0,04$ m in X und Y sowie

mit $\pm 0,03$ m in Z innerhalb der Erwartungswerte. Die höhere Qualität des Aufnahmesensors lieferte zudem radiometrisch wesentlich bessere Bilder, so dass der Bildverband geometrisch und farblich wesentlich homogener ist, als die Blöcke des Carolo P 330 Systems.



Abbildung 5: Block Testfeld 2 Merklingsen



Abbildung 6: Orthophotomosaik Testfeld 2 Merklingsen

5.3 Photogrammetrisches Potential von Micro-UAV's

Trotz der ernüchternden praktischen Ergebnisse ist bei den preiswerten Micro-UAV's ein großes photogrammetrisches Potential zur direkten Orientierung vorhanden, dass allerdings durch viele Einflussfaktoren bestimmt wird. Das theoretische Optimum der Lagegenauigkeit der direkten Georeferenzierung wird durch die Genauigkeit des GPS/INS und die Flughöhe determiniert. Zum Beispiel, unter Verwendung des neuen MINC Autopiloten Systems der Firma Mavionics GmbH⁷ mit einer Winkelgenauigkeit von $0,6^\circ - 1,2^\circ$ ergibt sich, bei einer maximalen Flughöhe von 300 m über Grund, eine theoretische Lagegenauigkeit von 3,15 – 6,28 m. Allerdings wird diese theoretische Lagegenauigkeit auch bei höherwertigen Systemen nicht erreicht, vgl. GRENZDÖRFFER & ZUEV, 2007.

Die beiden UAV-Systeme müssen hinsichtlich des Potentials jedoch recht unterschiedlich betrachtet werden. Das Drohnensystem „Susi“ des Landesforstes ermöglicht Bildflüge mit geringen Fluggeschwindigkeiten, d.h. keine Probleme mit Bildwanderung und die höhere Payload ermöglicht einen qualitativ hohen Aufnahmesensor, der entscheidende Vorteile hat. Um jedoch größere Gebiete mit den geforderten photogrammetrischen Ansprüchen zu erfassen, eignet sich die derzeitige manuelle Fernsteuerung nicht. Auf der anderen Seite ist das System Carolo P 330 mit einem autonomen Flugführungssystem, wie dem der Mavionics GmbH, die Aufnahme mittelgroßen bis großflächiger Gebiete binnen kurzer Zeit möglich. Zudem werden bei Einhaltung der vorgegebenen Bildflugparameter die verlangten Mindestüberlappungen erreicht. Allerdings ist das Kamerasystem nicht wirklich für photogrammetrische Zwecke geeignet und der Autopilot der 1. Generation liefert noch keine ausreichend genauen Startwerte, um Bildblöcke teilautomatisiert auszuwerten

6 Ausblick

Bei der Weiterentwicklung der beiden Systeme ist an den jeweiligen Schwachpunkten anzu-

⁷ http://mavionics.de/downloads/factsheet/fs_minc_system.pdf

setzen. Bei dem System Susi betrifft das an erster Stelle die Verwendung eines Autopiloten und die Verbesserung der zeitlichen Synchronisation zwischen dem Auslösen der Kamera und dem GPS-Signal. Das System Carolo P 330 bedarf vor allem einer besseren Kamera und die Verbesserung der zeitlichen Synchronisation zwischen dem Auslösen der Kamera und dem GPS-Signal sowie ein verbessertes Flugführungssystem, um auch eng beieinander liegende Flugstreifen automatisch fliegen zu können.

Das große Anwendungspotential von Micro-UAV's ist direkt von einer exakten Georeferenzierung und einem wirtschaftlich akzeptablen Workflow abhängig. Zum einem sind 2D- oder 3D-Auswertungen, Einbindung in Geoinformationssysteme (GIS) oder Bildung von Bildmosaiken nur durch präzise Georeferenzierungen möglich. Andererseits muss sich der Zeitaufwand der Befliegung und der photogrammetrischen Auswertung wirtschaftlich lohnen. Zusammengefasst liegen in den augenblicklich genutzten UAV-Systemen durch einige Erweiterungen große Chancen, um zukunftsorientiert erfolgreiche Einsätze zeitnaher Geodatenacquire und -analyse vorzunehmen.

7 Literatur

- ANNEN, S. & NEBIKER, S. (2007): Einsatz von Mikro- und Minidrohnen für Fernerkundungsaufgaben in der agrochemischen Forschung und Entwicklung.- DGPF Jahrestagung 19.-21.6.2007, Basel, (in Publikationen der DGPF **16**) - S. 571 – 578
- EISENBEISS, H., SAUERBIER, M., ZHANG, L. & GRUEN, A., (2005): Mit dem Modellhelikopter über Pinchango Alto. Geomatik Schweiz, **9**: 510-515
- ENGEL, A. (2007): Das photogrammetrische Potential einer low-cost Drohne für land- und forstwirtschaftliche Anwendungen.- 103 S. – Diplomarbeit Univ. Rostock / HTW Dresden
- GRENDÖRFFER, G. (2006): Praktische Erfahrungen mit dem digitalen Bildflugsystem PFIFF und einer Rollei AIC-45 CIR. DGPF Jahrestagung 11.-13.9.2006, Berlin, (Publikationen der DGPF Band 15): S. 335 – 342.
- GRENDÖRFFER, G. & ZUEV, S., (2007): Bestimmung des photogrammetrischen Genauigkeitspotentials des Online-Systems AN-TAR zur Verkehrsüberwachung.- DGPF Jahrestagung 19.-21.6.2007, Basel, (= Publikationen der DGPF **16**):. 571 – 578
- HAARBRINK, R.B. & E. KOERS (2006): Helicopter UAV for photogrammetry and rapid response.- Proceedings: Second International Workshop - The Future of Remote Sensing, ISPRS Vol. XXXVI-1/W44, 4 S. (= http://www.pegasus4europe.com/pegasus/workshop/documents/contributions/Haarbrink_UAV_full.pdf)
- HERWITZ, S.R., JOHNSON, L.F., DUNAGAN, S.E., HIGGINS, R.G., SULLIVAN, D.V., ZHENG, J., LOBITZ, B.M., LEUNG, J.G., GALLMEYER, B., AOYAGI, M., SLYE, R.E. AND BRASS, J. (2004): Demonstration of UAV-based imaging for agricultural surveillance and decision support.- Computers and Electronics in Agriculture **44**: 49-61
- REIDELSTÜRZ, P, LINK, J, GRAEFF S., CLAUPEIN, W. (2007): UAV (unmanned aerial vehicles) für Präzisionslandwirtschaft.- Bornimer Agrartechnische Berichte **61** (= 13. Workshop Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft & 4. Workshop Precision Farming). S. 75 – 84.
- THAMM, H.P. & JUDEX, M., (2005): Einsatz einer kleinen Drohne für hoch aufgelöste Fernerkundung. In: Angewandte Geoinformatik 2005. Beiträge zum 17. AGIT-Symposium Salzburg. Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg
- UAS (2007): Unmanned aircraft systems: The Global Perspective, 215 S. (= <http://www.uvs-info.com/Yearbook2007/UAS-Yearbook2007.php>)

Verfahren zur automatischen Bestimmung von Forstinventurparametern aus terrestrischen Laserscannerpunktwolken

ANNE BIENERT¹ & STEFFEN SCHELLER²

Zusammenfassung: In diesem Beitrag wird ein Verfahren vorgestellt, welches aus 3D-Punktswolken eines terrestrischen Laserscanners die Inventurparameter von Bäumen in Waldbeständen vollautomatisch ermittelt. Es werden Algorithmen zur Detektion und Segmentierung von Bäumen in 3D-Punktswolken angewendet, um die Anzahl und Näherungspositionen der vorhandenen Bäume zu erhalten. Neben der automatischen Baumfußpunktbestimmung, welche in Abhängigkeit von der Neigung des angrenzenden Geländes bestimmt wird, wird eine Baumhöhenbestimmung durchgeführt. Abschließend werden Ergebnisse der Baumdeteckierung, Baumfußpunkt- und Baumhöhenbestimmung vorgestellt. In den österreichischen Testgebieten (547 Bäume) wurden 97% der Bäume erfolgreich detektiert. Die Baumhöhen wurden im Mittel (3,30 m) zu groß bestimmt. Der Vergleich der Baumhöhen, ermittelt im Single- und Multiple-Scan Modus, zeigt eine genauere Höhenbestimmung bei Verwendung von mehreren Standpunkten.

1 Einleitung

Knapp 30% des deutschen Staatsgebietes ist Wald. Um diesen zu kontrollieren und zu bewirtschaften, werden in periodischen Zeitabständen Forstinventuren durchgeführt. In einem Zweimann-Verfahren werden dabei stichprobenartig Inventurparameter wie z.B. Baumart, Baumhöhe, Brusthöhendurchmesser, Entfernung und Azimut vom Zentrum des Stichprobengebietes sowie Flächenmerkmale und Qualität der Bäume interaktiv gemessen und erfasst. Als Alternative zu dieser personalintensiven Erfassungsstrategie bietet sich eine automatische Erfassung der Geometrieparameter von Bäumen aus terrestrischen Laserscannerpunktswolken an. Durch die dichten dreidimensionalen Punktswolken ist ein hoher Dokumentationswert gegeben und eine Automatisierung der Ableitung der Geometrieparameter realisierbar. Die Automatisierung bringt zudem eine Objektivierung der Baumparameteranalyse unterschiedlicher Baumarten mit sich. Die automatische Ableitung 3D-Baumparameter kann über die Bestimmung des Brusthöhendurchmessers (BHD) hinaus beispielsweise leicht auf die Durchmesserbestimmungen entlang des Stammes erweitert werden (BIENERT et. al, 2007). Die Automatisierung ermöglicht aufgrund der berührungslosen Messungen Volumenschätzungen am stehenden Stamm in sehr kurzer Zeit, welche bei der konventionellen Stichprobenerhebung nur durch aufwändige Fällaktionen erhalten werden können.

1) Anne Bienert, TU Dresden, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, Helmholtzstraße 10, 01069 Dresden; E-Mail: Anne.Bienert@tu-dresden.de

2) Steffen Scheller, TU Dresden, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, Helmholtzstraße 10, 01069 Dresden; E-Mail: Steffen.Scheller@tu-dresden.de

Für eine automatisierte Auswertung ist die Detektion der Bäume Voraussetzung, welche hauptsächlich in horizontalen Schnitten über dem DGM abläuft. ASCHOFF et al. (2004) erstellen aus einem gerasterten Schnitt ein 2D-Image, dessen Grauwerte der Anzahl der Punkte im Raster entsprechen. Über eine Houghtransformation und einem Kreis- bzw. Ellipsenfitting werden die Stämme detektiert. KIRÁLY & BROLLY (2007) stellen zwei Ansätze zur Segmentierung von Baumstämmen vor. Der erste Ansatz ist eine Clustermethode in Kombination mit einer ausgleichenden Kreisberechnung, die 142 von 169 Bäumen erfolgreich detektiert. Bei der zweiten Methode wird in Single-Scans nach halbkreisförmigen Objekten gesucht und ebenfalls ein Kreis eingepasst. Dabei wurden 166 von 169 Bäumen erfolgreich detektiert.

Bei der Bestimmung der Höhe von Waldbäumen aus Laserscannerpunktwolken zeigen manuelle Messungen bessere Ergebnisse als automatisierte Verfahren. HOPKINSON et al. (2004) definieren die Baumhöhe als Vektor aus höchstem und niedrigstem Punkt, der zuvor von benachbarten Ästen manuell bereinigten Baumpunktwolke. Im Mittel wurden die Bäume 1,5 m zu klein bestimmt. ASCHOFF et al. (2004) führen eine Baumhöhenschätzung mit Schaftformfunktionen durch. Dabei erreichen sie eine mittlere Abweichung von 6 m. KIRÁLY & BROLLY (2007) verwenden das Digitale Kronenmodell eines jeden Baumes zur Detektion der Baumspitze. Das lokale Maximum des Kronenmodells wird der Baumposition zugeordnet, die der zuvor über den Stammverlauf berechneten Baumspitzenposition am nächsten kommt. Die Baumhöhen wurden mit einem RMS-Fehler von 1,4 m bestimmt.

Kapitel 2 stellt die Datensätze von zwei Testgebieten vor, welche Gegenstand der Ergebnisanalysen sind. In Kapitel 3 werden Segmentierungsalgorithmen zum Detektieren von Bäumen in Schnitten von 3D-Punktwolken präsentiert. Ausgehend von den detektierten Baumpositionen werden die Baumfußpunkte in Abhängigkeit vom angrenzenden Gelände bestimmt und die Baumhöhe abgeleitet (Kapitel 4). Anschließend folgt in Kapitel 5 eine Präsentation der Ergebnisse aus den Testgebieten. Eine Diskussion (Kapitel 6) beendet den Beitrag.

2 Testgebiete

Im Frühjahr 2006 wurden im Wienerwald, ca. 25 km westlich von Wien, 22 Plots aufgenommen. Die Plots hatten einen Radius von 15 m. Das Alter der Bestände lag zwischen 65 und 140 Jahren. Neben den Scanaufnahmen wurden BHD, Baumhöhe, Azimut und Distanz zum Plotzentrum, der im Plot befindlichen Bäume manuell erfasst. Die Baumhöhen wurden für jeden Bestandesmittelstamm der vorliegenden Baumarten mit einem Vertex gemessen. Die restlichen Baumhöhen wurden mittels einer Einheitshöhenkurve geschätzt. Für die Datenakquisition der österreichischen Plots wurde ein Faro LS 800 HE80 Laserscanner mit einer phasenabhängigen Entfernungsmessung und einer mittleren Punktgenauigkeit von ± 3 mm verwendet (FARO, 2005). Die hier vorgestellten Testdaten wurden im Single-Scan Modus (THIES et al., 2003) mit einer Scanauflösung von $0,045^\circ$ aufgenommen. Dazu wird eine runde Fläche (Plot) innerhalb des Testgebietes festgelegt, aus deren Zentrum die Scanaufnahme erfolgt.

Ein weiterer Plot wurde im März 2007 mit dem Riegl LMS-Z420i gescannt. Dieser Panorama-View Scanner verwendet zur Streckenmessungen das Impulslaufzeitverfahren. Die mittlere Punktgenauigkeit ist ± 8 mm (RIEGL, 2006). Insgesamt wurden 22 Buchen (Alter: 140 Jahre)

in einem Radius von 15 m im Single- sowie Multiple-Scan Modus mit einer Scanauflösung von 0,05° aufgenommen. Für den Single-Scan wurden, um die vertikale Begrenzung des Gesichtsfeldes zu umgehen, im Zentrum drei verschwenkte Aufnahmen gemacht. Von zwei weiteren Standpunkten außerhalb des Plotradius (östlich und westlich) wurden die Daten des Multiple-Scans aufgenommen. Diese Standpunkte wurden über zuvor im Messgebiet verteilte retroreflektierende Zylinder registriert und in ein lokales Koordinatensystem mit dem Ursprung im Plotzentrum transformiert. Die Baumfußpunkte wurden mit dem Tachymeter und die Baumhöhen (mit einem Vertex) sowie die Brusthöhendurchmesser (mit Kluppe) manuell erfasst. Das Gelände war südlich um 6° exponiert und verfügte über wenig Unterholz.

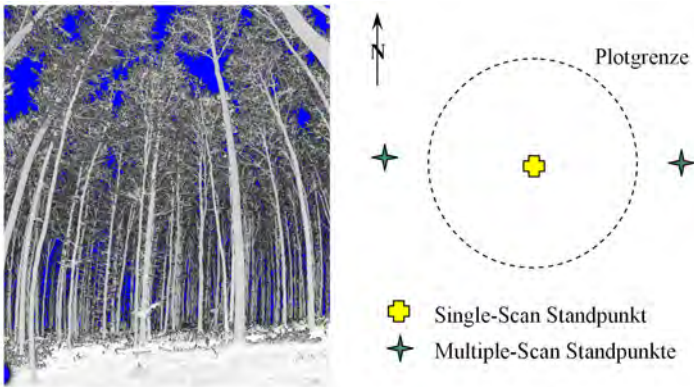


Abb. 1: Intensitätsbild des Buchenplots (links); Aufnahmekonfiguration des Buchenplots (rechts)

3 Baumdetektion

In Abhängigkeit von der Scanauflösung, der Entfernung und Ausrichtung der Stammoberfläche zum Scanner, beschreiben die Laserscannerpunkte ein Raster auf dem Objekt. Da die Baumstämme innerhalb eines Plotes annähernd vertikal ausgerichtet sind, ergeben sich in horizontalen Schnitten durch die Punktwolke an den Positionen der Stämme Punktanhäufung. Um die Anzahl und die Näherungspositionen der im Plot befindlichen Bäume zu erhalten, werden nach der Generierung des Digitalen Geländemodells (DGM) zwei Segmentierungsalgorithmen in drei horizontalen Schnitten über dem DGM durchgeführt.

3.1 Vorsegmentierung

Zunächst werden in der Vorsegmentierung (BIENERT et al., 2007) die Punkte in einem 2D-Separierungsalgorithmus (SCHELLER & SCHNEIDER, 2006) auf Punktanhäufungen untersucht und in einzelne Punktcluster unterteilt. Punktcluster mit einer Anzahl kleiner als eine vorgegebene Mindestanzahl ($Anzahl_{min}$) werden eliminiert und nicht weiter beachtet. Zum Klassifizieren der einzelnen Punktcluster wird ein ausgleichender Kreis mit den Clusterpunkten bestimmt und

anhand von zwei Ausschlusskriterien (mittlere Gewichtseinheitsfehler m_0 und Radius r_{\min}) das Objekt klassifiziert. Die Ergebnisse der Vorsegmentierung beinhalten jedoch Fehler 1. und 2. Art (BIENERT et al., 2007). Da die Schnitte in konstanten Abständen definiert sind, ist nicht auszuschließen, dass die Stämme an Stellen von abgehenden Ästen geschnitten werden. Solche Punktcluster, die sowohl Stamm- als auch Astpunkte enthalten, erzeugen in der ausgleichenden Kreisberechnung einen zu großen m_0 . Anhand des vorgegebenen Grenzwertes werden diese Punktcluster nicht als Baum klassifiziert (Fehler 1. Art). Objekte, die in der Vorsegmentierung zurückgewiesen wurden, werden in einem zweiten Schritt, der Feinsegmentierung, erneut untersucht.

3.2 Feinsegmentierung

Im Gegensatz zu der Vorsegmentierung werden nun die Punktcluster hinsichtlich der Punktdichte innerhalb eines Rasters analysiert. Die Feinsegmentierung verläuft in fünf Schritten:

1. Bestimmung der Objektbegrenzung (x_{\min} , x_{\max} , y_{\min} , y_{\max})
2. Einteilung der Fläche in ein regelmäßiges Raster
3. Zählen der im Raster befindlichen Punkte
4. Separierung der Raster dessen Anzahl größer als eine Anzahl $_{\max}$ ist
5. Erneute Berechnung des ausgleichenden Kreises

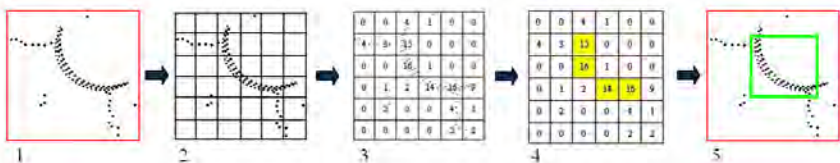


Abb. 2: Arbeitsschritte der Feinsegmentierung

Der Grenzwert Anzahl $_{\max}$ (4. Schritt) zur Separierung der Stammpunkte ergibt sich aus der Scanauflösung, der Entfernung des Rasterelementes zum Scanner und der Schnittdicke. Dabei wird von einer diagonal durch das Raster verlaufenden Stammoberfläche ausgegangen. Die somit berechnete Sollpunktanzahl wird zu optimistisch angenommen. Eine Reduzierung dieses Wertes um 30% ergibt den Grenzwert Anzahl $_{\max}$. Voraussetzung für eine erfolgreiche Baumerkennung in der Feinsegmentierung ist eine hohe Punktdichte innerhalb der Rasterelemente. Dies erfordert eine geeignete Schnittdicke in Abhängigkeit von der verwendeten Scanauflösung. Letztendlich wird mit Hilfe der Feinsegmentierung eine Separierung der Stammpunkte von den Astpunkten innerhalb des Clusters durchgeführt und somit Fehlklassifizierungen 1. Art minimiert.

4 Baumfußpunkt

Mit Hilfe der Näherungsposition aus der Segmentierung werden die Bäume mit einem vertikal stehenden Zylinder separiert. Somit werden nur die Punkte innerhalb des Zylinders für weitere Parameterbestimmungen verwendet, was eine Optimierung der Prozessierungszeit mit sich zieht.

Der BHD ist neben der Baumhöhe der wichtigste Baumparameter, da mit dessen Hilfe u.a. eine Baumhöenschätzungen und Durchmesserschätzungen in unzugänglichen Höhen am Stamm möglich sind. In 1,30 m über dem Baumfußpunkt wird der BHD ermittelt. Wird nun der tiefste Punkt innerhalb des Baumzylinders als Baumfußpunkt festgelegt, führt dies bei geneigtem Gelände zu einer zu kleinen Brusthöhe. Eine Geländeneigung von bereits 5° verursacht bei einem Baumzylinder mit einem Radius von 1,5 m eine Höhendifferenz von knapp 13 cm. Der BHD würde somit 13 cm zu tief ermittelt werden. Bei geneigtem Gelände ist die Brusthöhe am Stamm in 1,30 m über dem hangaufwärts liegenden Baumfußpunkt definiert. Wie in BIENERT et al., (2007) vorgestellt, bestimmt sich der Baumfußpunkt aus dem Gradienten der ausgleichenden Ebene der angrenzenden Bodenpunkte (Abb.3). Aufgrund von Bodenvegetation ist tendenziell ein zu hoch gelegener Fußpunkt zu erwarten.

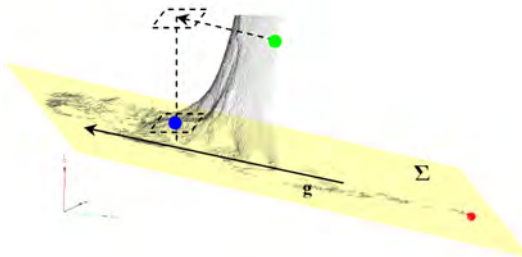


Abb. 3: Ermittlung des Baumfußpunktes

5 Baumhöhe

Die Baumhöhe wird aus der Differenz der Z-Werte des höchsten Punktes und des Baumfußpunktes innerhalb des separierten Baumzylinders bestimmt. Dies setzt eine lotrechte Aufstellung des Scanners bzw. eine nachträgliche Überführung der Punktwolke in ein lotrechtes Koordinatensystem voraus. Aufgrund von Verdeckungen im Kronenbereich wird die Baumspitze nur lückenhaft erfasst, was zu einer zu kleinen Baumhöhe führen kann. Daher bietet es sich an, die Scanaufnahmen prinzipiell im unbelaubten Zustand durchzuführen. Eine zu große Baumhöhe kann zwei Ursachen haben. Zum einen kann der Radius des Baumzylinders (zur Abgrenzung der jeweiligen Baumvolumina) zu groß sein. Die Baumhöhe für einen kleineren Baum wird dann zu groß ausfallen, da benachbarte dominanteren Bäume, deren Äste in den Zylinder hineinragen, fälschlicherweise den höchsten Punkt erzeugen (Abb. 4 links). Zum anderen verursachen vorhandene Geisterpunkte (Abb. 4 rechts) über dem Kronendach eine falsche Höhe. Diese Punkte können durch interne Mehrdeutigkeiten bei der Aufnahme des Laserscanners (abhängig vom Messverfahren und vom eingesetzten Instrument) entstehen. Da nicht alle Geisterpunkte mit der Steuerungssoftware des Scanners eliminiert werden, wird eine erneute Filterung vor der Baumhöhenableitung durchgeführt. Die Nachbarpunkte eines Laserpunktes werden hinsichtlich der Anzahl und Entfernung innerhalb eines bestimmten Bereiches analysiert und der zu betrachtende Laserpunkt (nach Erfüllen verschiedener Kriterien) gegebenenfalls gelöscht.

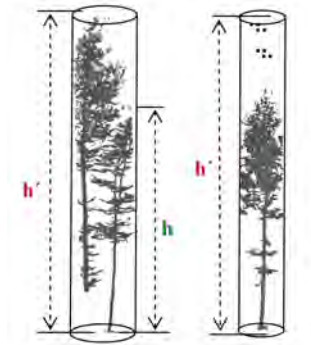


Abb. 4: Möglichkeiten der falschen Baumhöhenbestimmung im Baumzylinder

5.1 Baumdetektion

Die 22 Plots der österreichischen Testgebiete beinhalten insgesamt 547 stehende Bäume. Nach der Vor- und Feinsegmentierung wurden 593 Objekte als Bäume klassifiziert. Darunter waren 533 erfolgreich detektiert Bäume, was einer Detektionsrate von 97,4 % entspricht. Dennoch konnten 14 Bäume nicht detektiert werden. Des Weiteren wurden 60 Bäumen zu viel detektiert. Abb. 5 zeigt die Detektionsfehler aufgeteilt nach den vorhandenen Baumarten im Plot.

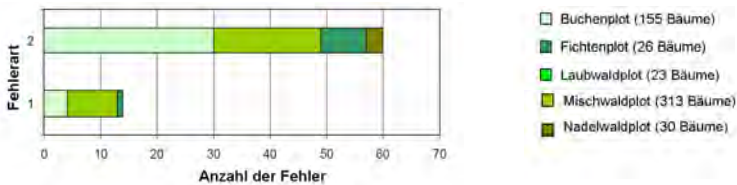


Abb. 5: Detektionsfehler

Im Single-Scan Datensatz des Buchenplotes konnten insgesamt 22 Objekte als Baum detektiert werden, was einer Detektionsrate von 100% und keinen Fehldetektierungen entspricht. Im Multiple-Scan hingegen wurden 26 Objekte als Baum klassifiziert. Unter den Objekten waren 20 korrekt detektiert Stämme. Zwei Bäume wurden nicht detektiert (= Fehler 1. Art) und sechs Objekte (Äste, Bodenvegetation = Fehler 2. Art) zu viel. Die nicht detektierten Bäume wurden teilweise durch Stämme und Äste anderer Bäume verdeckt, sodass die Anzahl der Punkte am Stamm die vorgegebene Mindestanzahl ($Anzahl_{min}$) in der Vorsegmentierung nicht erreichte und die Cluster zurückgewiesen wurden. Die meisten Objekte mit einem Fehler 2. Art werden durch eine spätere Stammverfolgung eliminiert. In Abbildung 6 ist ein Ausschnitt der Segmentierung im Buchenplot dargestellt.

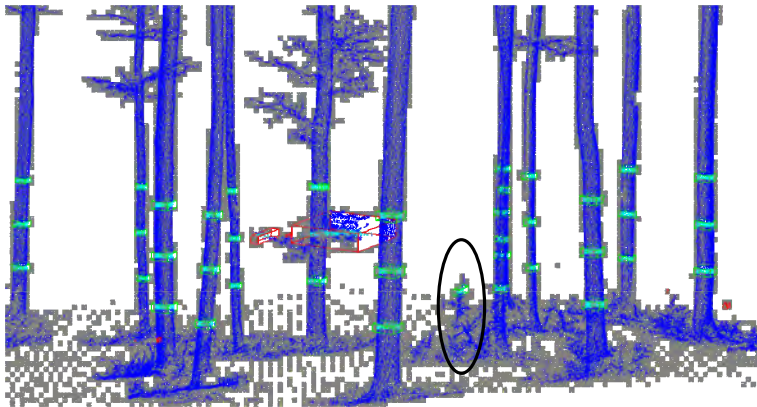


Abb. 6: Segmentierungsergebnis des Buchenplotes (Ellipse = Fehler 2. Art)

5.2 Baumhöhe

In Tabelle 1 und Abbildung 7 sind die Ergebnisse der Baumhöhenanalyse zusammengefasst dargestellt. Von den insgesamt 50 gemessenen Baumhöhen der österreichischen Plots wurden 36 (72% - Mittel: 3,30 m) zu groß bestimmt. Die (maximale) Abweichung von 20,1 m trat bei einer Hainbuche auf. In diesem Fall beinhaltete der Baumzylinder Kronenpunkte eines größeren benachbarten Baumes. Die Vermutung, dass durch mehrere Standpunkte eine Verbesserung in der Baumhöhenbestimmung möglich ist, konnte an dem Buchenplot Datensatz bestätigt werden. Bei 13 von 22 Bäumen kam es im Multiple-Scan zu einer verbesserten Höhenbestimmung. Dennoch sind die Ergebnisse der Baumhöhenbestimmung nicht zufriedenstellend.

Tab. 1: Zusammenstellung der Analyse der Baumhöhen

Plot	Österreichische Plots	Buchenplot	
	Single-Scan	Single-Scan	Multiple-Scan
Aufnahmekonfiguration	Faro	Riegl	Riegl
Mittelwert	3,30 m	1,47 m	0,90 m
RMS-Fehler	6,73 m	4,10 m	3,99 m
Maximum	20,10 m	11,70 m	11,50 m
Minimum	-0,10 m	0,30 m	0,10 m

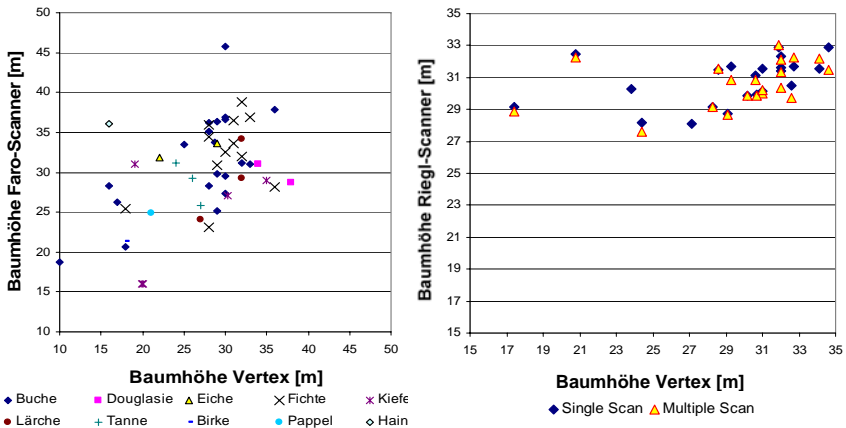


Abb. 7: Ergebnisse der Baumhöhenbestimmung nach Baumarten (links) und nach Aufnahmekonfiguration im Buchenplot (rechts)

5.3 Baumfußpunkte

Um eine Genauigkeitseinschätzung der Brusthöhenbestimmung vorzunehmen, wurden die automatisch ermittelten Baumfußpunkte aus dem Single-Scan mit den tachymetrisch bestimmten Baumfußpunkten verglichen. Dabei ergab sich eine maximale Abweichung von 24,4 cm und eine minimale Abweichung von -0,04 cm (Abb. 8), sowie eine Standardabweichung von $\pm 6,91$ cm. Im Mittel wurden die Baumfußpunkte 1,93 cm oberhalb des tatsächlichen Fußpunktes bestimmt. Das heißt, der automatisch bestimmte Baumfußpunkt befindet sich über dem realen Fußpunkt, was einen zu hohen BHD-Ansatz im Vergleich zu manuellen Messungen zur Folge hat. 16 von 22 Fußpunkten wiesen eine Abweichung kleiner 5 cm auf.

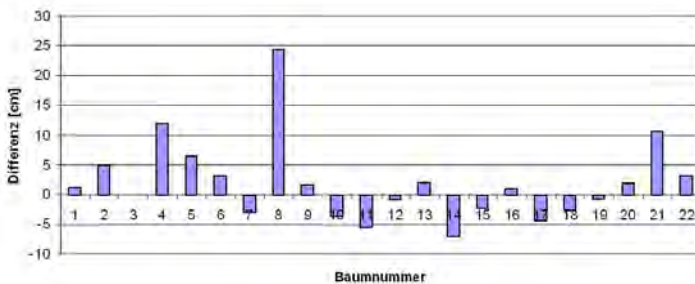


Abb. 8: Baumfußpunktabweichung [cm] (automatische Fußpunktbestimmung – Tachymetermessung)

6 Diskussion und Ausblick

Im Single-Scan Modus sind größere Verdeckungen, verursacht durch Äste und dichtes Unterholz, im Stammbereich nicht auszuschließen. Daher wird die Segmentierung in verschiedenen Schnitten durchgeführt. Verdeckungen durch Bäume (Scanschatten der Bäume) können durch die Anwendung von mehreren Schnitthöhen nur teilweise kompensiert werden. Verläuft die Stammachse schief (quer zur Richtung Scanner – Baum), ist die Wahrscheinlichkeit gegeben, dass in einem der drei Schnitte Stammpunkte eines dahinterliegenden Baumes erfasst werden können. Bei spezieller regelmäßiger Bepflanzung in Baumplantagen, ist ein weiterer Aufnahmestandpunkt unumgänglich, um alle Bäume zu erfassen. Dabei ist die Positionierung mehrerer Standpunkte innerhalb des Plotes vorteilhaft, da nur Bäume innerhalb des Plotes Verdeckungen verursachen können. Wird der Scanner außerhalb des Plotes platziert, erhöht sich die Anzahl der Bäume (zwischen Scanner und Plotgrenze) und somit die Wahrscheinlichkeit von Verdeckungen.

Bäume mit einem stärker geneigten Stamm in Aufnahmerichtung oder gebrochene schief stehende Stämme, können nur bedingt detektiert werden. Das Stammsegment im 2D-Schnitt wird hierbei nicht mehr kreisförmig dargestellt, was zum einen zur Zurückweisung des Punktclusters in der Kreisausgleichung führt (Vor- und Feinsegmentierung) und zum anderen eine zu geringe Punktdichte in den Rastermaschen der Feinsegmentierung bewirkt. Um dennoch stark geneigt Stämme zu detektieren ist anstatt des Einpassens eines Kreises ein Zylinderfitting (PFEIFER et al., 2004) notwendig, was Gegenstand von zukünftigen Arbeiten sein wird.

Mehrere Aufnahmestandpunkte führen zu einer Minimierung der Verdeckungen, was eine verbesserte Baumhöhenbestimmung bewirkt (Tab. 1). Die Ergebnisse der 22 Plots zeigen, dass die Baumhöhe tendenziell zu groß bestimmt wurde. Ursache dafür sind neben den Geisterpunkten, die trotz vorheriger Filterung enthalten waren, Äste benachbarter Bäume. Um den Einfluss benachbarter Baumpunkte zu umgehen, kann der Zylinderradius verkleinert werden. Allerdings führt dies dazu, dass bei schrägen Bäumen die Baumspitze außerhalb des Zylinders liegt. Ein vermutlich besseres Ergebnis erhält man, indem die Baumachse kontinuierlich verfolgt wird. Somit wird der Suchbereich eingegrenzt und Punkte benachbarter Bäume ausgeschlossen. Bei kleineren Bäumen, welche komplett von größeren Bäumen überschattet werden, ist eine Höhenbestimmung mit dieser Methode ausgeschlossen. Zukünftige Arbeiten beschäftigen sich mit der Astverfolgung in Laserscannerpunktewolken. Somit können Astpunkte benachbarter Bäume bei der Höhenbestimmung erkannt und eliminiert werden.

7 Literaturverzeichnis

- ASCHOFF, T.; THIES, M.; WINTERHALDER, D.; KRETSCHMER, U. & SPIECKER, H., 2004: Automatisierte Ableitung von forstlichen Inventurparametern aus terrestrischen Laserscannerdaten. 24. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF 2004, Halle/Saale, S. 341-348.
- BIENERT, A.; SCHELLER, S.; KEANE, E.; MOHAN, F. & NUGENT, C., 2007: Tree detection and diameter estimations by analysis of forest terrestrial laserscanner point clouds.

- International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XXXVI, Part 3/ W52, 2007, S. 50-55.
- FARO EUROPE GMBH & Co. KG, 2005: Aufbruch in neue Dimensionen: der FARO Laser Scanner LS. Laser Scanner LS Broschüre, 2005
- HOPKINSON, C.; CHASMER, L.; YOUNG-POW, C. & TREITZ, P., 2004: Assessing forest metrics with a ground-based scanning lidar. Canadian Journal of Forest Research, 34, 2004, S. 573-583.
- KIRÁLY, G. & BROLLY, G., 2007: Tree height estimation methods for terrestrial laser scanning in a forest reserve. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XXXVI, Part3/ W52, 2007, S. 211-215.
- KRETZSCHMAR, A., 2007: Untersuchungen zur Genauigkeit bei der Ableitung von Baumparametern aus terrestrischen Laserscannerdaten. Studienarbeit am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, TU Dresden 2007
- PFEIFER, N.; GORTE, B. & WINTERHALDER, D., 2004: Automatic Reconstruction of Single Trees From Terrestrial Laser Scanner Data. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XXXV, Part B5, 2004, S. 114-119
- RIEGL Laser Measurement System GmbH, 2006: Long Range & High Accuracy 3D Terrestrial Laser Scanner System LMS-Z420. <http://www.riegl.com>, 09/2006
- SCHELLER, S. & SCHNEIDER, D., 2006: Extraktion von Primitiven aus Laserscannerpunktwolken zur Rekonstruktion von Tragwerken. Photogrammetrie – Laserscanning – Optische 3D-Messtechnik (Beiträge Oldenburger 3D-Tage 2006, Hrsg. Luhmann/Müller), Verlag Herbert Wichmann, Heidelberg, S. 156-163.
- THIES, M.; ASCHOFF, T. & SPIECKER, H., 2003: Terrestrische Laserscanner im Forst. Allgemeine Forstzeitschrift für Waldwirtschaft und Umweltvorsorge, Nr. 22/2003, S. 1126-1129.

Danksagung

Unser Dank gilt der Firma Treemetrics Ltd. aus Cork/Irland für die Aufnahme und Bereitstellung der Scandaten der Plots aus Österreich. Des Weiteren wollen wir uns bei Bernhard Posch von der „Österreichische Bundesforste AG“ und Matthias Menzel vom Institut für Forstökonomie und Forsteinrichtung / TU Dresden für die Baumhöhenmessungen bedanken.

Erfassung dynamischer Prozesse im industriellen Umfeld

TIMO KAHLMANN¹, WERNER BÖSEMANN² & ROBERT GODDING³

Zusammenfassung: Die Nahbereichsphotogrammetrie hat in den letzten Jahren eine starke Wandlung erlebt. Die wesentlich stärker gewordene Akzeptanz auch komplexerer optischer Messsysteme im industriellen Umfeld führt dazu, dass immer mehr Lösungen mittels optischer Messverfahren direkt aus der Industrie selbst kommen. Insbesondere der Übergang von hoher räumlicher Auflösung zu hoher zeitlicher Auflösung spielt im dynamischen Umfeld eine wesentliche Rolle bei der Erfüllung geometrischer Messaufgaben. Im Rahmen dieses Beitrags wird der Fokus auf solche Kamerasysteme gerichtet, die im Bereich des Übergangs von hochpräzisen zu hochdynamischen Messungen liegen. Eine spezielle Hochgeschwindigkeitskamera, welche sich durch eine nahezu unbegrenzte Aufnahmedauer auszeichnet sowie anwendungsorientierte Mehrkamerasysteme, werden vorgestellt. Daran schließt sich die Darstellung verschiedener Applikationen an.

1 Einleitung

Eine wesentliche Entwicklung in der Messtechnik ist die Diversifikation der angewendeten Verfahren und Methoden. Diese Entwicklung ist mit der steigenden Anzahl der Messmittel auch im Bereich der industriellen Messtechnik deutlich geworden. Insbesondere die geometrische Erfassung dynamischer Prozesse bzw. die Messung geometrischer Prozesse im dynamischen Umfeld zeigen schnell die Grenzen der bisher eingesetzten Messsysteme auf.

Zu Beginn soll eine Klassifizierung der Akquisitionsvoraussetzungen bzw. -ziele die Verständlichkeit der späteren Einordnung der Aufnahme- und Messsysteme erleichtern. Die drei wesentlichen Parameter räumliche Auflösung, zeitliche Auflösung und zeitliche Dauer der Aufnahmen werden dabei in einen logischen und technischen Zusammenhang gebracht und diskutiert.

Aufgrund immer schnellerer und präziserer Messinstrumente sind heute Messfrequenzen von mehreren hundert Hertz üblich. Kamerabasierte und damit berührungslose Messsysteme haben dabei häufig den Nachteil, dass große Datenmengen generiert und transferiert werden müssen. Da die Datenkanäle aber in ihrer Transferrate beschränkt sind, werden häufig nur kurze Sequenzen aufgenommen und anschließend an einen Auswerterechner übertragen. Für die Zeit der Übertragung stehen dann aber keine Akquisitionsressourcen mehr zur Verfügung.

Im Rahmen dieses Beitrages wird unter anderem eine Sensorentwicklung aufgezeigt, welche sich diesem Problem widmet und es löst. Darüber hinaus werden Anwendungen präsentiert, welche die dreidimensionale Messung im dynamischen Umfeld mit geeigneten kamerabasierten Methoden zuverlässig und schnell durchführen.

1) Timo Kahlmann, AICON 3D Systems, Biberweg 30 c, 38114 Braunschweig; E-Mail: timo.kahlmann@aicon.de

2) Werner Bösemann, AICON 3D Systems, Biberweg 30 c, 38114 Braunschweig; E-Mail: werner.boesemann@aicon.de

3) Robert Godding, AICON 3D Systems, Biberweg 30 c, 38114 Braunschweig; E-Mail: robert.godding@aicon.de

2 Tendenzen in der optischen Messtechnik

Die Klassifizierung und Bewertung von Messsystemen kann im Hinblick auf die unterschiedlichsten Faktoren vorgenommen werden. Neben den Kosten und der Bedienbarkeit von Messsystemen, welche zwar in ökonomischen Betrachtungen eine wichtige Rolle spielen, sind die eigentlichen Kernparameter, räumliche Auflösung, zeitliche Auflösung und zeitliche Dauer, primär zur Entscheidungsfindung für die Messprozesseignung heranzuziehen. Die räumliche Auflösung ist bei Zurückstellung von Systemstabilität und Zuverlässigkeit ein wesentliches Maß für die Genauigkeit der ermittelten Messgrößen. Die zeitliche Auflösung ist ein Maß für die Erfassbarkeit dynamischer Prozesse. Je höher die zeitliche Auflösung ist, desto schnellere Bewegungen werden auf den Messprozess abgebildet. Dabei sinkt aber aufgrund der Massenträgheit in der Regel bei gleichem Messobjekt die räumliche Dynamik. Die zeitliche Dauer von Messungen mit Messsystemen wird häufig durch die zur Verfügung stehenden Datenraten und Speicherumfänge begrenzt. Aus Gründen der Übersichtlichkeit werden hier nur optische Messsysteme behandelt für welche im Anschluss auch Applikationen gezeigt werden.

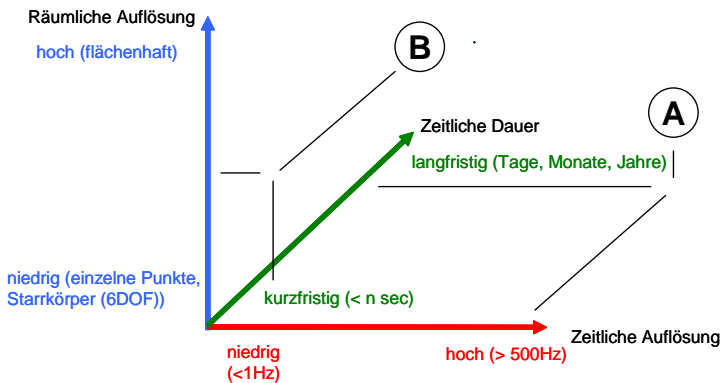


Abb. 1: Darstellung zur Klassifikation zweier unterschiedlicher Messsysteme in Zusammenspiel von räumlicher Auflösung, zeitlicher Auflösung und zeitlicher Dauer.

Abbildung 1 veranschaulicht die Einordnung der hier beschriebenen Messsysteme. Beide betrachteten Ansätze gehen davon aus, dass geometrische Informationen über einen langen Zeitraum zu erfassen sind. Klassifizierung (A) zeichnet sich dabei durch die hochentwickelte Kombination von hoher zeitlicher Auflösung und langer Erfassungsdauer aus. Ergänzend für eine gesteigerte räumliche Auflösung mit geringerer dynamischer Auflösung steht Klassifizierung (B). Grundsätzlich ist in der optischen Messtechnik eine immer größer werdende Abdeckung aller oben genannten Klassifikationsmerkmale zu beobachten. Dennoch existiert kein Universalmessmittel für die Abdeckung aller Aufgaben. Sonderlösungen sind und werden auch in naher Zukunft unumgänglich sein.

2.1 A: Erfassung von Vorgängen mit großer zeitlicher Dynamik über lange Zeiträume

Bei der Erfassung von Bildsequenzen mit Kamerasystemen werden in der Nahbereichsphotogrammetrie üblicherweise die gesamten Bilddaten gespeichert und an einen Auswerterechner übertragen. Dadurch entstehen innerhalb kürzester Zeit sehr große Datenmengen. Sobald die Daten schneller erfasst werden als sie übertragen oder gespeichert werden können, tritt ein Datenstau auf. In den meisten Fällen wird zur Beibehaltung der Messfrequenz die räumliche Auflösung oder die Erfassungsdauer reduziert. Zur Reduktion der Datenmenge kann direkt nach der Bildgenerierung eine Bildverarbeitung nachgeschaltet werden, sodass nur die notwendigen, der aus den Bildern gewonnenen Bildinformationen gespeichert und übertragen werden. Dadurch werden die Übertragungszeiten und die zu speichernden Datenmengen so stark reduziert, dass eine hohe Messfrequenz möglich ist. Letztlich stehen im Rahmen der technischen Möglichkeiten eine hohe Dynamik und eine lange Messdauer in einem antiproportionalen Verhältnis. Eine mögliche technische Umsetzung der Durchbrechung dieses Prinzips wird in Abschnitt 3.1 näher beschrieben.

2.2 B: Erfassung von Vorgängen mit geringerer zeitlicher Dynamik mit hoher Genauigkeit über lange Zeiträume

Sobald der zu erfassende dynamische Prozess nur niederfrequente Anteile enthält, bzw. höherfrequente Anteile in der Datenerfassung vernachlässigbar sind oder im Zuge der Bildakquisition integriert und damit herausgemittelt werden, können höherauflösende industrielle Standardkameras für die Datenakquisition eingesetzt werden. Eine höhere Auflösung bedingt unter Berücksichtigung von Zuverlässigkeit und systematischen Abweichungen grundsätzlich eine höhere Genauigkeit. Dennoch stellt auch hier wieder die Datenübertragung und anschließende Verarbeitung den wesentlichen Engpass in der Prozesskette dar. Eine an die Zielvorgaben angepasste Messkonfiguration ist daher auch hier unvermeidlich.

3 Erfassung dynamischer Vorgänge – technische Umsetzungen

Die Erfassung dynamischer Vorgänge in den bereits genannten Klassifikationsschwerpunkten (A) und (B) können nur mithilfe geeigneter technischer Lösungen umgesetzt werden. Die dazugehörigen Ansätze sollen im Folgenden dargestellt werden.

3.1 A: Vorgänge mit hoher Dynamik (TraceCamF)

Die Erfassung hochdynamischer Vorgänge kann, wie bereits gesehen, nur dann sinnvoll in einem Messprozess abgebildet werden, wenn die Akquisitionsfrequenz sowie -dauer zusammen mit der erforderlichen Genauigkeit vom eingesetzten Messsystem erreicht werden. Die besondere Herausforderung liegt hier in der gleichzeitigen Erfüllung aller Kriterien. Da bei der hochauflösenden und hochfrequenten Bilderfassung mit Kameras Datenmengen erzeugt werden, welche selbst mit den heutigen Datenverarbeitungs- und Datenspeicherungsmethoden nicht handhabbar sind, wurde der in Abbildung 2 verdeutlichte Prozessansatz verwendet. Dabei sind zwei wesentliche Dinge hervorzuheben. Zum Einen wird eine aktive Beleuchtung eingesetzt, um retroreflektierende, codierte Zielmarken so gut zu beleuchten, sodass mit einer speziellen

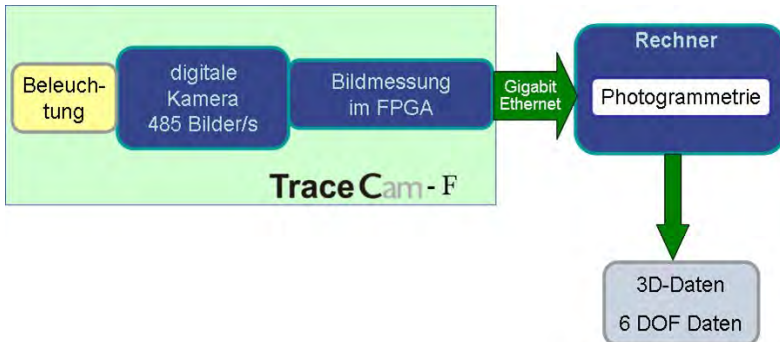


Abb. 2: Aufnahmeprinzip zur Reduktion der Rechnerbelastung und Datenübertragung mithilfe einer kamerainternen Bildmessung (TraceCam F / AICON 3D Systems). Dabei werden retroreflektierende, codierte Zielpunkte beleuchtet und von einer Kamera erfasst. Der Kamera ist eine Bildauswerteeinheit direkt nachgelagert. Diese reduziert die Bilddaten auf die Bildkoordinaten der Messmarken, welche wiederum relativ einfach mittels Standardschnittstellen zu einem Auswerterechner übertragen und ausgewertet werden können.

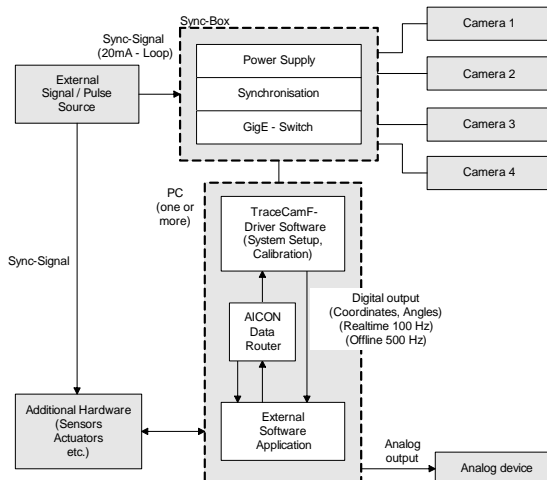


Abb. 3: Übersichtsprinzip der Synchronisierung eines TraceCam F-Kameraverbundes inklusive der Synchronisierung externer Messsysteme.

Digitalkamera, ausgehend von einer großen Blendenöffnung, genügend kurze Expositionszeiten möglich werden, um Verschmiereffekte bei der Erfassung bewegter Szenen zu vermeiden. Zum Zweiten geschieht die Bildmessung der Zielpunkte auf einer, der Kamera direkt nachgelagerten Prozessoreinheit (FPGA). Dadurch können Bilddaten über eine Breitbandverbindung direkt von der Kamera auf den FPGA übertragen und ausgewertet werden. Die Auswertung beinhaltet die Erkennung der codierten Zielmarken im Bild. Anschließend werden lediglich die Bildkoordinaten der Messmarken zu einem Auswerterechner übertragen und weiterverarbeitet. Dadurch werden die erzeugten Bilddaten direkt nach ihrer Erzeugung auf ihren geometrischen Gehalt reduziert. Messraten von mehr als 500 Hz sind möglich.

Die Erfassung von Bilddaten mit einer einzelnen Kamera ist aber nur bedingt zur Erfassung dreidimensionaler Informationen geeignet. Abschnitt 4.1 zeigt ein Beispiel für eine solche hochdynamische Applikation, für die die oben gezeigte Messkamera eingesetzt wird. In einer Vielzahl der Fälle müssen dreidimensionale Punktinformationen aus Mehrkamerasystemen gewonnen werden. Dazu ist es aber unvermeidlich, eine Synchronisierung der einzelnen Kameras zu gewährleisten. Abbildung 3 zeigt schematisch die Vorgehensweise beim TraceCam F Kameraverbund auf. Insbesondere die Möglichkeit der Synchronisierung externer Messsensoren sowie die Anbindung externer Synchronisationsquellen machen die TraceCam F zu einem flexiblen Messinstrument.

3.2 B: Vorgänge mit geringer Dynamik und hoher Genauigkeit

Bei der Erfassung niederfrequenter dynamischer Vorgänge mit höherer Genauigkeit kommen im industriellen Umfeld Standardindustriekameras (FireWire, GigE) mit hoher Auflösung zum Einsatz. Hier entfällt dann auch eine spezielle Synchronisierung, da die Bewegungsraten der Objekte bzw. der Kameras im Verhältnis zur Aufnahmedauer gering sind. Abschnitt 4.4 beschreibt eine Applikation mit einem derartigen Mehrkamerasystem.

4 Anwendungen

Die Anwendungen der oben kurz beschriebenen kamerabasierten Messsysteme zur Erfassung dynamischer Prozesse sind mannigfaltig. Im Folgenden werden fünf Applikationen beispielhaft herausgegriffen und mit ihren Lösungsansätzen präsentiert. Es werden drei Anwendungen auf Grundlage des TraceCam F-Systems dargestellt, sowie zwei Beispiele von Umsetzungen für hochauflösende Mehrkamerasysteme bei niederfrequenten dynamischen Prozessen.

4.1 Radmesssystem WheelWatch

Bei der Entwicklung von Fahrzeugen besteht der Anspruch, den Freilauf der Räder im Radkasten auch extremen Fahrmanövern und -situationen angepasst zu dimensionieren. Da das Verhalten von Rädern aus Fahrzeugmodellen nur unzureichend vorhergesagt werden kann, sind praktische Tests unverzichtbar. Bisher wurden dazu ausgeschäumte Radkästen nach dem Fahrversuch ausgemessen. Der durch den Fahrversuch verlorene Schaum ist dabei ein Maß für den Freigang des Rades. Ebenso werden bei Fahrwerkstests bisher meist mechanische bzw. opto-mechanische Messsysteme zur Erfassung der Radbewegung, z. B. auf verschiedenen Straßencharakteristiken

verwendet. Durch die mechanische Kopplung des Systems besteht in der Regel der Anspruch, dass sich das Messsystem in Bezug auf das Fahrzeug nicht bewegen darf. Das auf der Basis der oben beschriebenen Messkamera TraceCam F basierende Radmesssystem WheelWatch unterliegt dieser Restriktion nicht. Dabei wird mittels eines Referenzsystems, realisiert durch spezielle Messmarken am Kotflügel (vgl. Abbildung 4, siehe auch LUHMANN et al. (2006)), die Kameraposition für jedes einzelne Bild berechnet. Insbesondere die Unempfindlichkeit gegenüber relativen Kamerabewegungen kann so erreicht werden. Mithilfe dieser Orientierung kann nun mittels eines Radadapters die Position des Rades in sechs Freiheitsgraden bestimmt werden.



Abb. 4: Einsatz der TraceCam F im dynamischen Umfeld zur Messung dynamischer Vorgänge. Bei diesem Messsystem wird mittels einer einzelnen Kamera der geometrische Zustand eines Rades in sechs Freiheitsgraden im Fahrzeugkoordinatensystem erfasst (3 Koordinaten, 3 Orientierungswinkel).

Umfangreiche Tests haben gezeigt, dass dieser Auswerteansatz in Kombination mit der hier eingesetzten Kamertechnologie zu sehr genauen und zuverlässigen Messdaten führt. Abbildung 5 zeigt eine Messdatenreihe des Lenkwinkels und des Sturzes während einer Testfahrt.

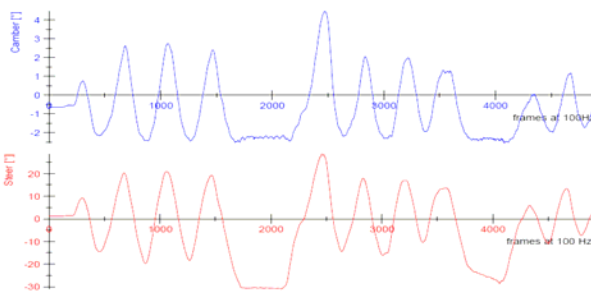


Abb. 5: Lenkwinkel und Sturz während einer Messfahrt mit dem auf der TraceCam F-Technologie basierenden Radmesssystem WheelWatch. Die dargestellte Messzeit liegt bei ca. 45 s.

4.2 EuroCopter – Belastungs- und Bruchversuche

Eine Versuchsreihe zur Überwachung von Materialbelastungen wurde bei EuroCopter, einem der führenden Helikopterhersteller, durchgeführt. Dazu wurde ein für die sichere Funktionsweise wesentliches Bauteil einer Scherbelastung unterzogen. Die wirkende Scherkraft wurde

kontinuierlich solange erhöht, bis ein Versagen der Werkstückskonstruktion eintrat. Insbesondere sollte ein dichtes Bild der dreidimensionalen Verformungen abgeleitet werden können. Mithilfe von auf der Oberfläche angebrachten Messmarken, welche durch das Photogrammetriesystem „AICON DPAPro“ referenziert wurden, konnte mit einem Stereomeßsystem auf Grundlage der TraceCam F-Technologie der Zeitpunkt des Bruchs exakt bestimmt werden. Ziel der Messungen war es herauszufinden, ob das Bauteil die konstruktiven Anforderungen an die Belastbarkeit einhält, um einen sicheren Betrieb des Helikopters zu gewährleisten. Die Beobachtungsfläche maß etwa 2,0 m mal 1,6 m. Erwartet wurden Verschiebungen von ca. 17 mm und eine Torsion von 2°. Die Kamerabasis betrug ca. 1,2 m. Über 11 Minuten hinweg wurden Messdaten mit 100 Hz akquiriert und jeweils rechnerisch auf einen Referenzrahmen bezogen. Genauigkeit der Messungen kann zu 0,3 mm in der Objektebene und zu 0,5 mm vertikal dazu eingeschätzt werden. Durch den genannten Messaufbau konnte in sehr kurzer Zeit eine zuverlässige Aussage gemacht werden und bestätigt werden, dass das Bauteil die Anforderungen an die Normbelastung um das 1,8-fache übertrifft.

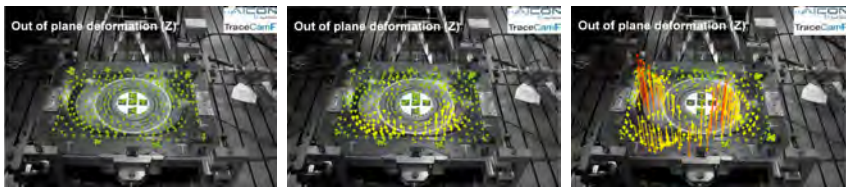


Abb. 6: Durch die hochfrequente Messung der Form eines wesentlichen Bauteils eines Helikopters kann exakt der Zeitpunkt des Bruchs festgestellt werden. In diesem Fall konnte nachgewiesen werden, dass ein Vielfaches der vorgeschriebenen Belastbarkeit erreicht wurde und das Bauteil somit exzellent für den Einsatz konzipiert ist.

4.3 Produktionsüberwachung dynamischer Prozesse

In der Produktion kommt es an zahlreichen Stellen zu Situationen, in denen z. B. durch eine mechanische Belastung geometrische Verformungen ausgelöst werden, die im weiteren Herstellungsprozess nicht mehr rückgängig gemacht werden können und sich damit auf die Qualität des Endproduktes negativ auswirken. Als Beispiel können hier Roboterzellen genannt werden, in denen Blechteile verschweißt werden. Die verschiedenen Blechteile werden vor dem Verschweißen passgenau in entsprechende Vorrichtungen eingelegt und dann automatisch durch mehrere Roboter geschweißt. Bei diesem Vorgang kann es zu den oben genannten geometrischen Veränderungen kommen. Zur Analyse solcher Vorgänge ist der Einsatz dynamischer Messsysteme sinnvoll. Es kann ermittelt werden, zu welchem Zeitpunkt, d. h. bei welchem Arbeitsgang es zu einer Deformation kommt, die Größe der Deformation kann mit hoher Genauigkeit bestimmt werden sowie der gesamte Vorgang durch die Messbilder dokumentiert werden. Bei diesen Messungen kommt es nicht unbedingt auf sehr hohe Messfrequenzen an, vielmehr muss die Frequenz nur hoch genug sein, um die unterschiedlichen Arbeitsschritte mit entsprechender zeitlicher Auflösung analysieren zu können. Andererseits werden höhere Anforderungen an die Messgenauigkeit gestellt sowie Messbilder zur Dokumentation benötigt, was den Einsatz eines Messsystems mit höher auflösenden Messkameras erfordert. Die zu beobachtenden Punkte werden auch in diesem Fall durch Messmarken signalisiert und von einem Mehrkamerasystem gemessen, wobei in der Regel Messkameras mit einer Auflösung von 2MPixel eingesetzt werden. Bei einer Basislänge von 1m werden Genauigkeiten von etwa 0.1mm erreicht.

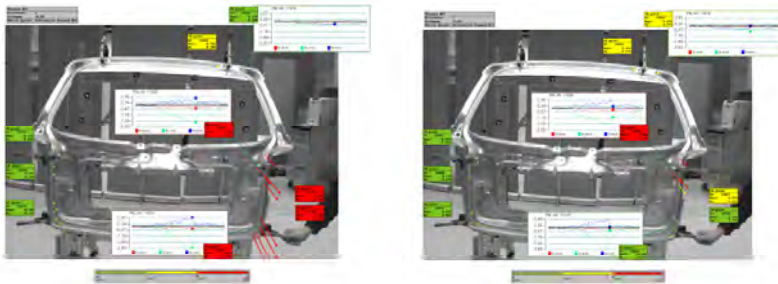


Abb. 7: Dynamische Analyse von Verformungen an einem Blechteil durch Andrücken an eine Vorrichtung. Durch die Klemmung im rechten unteren Bereich kommt es zu deutlichen Verformungen. Die Aufnahme erfolgte mit einem AICON MoveInspect-System mit 3 synchron messenden Kameras bei einer Auflösung von 1600 x 1200 Pixel.



Abb. 8: Selbstentfaltende Sonnensegel und Antennen dienen der Reduzierung des Volumens von Satelliten. Um die Entfaltung unter realistischen Bedingungen zu testen, wurden Parabelflüge durchgeführt, welche Schwerelosigkeit für kurze Zeiträume simulieren.

4.4 Messung von Antennenentfaltung unter Schwerelosigkeit (Parabelflug)

Die Überwachung von Bewegungsprozessen mit Schwerpunkt in der Endpositionskontrolle ist auch Thema in der Luft- und Raumfahrt. Da Nutzlast und -volumen in der Raumfahrt mit sehr hohen Kosten verbunden ist, gibt es vielfältige Bestrebungen, das Gewicht und Volumen von Bauteilen zu reduzieren. Selbstentfaltende Sonnensegel sowie Parabolantennen stellen die Entwicklungsingenieure vor große Herausforderungen. Gerade Parabolantennen sind im Hinblick auf ihre geometrische Form ganz eng an die Qualität der Signalübertragung gebunden. In einem Schwerelosigkeitsversuch sollte untersucht werden, welche geometrischen Zustände eine selbstentfaltende Parabolantenne während des Entfaltungsvorganges durchläuft. Insbesondere der Endzustand ist dabei von großer Bedeutung. Dazu wurde eine derartige Antenne mithilfe eines Multikameramesssystems TraceCam M (Abbildung 9, links) während des Entfaltungsvorganges aufgenommen. Als Referenzierung und Kontrollmarken dienten codierte Passmarken auf der Rahmenkonstruktion. Auf der Antenne selbst wurden uncodierte Messmarken eingesetzt.

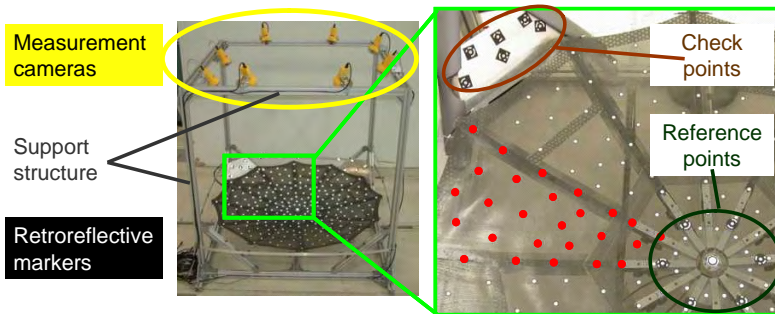


Abb. 9: Messaufbau für die Bestimmung der Formabweichung einer selbstentfaltenden Parabolantenne unter Schwerelosigkeit. Mit einem 8-Kamerasystem mit codierten Referenzmarken sowie uncodierten Antennenmarken wird während der Schwerelosigkeitsphase eines Parabellfluges die Form der Antenne gemessen und anschließend mit den Solldaten verglichen.

Wie Abbildung 10 zeigt, liegen die erreichten Genauigkeiten der Messmarkenpositionen wesentlich unter 0.1 mm. Dabei lässt sich die zu erwartende Abnahme der Genauigkeit nach außen erkennen.

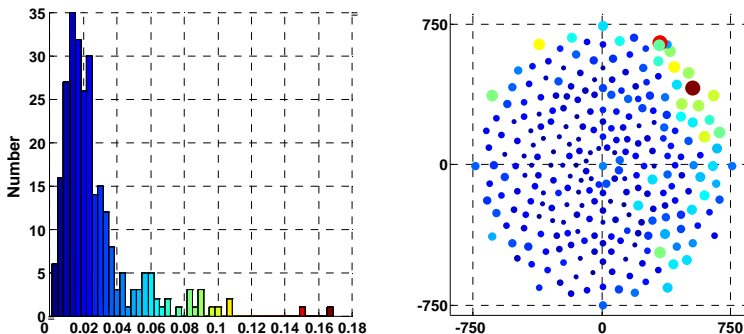


Abb. 10: Links: Histogramm der Genauigkeiten der Messpunkte auf der Antenne in [mm]. Rechts: Genauigkeiten der Antennenpunkte vom Soll bezüglich der Antennen geometrie nach DATASHVILI et al.

4.5 Materialprüfung

Auch im Bereich der Materialprüfung sind je nach Untersuchung sowohl hohe Anforderungen an die räumliche Auflösung und Genauigkeit als auch Aspekte der hohen zeitlichen Auflösung interessant. Als Beispiel für den ersten Fall seien hier Untersuchungen zur Verformung von Betonproben genannt, bei denen Längenänderungen von 1 μm auf 100 mm erfasst werden sollen (HAMPEL, 2000). Diese Untersuchungen erfordern in der Regel den Einsatz von Kameras mit hochauflösenden Sensoren (z. B. mit 2000 x 2000 Sensorelementen), wobei die zeitlich erreichbare Auflösung dieser Kameras dann in der Größenordnung von 1 Hz liegt.

Auf der anderen Seite werden Proben zyklisch wechselnden Belastungen ausgesetzt, wobei die Belastung durchaus mit hohen Frequenzen wechselt. Am Institut für Straßenwesen der TU Braunschweig werden Asphaltproben in einer Klimakammer unter verschiedenen Temperaturen solchen Belastungen ausgesetzt, um z. B. den Einfluss unterschiedlicher Bindemittel auf die Stabilität des Asphalttes zu untersuchen.

Eine Aussage über die geometrische Veränderung der Probe an verschiedenen Stellen trägt zur Beurteilung der Stabilität bei. Herkömmliche Methoden, etwa der Einsatz von Dehnungsmessstreifen, liefert nur Aussagen in einer Koordinatenrichtung, zudem ist die Anbringung an der Probe teilweise schwierig. Photogrammetrische Messsysteme sind hier durchaus geeignet, da die Signalisierung mehrerer Messpunkte sehr einfach möglich ist sowie Verformungen in allen drei Koordinatenrichtungen gemessen werden können.

Da die Versuche durchaus viele Minuten dauern können, ist der Einsatz normaler Hochgeschwindigkeitskameras aufgrund der entstehenden Datenmengen nicht möglich. Es wurden deshalb Versuche mit einem 2-Kamerasystem bestehend aus zwei TraceCam F-Kameras durchgeführt. Die Kameras wurden auf einer stabilen Basis montiert und gemeinsam kalibriert (Abb. 11). Die Probe wurde eingespannt bzw. mit dem Aktuator verklebt und mehrere Minuten lang abwechselnd Druck- und Zugbelastungen ausgesetzt, wobei der Wechsel zwischen Druck und Zug zunächst mit 0.1 Hz, am Ende mit 10 Hz, erfolgte. Es erfolgten Versuche mit verschiedenen Aktuatorwegen bei verschiedenen Temperaturen. Dargestellt ist das Ergebnis eines Versuches mit 12000 Messungen. Die Berechnung der Ergebnisse erfolgte mit dem AICON 3D Studio. Berechnet wurden die Deformationen zur Nullepoche, wobei das Koordinatensystem parallel zur Probe ausgerichtet wurde und alle Epochen in dieses Koordinatensystem transformiert wurden. Die maximale Deformation an den signalisierten Punkten beträgt etwa $\pm 40 \mu\text{m}$.

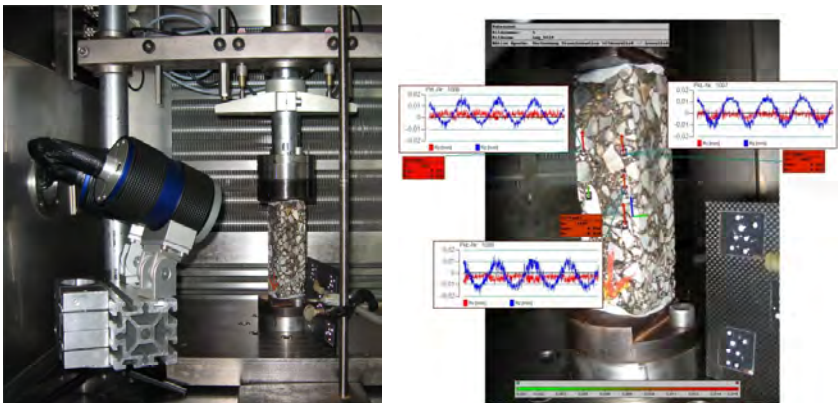


Abb. 11: Versuchsaufbau und Ausschnitt aus der Ergebnisdarstellung. Die periodisch eingebrachten Zug- und Druckkräfte zeigen sich in den Deformationen der signalisierten Punkte

Literaturverzeichnis

- DATASHVILI, L.; LANG, M.; HUBER, M. & BAIER, H., 2007: Vermessung eines entfaltbaren Parabolantennenreflektors für Satellitenanwendungen unter Schwerelosigkeit. AICON 3D Forum 2007, Braunschweig, Deutschland.
- HAMPEL, U., 2000: Einsatz der digitalen Photogrammetrie im bautechnischen Versuchswesen, 19. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF, Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung, Band 8, pp 301 -308
- LUHMANN, T.; ROBSON, S.; KYLE, S. & HARLEY, I., 2006: Close Range Photogrammetry. ISBN 1-870325-50-8.
- WIORA, G.; BABROU, P. & WILLBOLD, M., 200?: WheelWatch – Online-Photogrammetrie mit FPGA-Bildverarbeitung. Oldenburger 3D Tage 200?, Oldenburg, Deutschland.

Virtuelles 3D-Modell der antiken Tempelanlage in Sirwah/Jemen zur archäologischen Objektdokumentation durch terrestrisches Laserscanning und Photogrammetrie

MAREN LINDSTAEDT¹, THOMAS P. KERSTEN¹, KLAUS MECHELKE¹,
MARCEL GÖTTING¹, RENÉ HEIDEN¹

Zusammenfassung: Der folgende Beitrag zeigt den kombinierten Einsatz von digitaler Photogrammetrie und terrestrischem Laserscanning bei der 3D-Erfassung und Modellierung des Almaqah-Tempels in Sirwah (Republik Jemen). Das antike Bauwerk liegt 120 km östlich von Sana'a und ca. 40 km westlich der Stadt Marib.

Das Projekt ist eine Kooperation zwischen dem Deutschen Archäologischen Institut (DAI), Außenstelle Sana'a der Orientabteilung und dem Department Geomatik der HafenCity Universität Hamburg. Die Objektaufnahme erfolgte im Februar 2007 mit der digitalen Spiegelreflexkamera FujiFine Pix S2 Pro und dem terrestrischen Laserscanner Trimble GS101 während der archäologischen Ausgrabungen. Der Tempel wurde als Datengrundlage für Archäologen und andere Forschungsdisziplinen durch eine Dreiecksvermaschung modelliert. Verschiedene Möglichkeiten der Texturierung des Modells wurden diskutiert und aufgezeigt.

1 Einleitung

Wurden früher für die Erfassung von komplexen Objekten oftmals photogrammetrische Mehrbildverfahren und geodätische Messmethoden genutzt, so steht seit einigen Jahren mit dem terrestrischen Laserscanning eine weitere leistungsstarke Technologie zur Verfügung. Die Scanner lassen sich je nach gewünschtem Endprodukt allein oder in Kombination mit der Photogrammetrie einsetzen. Durch ihre Eigenschaft eine extrem hohe Punktzahl in kurzer Zeit zu erfassen, sind sie für viele Anwendungen heute eine echte Alternative zu herkömmlichen Erfassungsmethoden, um Daten für die Modellierung von verschiedensten Objekten zu beschaffen.

Ist das zu erfassende Objekt von archäologischer Bedeutung, bietet die Erstellung eines interaktiven, virtuellen 3D-Modells viele Vorteile hinsichtlich der Interpretation und ermöglicht das Zusammenführen unterschiedlichster Informationen mit einem räumlichen Bezug. Die Interaktivität eines Modells liegt in der dem Anwender gegebenen Möglichkeit, sich aus dem dargestellten Objekt die für ihn wichtigen Informationen selbst zu beschaffen. Der Grenze an Informationen ist durch die virtuelle Realität kaum ein Riegel vorgeschoben. Lediglich das Potential der Hard- und Software könnte Einschränkungen liefern, da sie die Möglichkeiten zur Darstellung und Speicherung von Informationen definieren.

Das hier vorgestellte Projekt wurde an der HafenCity Universität Hamburg in Zusammenarbeit mit dem Deutschen Archäologischen Institut, Außenstelle Sana'a der Orientabteilung durchgeführt. Die Kooperation der beiden Projektpartner läuft schon seit mehreren Jahren, u.a. wurde schon die Erfassung und Modellierung des großen Dammes in Marib/Jemen (SOMMER & KERSTEN 2007) gemeinsam durchgeführt. Der in dieser Kampagne aufgenommene Almaqah-Tempel in Sirwah, der 120 km östlich der jemenitischen Hauptstadt Sana'a gelegen ist, wurde durch terrestrisches Laserscanning und digitale Architekturphotogrammetrie erfasst, wobei im Vorfeld noch nicht klar war, ob die Auswertung in Kombination der beiden Datensätze oder nur aus einem der beiden erfolgen sollte. Die Erstellung des Modells

¹ HafenCity Universität Hamburg, Department Geomatik, Hebebrandstr. 1, 22297 Hamburg, e-mail: [Maren.Lindstaedt, Thomas.Kersten, Klaus.Mechelke]@hcu-hamburg.de

für die Archäologen erfolgte dabei im Rahmen einer Diplomarbeit. Von Seiten der Archäologen wurde eine Genauigkeitsforderung von maximal 3 cm angegeben, da das zu generierende 3D-Modell nicht nur für Visualisierungszwecke genutzt werden, sondern auch für spätere Analysen von Statikern, Architekten und Archäologen dienen soll. Der Einsatz von terrestrischem Laserscanning und digitaler Photogrammetrie in der Archäologie ist beispielhaft u.a. bei EL HAKIM et al. (2004) und LINDSTAEDT et al. (2007) nachzulesen.

Zudem ist angedacht, das Modell als Datengrundlage für ein zukünftig noch zu erstellendes 3D-Geoinformationssystem zu nutzen, wie es z.B. vom DAI in Zusammenarbeit mit der ETH Zürich für die Geoglyphen von Nasca-Palpa in Peru realisiert wurde, die mit Hilfe photogrammetrischer Methoden kartiert und anschließend in einem 3D-GIS bereitgestellt wurden (LAMBERS 2004).

2 Das Aufnahmeobjekt, der Almaqah-Tempel von Sirwah

Die sabäische Stadtanlage von Sirwah ist etwa 40 km südwestlich von Marib im Jemen gelegen. Bei einem annähernd trapezförmigen Grundriss nimmt das Stadtareal eine Fläche von etwa 220 m x 230 m ein. Abb. 1 zeigt eine Luftaufnahme der komplexen Stadtanlage in der sich der Almaqah-Tempel (rot umkreist) von Sirwah befindet.

Der Tempel gilt als eines der Meisterwerke der sabäischen Baukunst. Er bildet das zentrale Element der Stadtanlage und wurde in die Stadtmauer integriert. Mitte des 7. Jahrhunderts v. Chr. wurde der Hauptbau errichtet, der in den nachfolgenden Jahrhunderten mehrfach umgebaut und erweitert wurde. In die Stadtmauer eingebettet befindet sich die über 8 m hohe Tempelmauer, die noch heute sehr gut erhalten ist. Die Mitte des Hofes beherrschen die Inschriftensteine Karib'il Watars, die sich auf einem gemauerten und ursprünglich womöglich mit Alabasterplatten verkleideten Sockel erheben. Die 6,80 m langen, übereinander liegenden Steine tragen auf beiden Seiten die bisher längste bekannte sabäische Inschrift.

Die Nord-Südausdehnung der Tempelanlage beträgt etwa 40 m und die Ost-Westausdehnung ca. 30 m. Die Höhe der Außenmauer misst maximal 9 m über Boden und der Turm im südöstlichen Teil des Tempels ist mit 10 m das höchste Objekt der Anlage.

Die Restauration der Tempelanlage dauert bereits mehrere Jahre, wobei der Tempel heute vollständig freigelegt ist.



Abb. 1: Luftaufnahme der sabäischen Stadtanlage von Sirwah (GERLACH 2003) (links), Almaqah-Tempel im Februar 2007 (rechts)

3 Die Aufnahmesysteme

Die kombinierte Aufnahme des Almaqah-Tempels erfolgte mit der digitalen Spiegelreflexkamera Fujifilm Fine Pix S2 Pro mit einem 28mm-Nikkor-Objektiv (Fläche des Super-CCD Chips 23,3 mm x 15,6 mm mit maximal 4256 x 2848 Pixel) und dem terrestrischen Laserscanner Mensi GS101 von Trimble. Das Laserscanningsystem, bestehend aus Scanner, Software und Zubehör, arbeitet nach dem Impulslaufzeitverfahren. Bei einer optimalen Messentfernung von 2-100 m beträgt die Messgenauigkeit einer Einzelstrecke 6 mm. Durch eine Winkelauflösung von 0,0018° lässt sich in 100 m Entfernung eine Gitterweite von 3x3 mm² realisieren. Der Panorama-View Scanner (360° horizontal, 60° vertikal) kann max. 5000 Punkte/sec messen. Die geodätische Netzmessung und Bestimmung der Passpunkte wurden mit dem Tachymeter TCRP 1201 R300 der Firma Leica durchgeführt.

4 Photogrammetrische Objektaufnahme und Laserscanning

Die Objektaufnahme erfolgte in einer vierwöchigen Messkampagne im Februar 2007, wobei in jeder Woche sechs Tage gearbeitet wurde. Das Team bestand aus einem wissenschaftlichen Mitarbeiter und zwei Diplomanden der HafenCity Universität Hamburg.

Für die zu Beginn durchgeführte Netzmessung wurden die in einer früheren Kampagne mit GPS im UTM-System bestimmten Festpunkte genutzt; innerhalb dieses erstellten Netzes wurden dann die Passpunkte für die Photogrammetrie und das Laserscanning bestimmt.

Für die photogrammetrische Aufnahme wurden 285 Passpunkte (Signal siehe Abb. 8) an das Objekt angebracht. Insgesamt wurden mit der Fuji FinePix S2 Pro an zwei Tagen 450 Aufnahmen gemacht, die ein Datenvolumen von 16 GB besitzen. Um möglichst gute Schnittgeometrien zu gewährleisten, wurden die Aufnahmen nicht nur vom Boden, sondern auch von einer Leiter bzw. vom Turm des Tempels aus gemacht. Da auch Details wie z.B. die Inschriftensteine erfasst und ausgewertet werden sollten, ergaben sich sehr unterschiedliche Aufnahmeabstände und daraus resultierend große Unterschiede in den Bildmaßstäben.



Abb. 2: Aufnahme mit dem terrestrischen Laserscanner MENS1 GS101

Die Aufnahme mit dem Laserscanner Mensi GS101 dauerte die ganze Kampagne über, wobei die Messungen jedoch mehrmals für einige Tage unterbrochen wurden. Zunächst wurde mit großen Objekten wie der Außenmauer begonnen, später erfolgte die Aufnahme die kleineren Objekte wie die Inschriftensteine und die Bronzekammern. Insgesamt wurden 41 Standpunkte benötigt und 45 Millionen Punkte erfasst, was einer Datenmenge von 2,7 GB entspricht. Für die Registrierung und Georeferenzierung wurden auf jedem Standpunkt mehrere Kugeln gesannt, die wie die photogrammetrischen Passpunkte mit dem Tachymeter bestimmt wurden. Da die maximale Betriebstemperatur des Scanners von 40° Celsius immer schon im

Laufe des Vormittags erreicht wurde, war das Arbeiten nur mit einem Sonnenschirm als Hitzeschutz notwendig.

5 Datenauswertung

5.1. Registrierung und Georeferenzierung der Punktwolken

Für die Registrierung bzw. Georeferenzierung der Scandaten wurde das Programm Real-Works Survey 5.1 genutzt, das wie der Scanner aus dem Hause Trimble stammt. Aufgrund der großen Datenmenge von 45 Millionen Punkten erfolgte keine Registrierung mehrerer Standpunkte in ein Scannerkoordinatensystem, sondern jeder Standpunkt wurde über die gescannten Kugeln direkt im UTM-System georeferenziert. Eine Ausnahme bildeten lediglich die sieben Standpunkte der Bronzekammern, da hier nicht für jeden Scan ausreichend geodätisch bestimmte Kugeln zur Verfügung standen und daher erst eine Registrierung der Stationen zueinander erfolgte. Insgesamt ergab sich für alle Objektpunkte eine mittlere Genauigkeit von 9 mm, die innerhalb des zu erwartenden Rahmens lag und für die von den Archäologen geforderte Modellgenauigkeit ausreichend war.

Für die weitere Bearbeitung wurde die Punktwolke (Abb. 3) auf einen Punktabstand von 15 mm ausgedünnt, was immer noch einer Punktzahl von 22 Mio. entsprach. Daher wurde die Punktwolke in sieben zu modellierende Bereiche segmentiert und in ASCII-Files mit RGB-Werten exportiert.



Abb. 3: Gesamtpunktwolke des Almaqah-Tempels nach Georeferenzierung

5.2. Photogrammetrische Auswertung

Von den aufgenommenen 450 Bildern wurden nicht alle weiter verwendet, sondern es wurden ca. 260 Bilder der interessierenden Bereiche ausgewählt und auf zwei Bildverbände verteilt. Die Bildorientierungen dieser Bildverbände mit je ca. 130 Bildern und die Kamerakalibrierung der Fuji S2 wurden simultan in je einer Bündelblockausgleichung mit dem Programm PHIDIAS bestimmt, das eine MDL-Applikation (MicroStation Development Language) für das CAD-System MicroStation ist.

Eine gute Verknüpfung innerhalb der Bildverbände wurde durch die hohe Anzahl von gemessenen Punkten pro Bild gewährleistet (14 bzw. 21 Stück), wobei jeder Objektpunkt durchschnittlich in sieben bzw. acht Bildern gemessen wurde. Im Zuge der simultanen Kamerakalibrierung wurden vor allem die systematischen Fehler bedingt durch die hohe Objektivverzerrung kompensiert und durch einen Vergleich der beiden Kalibrierungen untereinander ließen sich die Ergebnisse jeweils bestätigen. Die durchschnittliche Messgenauigkeit der

Bildpunkte lag bei 3 – 4 μm , was ca. einem halben Pixel entspricht. Die Genauigkeit für die Objektpunkte betrug ca. 3-4 mm und lag damit ebenso unterhalb den von den Archäologen geforderten Werten.

5.3. Modellierung des Tempels

Für die Modellierung des Tempels standen nun sowohl die durch das Laserscanning generierte Punktwolke als auch die orientierten Bilder zur Verfügung. Im Verlauf der Projektbearbeitung wurde entschieden, die Modellierung aus Zeitgründen nur über eine Dreiecksvermaschung der Punktwolke durchzuführen und die Bilder in erster Linie zur Kontrolle und Texturierung des generierten Modells zu nutzen. Durch die Nutzung der Software PHIDIAS war zwar die Möglichkeit zur kombinierten Auswertung von Scandaten und Bildern gegeben, doch aufgrund der Komplexität des Objektes wurde diese Lösung verworfen.

Für die Dreiecksvermaschung wurde die Software Raindrop Geomagic in der Version 9 verwendet. Bei den aus RealWorks Survey exportierten Punktwolken wurden vor dem Import noch die Koordinaten gekürzt, da die Software aus dem Industriebereich kommt und die UTM-Koordinaten nicht ohne Probleme zu verwenden waren. Die nachfolgend beschriebenen Arbeitsschritte wurden für alle sieben Teilbereiche durchgeführt.

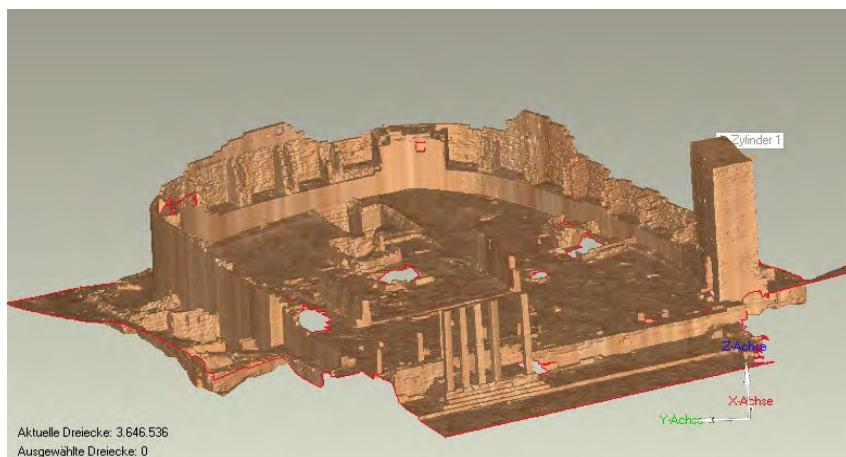


Abb. 4: Das in Geomagic modellierte Gesamtmodell des Almaqah-Tempels

Über eine Filterfunktion wurden zunächst noch vorhandene Ausreißer beseitigt. Dann wurde die Triangulation durchgeführt, meistens jedoch nicht für den gesamten Teilbereich auf einmal, sondern je nach Punktdichte mit unterschiedlichen Dreiecksgrößen für verschiedene Teilbereiche. Abschließend wurden die noch im Modell vorhandenen kleineren Löcher gefüllt, hierfür gibt es in der Software Geomagic mehrere Optionen, u.a. das hier verwendete krümmungsbasierte Füllen, um die fehlenden Dreiecke bestmöglich der umliegenden Objektform anzupassen. In der Software wird bei der Dreiecksvermaschung jedem erzeugten Dreieck ein Farbwert zugewiesen, der aus den drei verwendeten Punkten interpoliert wird. So wirkt das erzeugte Modell schon recht anschaulich, doch für realistische Visualisierungszwecke muss dennoch auf eine Texturierung des Modells mit digitalen Bildern zurückgegriffen werden. Im Anschluss an die Vermaschung wurden bei Bedarf noch die Polygone geglättet, weil durch Registrierungsungenauigkeiten in den Überlappungsbereichen der Scans eine leicht raue Oberfläche entstanden war. Da die Datenmenge nach der Modellierung bei ca. 12

Mio. Dreiecken lag, wurde in einigen ausgewählten Bereichen die Anzahl der Dreiecke deutlich reduziert. Dies war z.B. bei der Außenmauer der Fall, die durch die sehr fein geformten Steine eine ganz glatte Oberfläche aufweist, und somit die Genauigkeit des Modells durch die Reduktion nicht beeinträchtigt wurde. Das Ergebnis der Modellierung ist in Abbildung 4 zu sehen.

Um nachweisen zu können, dass die Form des Modells nicht unter der Datenreduktion gelitten hatte, wurden die beiden Modelle (vor und nach der Reduktion) miteinander verglichen. Das Ergebnis ist in Abb. 5 zu sehen, die Abweichungen liegen zum größten Teil nur im Bereich von einigen Millimetern. So ließ sich die Anzahl der Dreiecke auf ca. ein Drittel verringern.

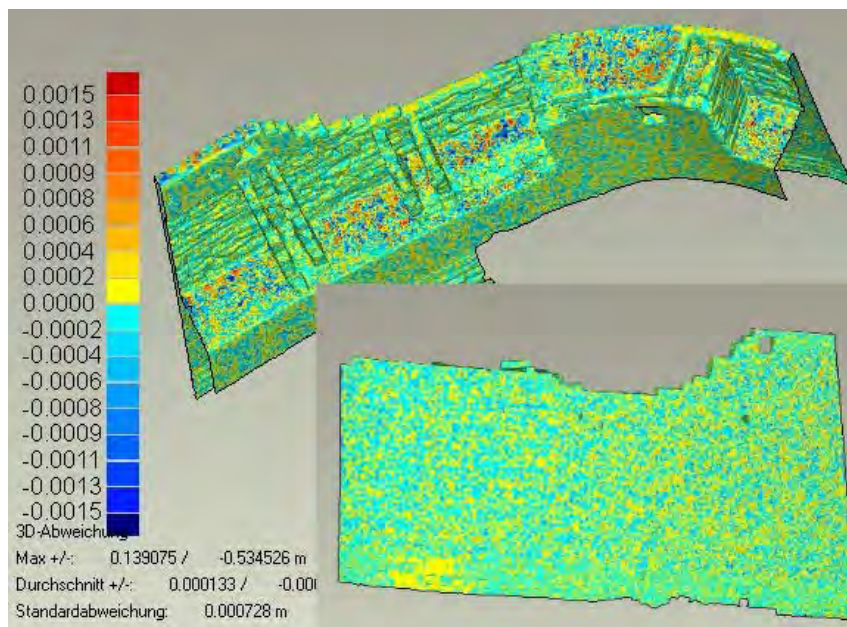


Abb. 5: Abweichungen zwischen originalem und reduziertem Modell des Tempels

Abschließend wurde das Modell durch einige Maße aus der Photogrammetrie kontrolliert. Dabei lagen die mittleren Streckendifferenzen bei 13mm, und auch die maximale Abweichung von 27mm liegt in dem von den Archäologen geforderten Rahmen. Eine detaillierte Beschreibung der Modellierung ist in GÖTTING & HEIDEN (2007) zusammengefasst.

In einem weiteren Versuch wurde untersucht, inwiefern sich weitere Datenreduktionen auf die Genauigkeit des Modells auswirken. Dafür wurde als Ausgangsdatensatz das Modell mit den 3,5 Mio. Dreiecken verwendet. Die Reduktion erfolgte in sieben Schritten bis zu einem Minimum von 5% der ursprünglichen Dreiecksanzahl (Abb.6). Dabei wurde für die Berechnung immer die Option der maximalen Krümmungspriorität gewählt. Das Ergebnis zeigte, dass bei fünf von sechs Vergleichsstrecken in allen Stufen bis einschließlich 10% alle Differenzen innerhalb von 2,5cm zum Ausgangsdatensatz lagen (Tab.1). Die einzige Strecke mit einer größeren Abweichung, die Strecke 4, ist eine durch abgerundete Kanten nicht eindeutig zu Steinlänge. So sind Maße von klar zu definierenden Strecken auch in dem stark reduzier-

ten Modell mit einer Genauigkeit von deutlich unter 5 cm zu bestimmen. Dies belegt, dass bei Verwendung der krümmungsbasierten Reduktion in den ebenen Bereichen z.T. stark reduziert wird, die Ecken und Kanten selbst aber erhalten bleiben, und somit auch die ursprüngliche Geometrie des Modells bewahrt wird.

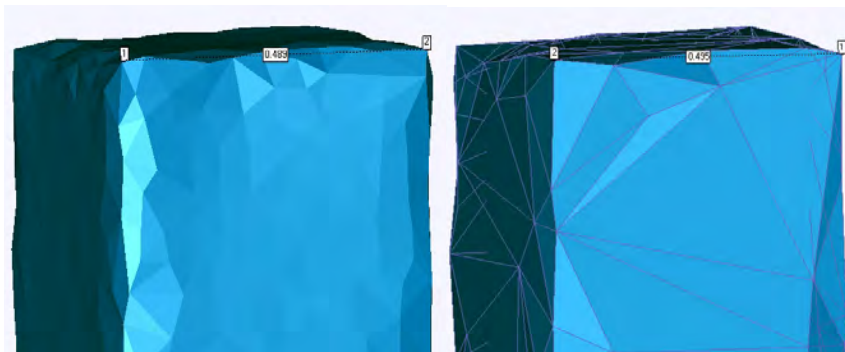


Abb. 6: Ausgangsdatensatz (links) und auf 10% reduzierter Datensatz

Tab. 1: Differenzen zwischen Ausgangsdatensatz und reduzierten Daten [cm]

		Datensatz reduziert auf x Prozent						
		80%	60%	50%	25%	20%	10%	5%
Strecke	1	0,2	0,4	1,1	0,9	1,0	0,5	0,4
	2	-0,1	0,0	-0,5	0,2	-0,1	-0,5	-0,2
	3	0,3	0,1	-0,1	-0,7	-0,8	-0,7	4,5
	4	-4,7	0,8	-7,0	-5,7	-6,1	-4,5	-6,7
	5	-1,5	-2,1	-0,9	0,1	0,0	0,2	2,1
	6	0,3	0,1	0,0	1,3	0,9	1,4	-1,0

5.4. Texturierung des Modells

Zuletzt wurden Teile des Modells mit den erfassten Photos texturiert. Dafür wurden zwei verschiedene Softwarepakete getestet und die Ergebnisse miteinander verglichen. Aufgrund der Modellgröße wurden beispielhaft nur der Turm und ein Inschriftenstein texturiert, um daran die Eignung der unterschiedlichen Programme aufzuzeigen. Die Bearbeitung erfolgte zum einen wie schon auch die Modellierung in Geomagic Studio 9 und zum anderen mit dem Programm QTSculptor (Demo-Version) der Polygon Technology GmbH. Die Ergebnisse waren jedoch beide nicht vollkommen zufriedenstellend. Die Programme realisieren die Registrierung von Bild und Modell über Passpunkte, was nicht immer reibungslos funktionierte, auch nicht bei einer höheren Anzahl von Passpunkten als gefordert. Die größten Probleme gab es beim Einsatz von Geomagic, die Registrierung gelang nur ab und an, ein Grund dafür konnte jedoch nicht gefunden werden. Eine Möglichkeit, die Orientierungen der Bilder zu nutzen gibt es in keinem der beiden Programme. In QTSculptor besteht immerhin die Option, eine Kamerakalibrierung einzugeben, um Verzeichnungen zu berücksichtigen. Ein weiteres Problem ergab sich im Überlappungsbereich zweier Bilder. Dort wurden entweder beide Texturen gemischt, was zu einer Unschärfe in diesem Bereich führte, oder es gab eine klare Kante ohne radiometrische Angleichung der beiden Bilder, die dann deutlich im Modell zu sehen war (Abb. 7).



Abb. 7: Radiometrische Unterschiede in den Texturen

Zudem sind für die Beurteilung der Qualität die Registrierungsgenauigkeiten nicht quantifizierbar und auch nur in QTScultor überhaupt visuell zu kontrollieren. Der texturierte Turm und der Inschriftenstein sind in Abb. 8 dargestellt.



Abb. 8: Turm und Inschriftenstein, texturiert in Geomagic

6 Geplante GIS-Anbindung

Damit auch andere Fachdisziplinen mit diesem Modell arbeiten können, wurde es in das VRML-Format exportiert. Durch die Verwendung eines geeigneten Viewers lässt sich der Tempel nicht nur interaktiv von allen Seiten betrachten, es können auch beliebige Maße abgegriffen werden (Abb. 9 rechts). Damit dient es als wertvolle Informationsquelle für Bauingenieure, Architekten, Statiker und Archäologen und ersetzt in vielen Bereichen das aufwändige Handaufmass. Des Weiteren ist das Modell als Grundlage für eine Datenbank der Ar-

chäologen generiert worden, um dann im Feld z.B. Funde direkt im Modell kartieren und mit Informationen versehen zu können (Abb. 9 links).

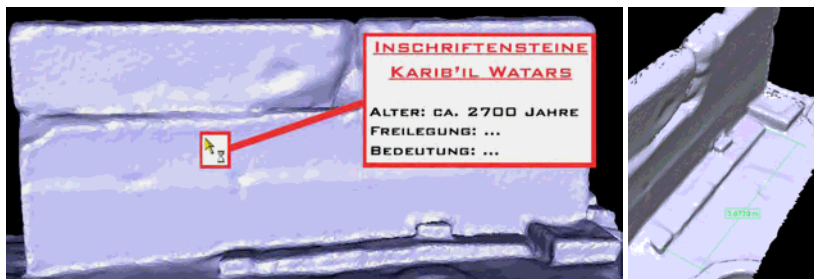


Abb. 9: Einsatzmöglichkeiten des Modells: Datengrundlage für eine GIS-Anbindung (links) und Messung einer Distanz im VRML-Viewer (rechts)

7 Fazit und Ausblick

Mit dieser Arbeit wurde die 3D-Objekterfassung des Almaqah-Tempels in Sirwah/Jemen mit Hilfe des Verfahrens des Laserscannings dargelegt. Der hier eingesetzte Trimble GS101 ermöglichte die Einhaltung der von den Archäologen geforderten Genauigkeit von 3 cm, was durch die photogrammetrischen Daten nachgewiesen werden konnte. Somit kann das Modell als Datengrundlage für verschiedene Forschungsdisziplinen vor Ort dienen.

Die Modellierung durch Dreiecksvermaschung der Punktwolke ergibt ein so gut wie vollständiges Abbild des Tempels, die Auswertung der photogrammetrischen Daten war hierbei gar nicht notwendig. Dabei ist die Modellierung durch Vermaschung sehr viel weniger zeitaufwändig als bei der photogrammetrischen Auswertung und Rekonstruktion in CAD, trotzdem ist das durch die Vermaschung erstellte Modell in seinem Detaillierungsgrad mit einer steigerechten Auswertung gleichzusetzen. Ein großes Problem ist hierbei jedoch immer noch die Datenmenge. Der Laserscanner bietet die Möglichkeit, hohe Datenraten zu erfassen, doch die Auswertung und Weiterverarbeitung dieser Datenmengen auf ein Maß zu reduzieren, das sich problemlos auf jedem Rechner handhaben lässt, gestaltet sich schwierig und ist mit viel Aufwand verbunden. Das hier erstellte Modell hat im VRML-Format eine Dateigröße von 120 MB, was die Handhabung auf einem durchschnittlichen PC schon schwierig macht; eine vollständige Texturierung des Tempels in diesem Detaillierungsgrad würde eine Interaktion des Modells unmöglich machen.

Die hier gezeigten Ansätze zur Texturierung des Modells sind noch keine vollständig zufriedenstellenden Lösungen, so war in beiden eingesetzten Programmen die Verwendung von Bildorientierungen nicht möglich und die Texturierung nur mit großem manuellem Aufwand zu bewältigen. Daher wurden nur beispielhaft wenige ausgesuchte Bereiche texturiert. Eine automatische Texturierung der verschiedenen reduzierten 3D-Modelle des Almaqah-Tempels ist durch die Verwendung der Bildorientierungen und den entsprechenden Kamerakalibrierungsdaten mit der 3D Image Software der TU Braunschweig (ABDELHAFIZ & NIEMEIER 2006) geplant.

Aus diesen Gründen sollte für zukünftige Projekte schon im Vorfeld genau geklärt werden, ob eine photogrammetrische Aufnahme bzw. Auswertung gewünscht ist, oder ob Bilder nur zur Texturierung des Objektes aufgenommen werden sollen. Ist das Modell mit einer hohen Genauigkeit als Datengrundlage für Analysen etc. zu generieren, so ist bei dieser Objektgröße

eine Texturierung mit dem heutigen Stand der Technik hinsichtlich Hard- und Software nicht auch noch möglich. Steht hingegen die Visualisierung im Vordergrund, dann sollte das Modell schon von vornherein so vereinfacht werden, dass eine Anwendung nicht nur auf High-End-PCs, sondern für jedermann möglich ist.

8 Literaturverzeichnis

- ABDELHAFIZ, A. & NIEMEIER, W., 2006: Developed technique for automatic cloud texturing using multi images applied to a complex site. IAPRS Volume XXXVI, Part 5, H.-G. Maas, D. Schneider (Eds.), Dresden 25-27 September 2006. http://rcswww.urz.tu-dresden.de/~isprs/proceedings/paper/ABDE_610.pdf
- EL-HAKIM, S. F.; FRYER, J.; PICARD, M. & WHITING, E., 2004: Digital Recording of Aboriginal Rock Art. Proceedings of the 10th International Conference on Virtual Systems and Multimedia (VSMM'2004), Ogaki, Japan, November 17-19, pp. 344-353, NRC48049.
- GERLACH, I., 2003: Die archäologisch-bauhistorischen Untersuchungen in der sabäischen Stadtanlage und Oase von Sirwah. Artikel aus 25 Jahre Ausgrabungen und Forschungen im Jemen -1978-2003, Hefte zur Kulturgeschichte des Jemen – Band 1, pp. 96 – 105. Print Art – Sana'a.
- GÖTTING, M., & HEIDEN, R., 2007: Interaktives virtuelles 3D-Modell der antiken Tempelanlage in Sirwah/Jemen zur archäologischen Objektdokumentation durch terrestrisches Laserscanning und Photogrammetrie. Unveröffentlichte Diplomarbeit, HafenCity Universität Hamburg, August
- LAMBERS, K., 2004: The Geoglyphs of Palpa, Peru: Documentation, Analysis and Interpretation. Thesis presented to the Faculty of Arts of the University of Zurich for the degree of Doctor of Philosophy, 214 S.
- LINDSTAEDT, M.; KERSTEN, TH.; SAUERBIER, M.; PETERHANS, J. & FUX, P., 2007: Terrestrisches Laserscanning und digitale Photogrammetrie zur archäologischen Dokumentation der Petroglyphen von Chichictara in Peru. Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik - Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2007, Th. Luhmann/C. Müller (Hrsg.), Wichmann Verlag, Heidelberg, pp. 328-337.
- SOMMER, A. & KERSTEN, TH., 2007: 3D-Modell des Nordportals des alten Dammes in Marib/Jemen durch Kombination von digitaler Architekturphotogrammetrie und terrestrischem Laserscanning. Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik - Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2007, Th. Luhmann/C. Müller (Hrsg.), Wichmann Verlag, Heidelberg, pp. 300-309.

Dynamische 3D Oberflächenerfassung mit Bildsequenzen

THOMAS LUHMANN, FOLKMAR BETHMANN, BENJAMIN HERD & JULIA OHM¹

Zusammenfassung: Der vorliegende Beitrag beschreibt einen Ansatz zur 3D-Erfassung von Oberflächen in dynamischen Anwendungen mit Hilfe von Mehrbildsequenzen. Die technische Lösung basiert auf Mehrbildmatching mit zusätzlichen geometrischen Bedingungen. Für die Korrespondenzanalyse wird sowohl das Verfahren der Kreuzkorrelation als auch das Verfahren des Least-Squares-Matchings herangezogen. Eine Besonderheit ist dabei die Erweiterung des Least-Squares-Matching-Ansatzes von der üblichen Affintransformation auf die Projektivtransformation.

Nach der Beschreibung des Verfahrens folgt die Darstellung der Ergebnisse eines Laborversuches an einer verformbaren Membran. Abschließend wird eine Genauigkeitsuntersuchung mit Hilfe eines 3D-Flächenprüfkörpers vorgenommen.

1 Einleitung

Die flächenhafte dreidimensionale Erfassung von nahezu beliebig geformten Objektoberflächen gehört heutzutage zu den Standardaufgaben der optischen 3D-Messtechnik. Verschiedene und für bestimmte Anwendungen optimal konfigurierte Systeme existieren am Markt, wobei die eingesetzten Verfahren stark von den Umgebungsbedingungen wie z.B. der Größe des Messvolumens, der Struktur der Objektoberfläche und der erforderlichen zeitlichen und geometrischen Auflösung abhängen. Häufig kommen Streifenprojektionssysteme zum Einsatz, die komplexe geometrische Formen in hoher Punktfolge erfassen, Messungen in hoher zeitlicher Auflösung jedoch nur begrenzt leisten können, da stationäre Aufnahmebedingungen und über längere Zeiträume unbewegte Objektoberflächen vorausgesetzt werden. Über das derzeit schnellste Streifenprojektionssystem am Markt berichtet HÖFLING et al. (2008).

In Abgrenzung zu derartigen Systemen richtet sich der Fokus bei der Entwicklung des in diesem Beitrag vorgestellten Ansatzes auf die Erfassung flächenhafter Deformationen für hochdynamische Prozesse. Typische Anwendungsbereiche hierfür liegen vor allem im industriellen Umfeld im Bereich des Automobilbaus bei der Auswertung von Crashversuchen oder im Bereich der zerstörungsfreien Materialprüfung.

Kernstück des Verfahrens ist die Verwendung von Normalbildern für die Bildzuordnung sowie die Kombination des Korrelationsverfahrens mit einem um zwei zusätzliche Geometrieparameter erweiterten Ansatzes des Least-Squares-Matching. Im Folgenden werden zunächst die Rahmenbedingungen und die elementare Struktur der Eingangsdaten beschrieben. Anschließend werden die einzelnen Komponenten sowie deren Zusammenspiel im Matchingprozess kurz erläutert. Der Verfahrensbeschreibung schließt sich die Darstellung der Ergebnisse eines an einer verformbaren Membran durchgeführten Laborversuches an. Weiterhin folgt eine Genauigkeitsevaluierung an einem eigens hierfür hergestellten und vermessenen 3D-Flächenprüfkörper.

¹⁾ Institut für Angewandte Photogrammetrie und Geoinformatik (IAPG), Fachhochschule Oldenburg/Ostfriesland/Wilhelmshaven, Ofener Str. 16-19, D-26121 Oldenburg, E-Mail: luhmann@fh-ooow.de, folkmar.bethmann@fh-ooow.de, benjamin.herd@fh-ooow.de, julia.ohm@fh-ooow.de

2.3 Normalbildberechnung

In einem ersten Schritt werden die Originalbilder in Normalbilder umgerechnet (Abb. 2). Die hierfür notwendigen Transformationsparameter zur Beschreibung der räumlichen Lage des Normalbildes in Bezug zum Originalbild ergeben sich aus den Parametern der äußeren Orientierung (z.B. LUHMANN 2003, LUHMANN et al. 2006).

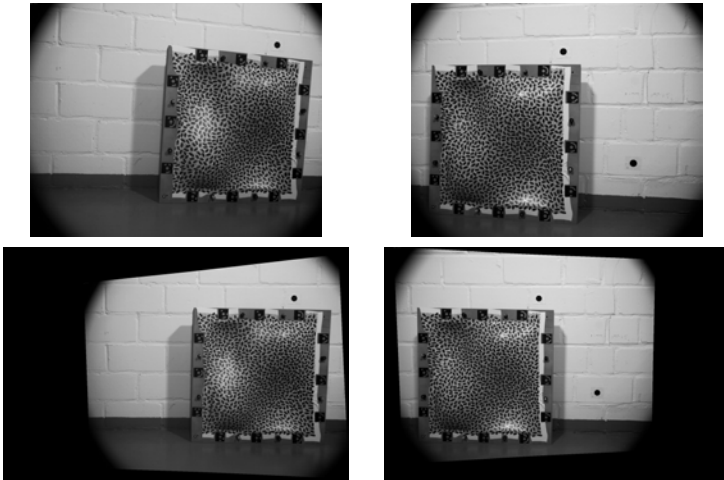


Abb. 2: Originalstereobilder und daraus abgeleitete Normalbilder

Die Nutzung von Normalbildern hat die wesentlichen Vorteile, dass die Einflüsse der Verzeichnung korrigiert sind und sich die Epipolargeometrie stark vereinfacht. Die Kernlinien liegen parallel zu den x' - und x'' -Richtungen der Bildkoordinatensysteme, so dass die Grauwerte der Pixel einer Bildzeile direkt einer Kernlinie zugeordnet werden können. Schließlich wird der spätere Matchingprozess so konfiguriert, dass nur homologe Punkte auf korrespondierenden Kernlinien gefunden werden und somit ein Stereomatching mit geometrischen Bedingungen realisiert wird.

2.4 Korrespondenzanalyse: Korrelationsverfahren

Grundlage des hier vorgestellten Verfahrens bildet das allgemein bekannte Verfahren der normierten Kreuzkorrelation.

Um den Suchbereich für die Korrelation sinnvoll einschränken zu können, werden 3D-Koordinaten von Punkten im Objektkoordinatensystem benötigt, die näherungsweise auf der Objektoberfläche liegen müssen. Über die Kollinearitätsgleichungen lassen sich für diese Punkte in beiden Bildern zugehörige Bildkoordinaten berechnen, die zur Festlegung der Such- und Referenzfensterpositionen verwendet werden. Auf verschiedene Möglichkeiten der Näherungswertbeschaffung wird in 2.6 detaillierter eingegangen.

Die Verwendung von Normalbildern bedingt, dass die Verschiebung des Referenzausschnittes über den Suchausschnitt entlang der Bildzeilen (Kernlinien) erfolgen kann. Auch hat sich gezeigt, dass die Nutzung von zeilenförmigen Such- und Referenzausschnitten für eine erfolgreiche Korrelation oft schon ausreichend ist. Die Verwendung von zeilenförmigen Korrelationsfenstern macht das Verfahren robuster gegen perspektivische Verzerrungen zwischen den Bildern.

2.5 Korrespondenzanalyse: Least-Squares-Matching

Das Korrelationsverfahren stößt für bestimmte Aufnahmekonstellationen an seine Grenzen. So führen Maßstabsunterschiede, Rotationen oder andere Verzerrungen zwischen Referenz- und Suchbild dazu, dass sich das Ähnlichkeitsmaß drastisch verringert (PIECHEL 1991). Derartige Unterschiede zwischen den Bildern treten auf, wenn die Objektoberfläche in Bezug zu den optischen Achsen der Kameras stark geneigt ist oder die Bilder unter einem großen Konvergenzwinkel aufgenommen werden. Zur Kompensation dieser Nachteile verwendet der vorgestellte Ansatz das Verfahren der Bildzuordnung nach kleinsten Quadraten (Least Squares Matching, LSM) (FÖRSTNER 1982, GRUEN 1985). Das LSM hat zum Ziel, im Zuge einer Ausgleichung nach vermittelnden Beobachtungen die Grauwertdifferenzen zwischen Referenz- und Suchbild iterativ zu minimieren. Das der Ausgleichung zu Grunde liegende funktionale Modell beinhaltet eine radiometrische Transformation zur Anpassung von Kontrast- und Helligkeitsunterschieden und eine geometrische Transformation zur Anpassung der beschriebenen geometrischen Verzerrungen zwischen den Bildausschnitten. In herkömmlichen Verfahren wird für die geometrische Transformation i.d.R. der Ansatz der ebenen Affintransformation verwendet, so dass sechs unbekannte Transformationsparameter bestimmt werden müssen.

Alternativ zur Affintransformation verwendet das hier vorgestellte Verfahren den Ansatz der Projektivtransformation zur geometrischen Anpassung der Bildausschnitte. Auf diese Weise wird mit Hilfe von acht Transformationsparametern die zentralprojektive Abbildung zweier ebener Koordinatensysteme aufeinander beschrieben. Das funktionale Modell lautet dann

$$\begin{aligned}
 f_i(x', y') - e_i(x', y') &= r_0 + r_1 \cdot g_i(x'', y'') & i &= 1, \dots, n \\
 x'' &= \frac{a_0 + a_1 \cdot x' + a_2 \cdot y'}{1 + c_1 \cdot x' + c_2 \cdot y'} & n &= p \cdot q \text{ (Fenstergröße)} \\
 y'' &= \frac{b_0 + b_1 \cdot x' + b_2 \cdot y'}{1 + c_1 \cdot x' + c_2 \cdot y'} & n &\geq 8
 \end{aligned}
 \tag{eq. 1}$$

Die Projektivtransformation ist verglichen mit der Affintransformation der mathematisch strengere Ansatz, da die Eigenschaft der zentralperspektiven Abbildung bei der Bildaufnahme mit herkömmlichen Kameraoptiken Berücksichtigung findet. Der Ansatz enthält implizit die Forderung, dass der in Such- und Referenzfenster abgebildete Oberflächenbereich annähernd eben ist.

Die Beobachtungsgleichungen der Ausgleichung sind nicht linear und müssen daher an Näherungswerten linearisiert werden. Für ein erfolgreiches Ausgleichungsergebnis ist die Qualität dieser Näherungswerte, insbesondere für die Translationsparameter a_0 und b_0 von entscheidender Bedeutung. Zur Initialisierung dieser Parameter werden die Ergebnisse aus der Korrelation verwendet, solange der maximale Kreuzkorrelationskoeffizient einen Schwellwert von 0,2 nicht unterschreitet. Es hat sich gezeigt, dass vermeintlich schlechte Korrelationsergebnisse mit Korrela-

tionskoeffizienten knapp über dem Wert 0,2 für die Initialisierung der LSM-Parameter oft noch ausreichend sind.

Im Anschluss an die Korrespondenzanalyse kann über die ermittelten homologen Bildpunkte durch die Berechnung eines räumlichen Vorwärtsschnittes eine 3D-Koordinate auf dem Objekt berechnet werden.

2.6 Näherungswerte

Wesentliche Voraussetzung für eine erfolgreiche Stereobildzuordnung sind gute 3D-Näherungskordinaten auf der Objektoberfläche. Der vorgestellte Ansatz nutzt drei Möglichkeiten zur Beschaffung solcher Näherungswerte:

- Berücksichtigung der örtlichen Umgebung eines Punktes (Nachbarschaft)
- Berücksichtigung der örtlichen und zeitlichen Umgebung eines Punktes (vorherige Epochen)
- Durchführung von Vorauswertungen in Bildpyramiden

Eine besondere Strategie bei der Wanderung über die Oberfläche sorgt dafür, dass die örtliche Umgebung eines Punktes bei der Ermittlung eines Näherungswertes Berücksichtigung findet. Ausgehend von einem manuell zu setzenden Startpunkt wird das $2\frac{1}{2}$ D-Raster mäanderförmig durchlaufen (Abb. 1), wobei jeweils die ermittelte Z-Koordinate des vorherigen Punktes als Startwert für den nächsten Punkt verwendet wird. Diese Vorgehensweise gewährleistet den Erhalt der direkten Punktnachbarschaften. Die Entscheidung, ob ein Punkt als Näherungswert verwendet wird, richtet sich nach seiner Qualität. Die Qualität des Näherungswertes ist im Wesentlichen von der gewählten Rasterweite und der Oberflächeneigung abhängig.

Liegen in der unmittelbaren Nachbarschaft eines Punktes keine erfolgreich gemessenen Punkte vor, kann, sofern vorhanden, auf vorherige Epochen zurückgegriffen werden. Die Qualität eines solchen Näherungswertes ergibt sich aus der zeitlichen Auflösung der Kameras und der Deformationsgeschwindigkeit der Oberfläche.

Eine weitere Möglichkeit der Näherungswertbeschaffung liegt in der Option, Vorauswertungen in Bildpyramiden durchzuführen. Bilder mit verringerter Pixelauflösung werden zur Bestimmung von Oberflächenpunkten mit Hilfe des Korrelationsverfahrens herangezogen. Das Ergebnis umfasst eine $2\frac{1}{2}$ D-Punktwolke in verringerter Ortsauflösung, aus der Näherungswerte für die Zielauflösung bilinear interpoliert werden. Diese Art der Näherungswertbeschaffung ist nur unter der Bedingung, dass die Textur der Oberfläche eine Verringerung der Bildauflösung mit weiterhin erkennbaren Merkmalen gestattet, anwendbar.

3 Test an einer Membran

Die Entwicklung eines einfachen Versuchsaufbaus ermöglicht die Durchführung erster Tests. Ziel ist hierbei zunächst nicht, die erreichbaren Genauigkeiten für gemessene Objektpunkte zu ermitteln, sondern das Verhalten des Verfahrens für eine einfache und unter Laborbedingungen erzeugte Oberflächendeformation zu untersuchen.

Dazu wird eine verformbare und mit einem stochastischen Specklemuster versehene Membran von einer digitalen Videokamera (AVT Marlin F-145B2) beobachtet (Abb. 3). Durch das Verwenden eines Spiegelstereovorsatzes wird ein Stereomodell erzeugt. Die im unverformten

Zustand näherungsweise ebene Membran wird an einem Punkt deformiert. Auf diese Weise entstehen im Bereich der maximalen Deformation Oberflächenneigungen, die in Bezug zu den optischen Achsen des Aufnahmesystems Neigungswinkel von bis zu 30° annehmen (Abb. 3). Die Erfassung der Deformation erfolgt bei einer Bildrate von 15 fps in 50 Epochen. Bei einer gewählten Ortsauflösung am Objekt von 3 Millimetern und einer vollständigen Erfassung der Membran werden pro Epoche etwa 2500 Punkte und insgesamt rund 125000 Punkte gemessen. Eine visuelle Kontrolle der Punktwolken aller Epochen ergibt keinen Hinweis auf grobe Fehler in der Punktbestimmung.

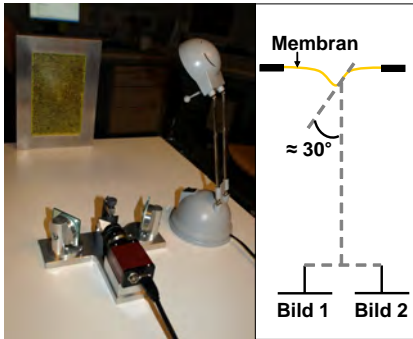


Abb. 3: Versuchsaufbau

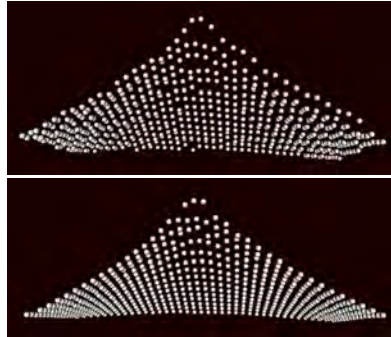


Abb. 4: Ergebnisse

Abb. 4 zeigt die Ergebnisse zweier Berechnungen, die mit unterschiedlichen Einstellungen für den Zeitpunkt der maximalen Deformation durchgeführt wurden. Für die obere Darstellung wurde ausschließlich das Korrelationsverfahren zur Punktbestimmung angewendet. Für die untere Darstellung wurden die Ergebnisse aus der Korrelation als Näherungswerte für das Least-Squares-Matching verwendet. Die Bildanpassung erfolgte in sieben Iterationen, wobei für jede Iteration alle 10 Parameter als unbekannte Größen in die Ausgleichung eingeführt wurden. Der Vergleich beider Punktwolken weist auf eine deutliche Verbesserung des Ergebnisses hin. Die erzeugte Punktwolke ist sowohl in Bereichen geringer als auch starker Oberflächenneigung deutlich glatter. Der Genauigkeitseinfluss des Least-Squares-Matching bei der Bestimmung der Objektpunkte wird im folgenden Kapitel untersucht.

4 Genauigkeitsuntersuchung

4.1 3D-Flächenprüfkörper

Zur Verifizierung der Genauigkeit des Verfahrens wird ein 3D-Flächenprüfkörper verwendet. Der Referenzkörper besteht aus dem Industriekunststoff Ureol und wurde aus einem Stück mit einer CNC-Portalfräsmaschine gefräst. Die Oberfläche repräsentiert eine Freiformoberfläche in Form einer doppelten Sinuskurve mit einer Ausdehnung von $400\text{ mm} \times 400\text{ mm} \times 100\text{ mm}$. Diese wird von einem 50 mm breiten ebenen Rand umgeben. Insgesamt hat der Referenzkörper eine Größe von $500\text{ mm} \times 500\text{ mm} \times 200\text{ mm}$. Auf dem ebenen Rand befinden sich vier Bohrungen, jeweils in den Ecken des Körpers. Des Weiteren sind am Referenzkörper acht

Hubbs-Targets (vier Kugeln und vier Zylinder) befestigt sowie zwölf codierte Marken aufgeklebt (Abb. 5).

Die erforderlichen Referenzdaten der Oberfläche, der Bohrungen und der Passpunktkugeln wurden mit einer Koordinatenmessmaschine vom Typ Leitz PMM 12106 ermittelt. Die Genauigkeit erfolgt aus der Angabe nach der VDI/VDE 2617 mit

$$0,8[\mu\text{m}] + l[\text{mm}] / 400[\text{mm}]. \quad \text{eq. 2}$$

Für den verwendeten Referenzkörper resultiert daraus eine theoretische Genauigkeit von 2 μm . Das Koordinatensystem wurde über zwei Seitenflächen und über die Ebene des Randes (3-2-1 Methode) ausgerichtet.



Abb. 5: Referenzkörper mit Textur

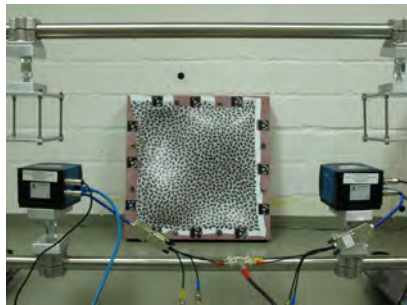


Abb. 6: Versuchsaufbau

Um für die spätere Auswertung die codierten Marken nutzen zu können, wurden diese photogrammetrisch erfasst und über die vier Passpunktkugeln in das Referenzkörper-Koordinatensystem transformiert.

Die Oberfläche des Referenzkörpers verfügt über keine eigene Textur. Um eine Identifizierung homologer Punkte in der späteren Auswertung zu gewährleisten, muss die Oberfläche mit einer künstlichen Textur versehen werden. Dafür wird eine flexible Folie mit einer Stärke von kleiner 0,1 mm auf die Oberfläche geklebt. Die Folie wird vorher mit einem für die Auswertung geeigneten Muster bedruckt.

4.2 Versuchsbeschreibung und Versuchsdurchführung

Für die Aufnahme des Referenzkörpers wurden zwei digitale High-Speed-Kameras der Reihe SpeedCam MiniVis von Weinberger verwendet. Die Bildauflösung der Kameras beträgt 1280 x 1024 Pixel mit einer Pixelgröße von 12 μm . Ihre Aufnahmefrequenz beträgt 500 Hz in Vollauflösung. Durch ein externes Triggersignal besteht bei den Kameras die Möglichkeit zur synchronen Bildaufnahme. Die Kameras wurden mit Pentax 12,5 mm-Objektiven ausgestattet. Aufgrund der geringen Belichtungszeit der High-Speed-Kameras wurden zwei Standstrahler mit jeweils 500 Watt verwendet.

Das Muster, mit dem der Referenzkörper beklebt wurde, sollte kontrastreich und zufällig sein. Hierfür wurde ein Ellipsenmuster verwendet, es besitzt den erforderlichen Kontrast und Gradienten in allen Richtungen (LUHMANN et al. 2006). In der verwendeten Textur überlagern sich zwei

Muster, die sich in ihrer Ellipsengröße und in den Grauwerten unterscheiden. Die Textur ist für die Auswertung von Bildpyramiden geeignet.

Für den Versuchsaufbau wurde die Aufnahmeconfiguration so gewählt, dass eine gute Strahlenschnittgeometrie erreicht wird (Abb. 6). Die Kameras wurden mit einem Basisabstand von ca. 600 mm und einer Objektentfernung von ca. 700 mm aufgebaut. Die Kameras haben dabei einen Konvergenzwinkel von ca. 10° , damit bei der vorhandenen Anordnung der Kameras eine komplette Aufnahme des Objektes gewährleistet ist.

Die zu erwartenden Genauigkeiten der Objektkoordinaten berechnen sich über die Varianzfortpflanzung des Vorwärtsschnittes. In X- und Y-Richtung lässt sich eine Genauigkeit von 0,05 mm und in Z-Richtung eine Genauigkeit von 0,12 mm bei einer angenommenen Bildmessgenauigkeit von 1/10 Pixel erreichen.

Die Bilder wurden mit der vollen Kameraauflösung von 1280 x 1024 Pixel aufgenommen. Die Pixelgröße am Objekt beträgt ca. 0,7 mm x 0,7 mm. Die Auswertung wurde für eine statische Aufnahmesituation vorgenommen, d.h. es wurde lediglich eine Epoche ausgewertet.

4.3 Ergebnisse

Das Verfahren der flächenbasierten Bildzuordnung kann mittels Kreuzkorrelation oder Least-Squares-Matching angewendet werden. Bei der Auswertung können mehrere Parameter variabel eingestellt werden. Ausgewertet wurde der komplette Bereich der Sinuskurven. Der Startwert sollte dabei hinreichend genau auf der Objekt Oberfläche liegen, da dieser Wert als erster Näherungswert in die Berechnung eingeht. Die besten Ergebnisse ergaben sich bei Anwendung des Least-Squares-Matching (Abb. 7).

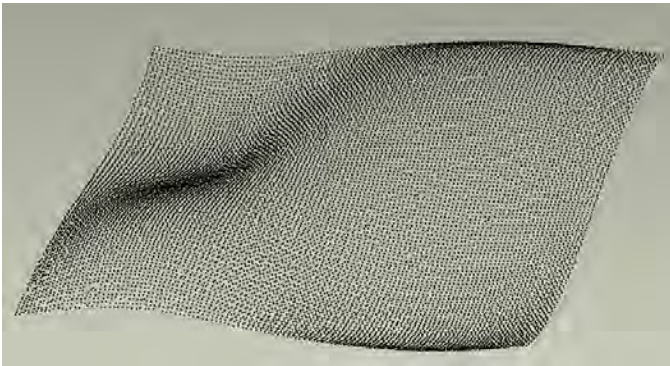


Abb. 7: Berechnete Punkt Wolke

Die Genauigkeit des Verfahrens der digitalen Bildzuordnung lässt sich mit einem Soll-Ist-Vergleich abschätzen. Nach Optimierung der Eingangsparameter für die Bildzuordnung wird die berechnete Punkt Wolke mit der Sollgeometrie des zuvor beschriebenen Referenzkörpers aus der KMG-Messung verglichen. Hierbei wird der kürzeste Abstand zwischen dem jeweiligen Punkt und der Oberfläche der Sollgeometrie des Referenzkörpers ermittelt und für die Punkt Wolke die

Standardabweichung bestimmt. Für die Zuordnung der Punktwolke resultiert eine Standardabweichung von 0,173 mm.

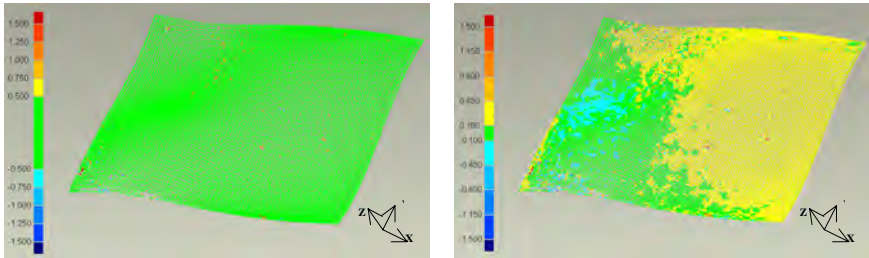


Abb. 8: 3D-Analyse des LSM in Geomagic

Abb. 8 zeigt den Soll-Ist-Vergleich in graphischer Darstellung unter Verwendung unterschiedlicher Intervallgrenzen. Im linken Bild wurde ein Toleranzintervall von $\pm 0,5$ mm gewählt. Für die Erfassung dynamischer Oberflächendeformationen im Fahrzeugsicherheitsversuch liegt die geforderte Genauigkeit innerhalb dieses Intervalls. Von den 15 200 Punkten befinden sich 99% in der geforderten Genauigkeit. Diese sind in der Abbildung grün dargestellt. Im rechten Bild der Abb. 8 wurde das Toleranzintervall auf $\pm 0,1$ mm verkleinert. Hierbei werden systematische Abweichungen deutlich. Im rechten Teil des Referenzkörpers befindet sich die überwiegende Anzahl der berechneten Punkte über der Sollgeometrie, im linken Teil liegt die überwiegende Anzahl der Punkte noch im Intervallbereich von $\pm 0,1$ mm oder unterhalb der Sollgeometrie. Mögliche Ursachen für diese Systematiken sind Modellverbiegungen als Folge von Restfehlern in den Orientierungen, insbesondere der Transformation in das Koordinatensystem der KMG-Referenzmessung. Auch sind verfahrensbedingte Systematiken nicht auszuschließen.

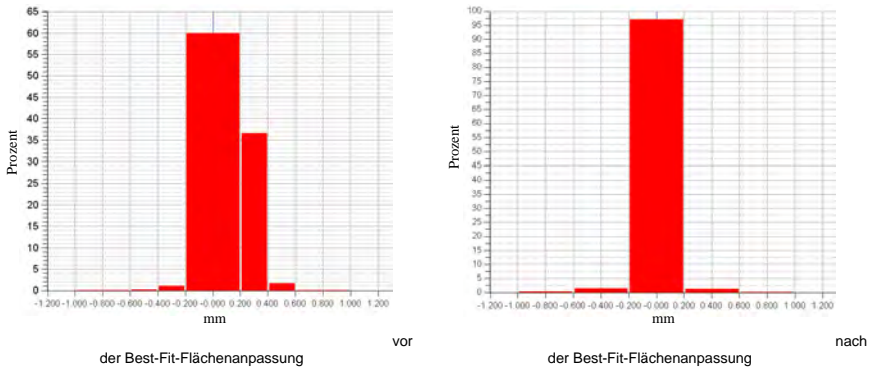


Abb. 9: Abweichungstabelle

Wird eine Best-Fit-Anpassung der beiden Punktwolken berechnet, so liegen 97% der berechneten Punkte im Bereich von $\pm 0,2$ mm (Abb. 9) und noch 83% in einem Intervall von $\pm 0,1$ mm. Für die Punktwolke resultiert eine Standardabweichung von 0,100 mm. Damit wird deutlich,

dass das Genauigkeitspotenzial beim LSM bei ca. 0,15 Pixel liegt. Vor der Best-Fit-Anpassung lagen 60% der berechneten Punkte in dem definierten Intervall von $\pm 0,2$ mm (Abb. 9).

5 Ausblick

Das hier vorgestellte Verfahren bietet eine gute Möglichkeit dynamische Verformungen an Oberflächen dreidimensional zu erfassen. Daher wird die Weiterentwicklung des Verfahrens, hinsichtlich der in der Praxis vorkommenden Probleme vorangetrieben. Beispielhaft zu nennen sind hier der Umgang mit Unstetigkeiten auf der Oberfläche sowie der Umgang mit Störkörper, die den Objektraum kreuzen oder darin enthalten sind.

6 Literaturverzeichnis

- FÖRSTNER, W., 1982: On the geometric precision of digital correlation. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. Vol. 26/3: 150-166.
- GRUEN, A. 1985: Adaptive least squares correlation – a powerful image matching technique. South African Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Cartography, 14(3): 175-187.
- HÖFLING, R.; ASWENDT, P. & RICHTER, A., 2008: 3D- Formerfassung im Videotakt. Vortrag 7. Oldenburger 3D-Tage 2008, <http://www.fh-ooow.de/institute/japg/workshop/fohlen/hoefling.pdf> , Zugriff 02/2008.
- LUHMANN, T., 2003: Nahbereichsphotogrammetrie – Grundlagen, Methoden und Anwendungen. 2. Auflage, Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg.
- LUHMANN, T. & RAGUSE, K., 2004: Synchronous 3-D High-Speed Camera with Stereo-Beam Splitting. SENSOR 2005, 12th International Conference, AMA Service: 443-448.
- LUHMANN, T.; WENDT, A. & GODDING, R., 2006: Dynamische Oberflächenkonstruktion in Stereobildsequenzen von Hochgeschwindigkeitskameras. Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation, Jahrgang 2006, Heft 5, S. 427-438.
- PIECHEL, J., 1991: Stereobild-Korrelation. In Bähr/Vögtle (ed.): "Digitale Bildverarbeitung – Anwendung in Photogrammetrie, Kartographie und Fernerkundung". Wichmann Verlag, Heidelberg: 96-132.

Linienbasierte Referenzierung zwischen Einzelbildern und Laserscannerdaten für eine bildgestützte Interpretation von Punktwolken in einer CAD-Umgebung

NADINE MEIERHOLD¹, ANNE BIENERT¹ & ARMIN SCHMICH²

Zusammenfassung: Der folgende Beitrag befasst sich mit der geometrischen Referenzierung zwischen digitalen Einzelbildern und terrestrischen Laserscannerpunktwolken auf Basis von im Bild und in der Punktwolke gemessenen Geraden. Es werden zwei linienbasierte Methoden vorgestellt. Der erste Linienansatz basiert auf einer Punkt-zu-Gerade Korrespondenz und stellt eine Erweiterung der Kollinearitätsgleichungen dar. Im Gegensatz dazu werden für den zweiten Ansatz auch im Bildraum Geradenmerkmale verwendet. Die beiden Methoden wurden implementiert und an zwei verschiedenen Datensätzen getestet. Ein wichtiger Aspekt ist hierbei ihre Eignung für eine bildgestützte Interpretation der Punktwolken z.B. durch Monoplotting.

1 Einleitung

Ein Softwaresystem zur Darstellung und Auswertung von Punktwolken in *AutoCAD* ist das Produkt *PointCloud* der Firma kubit GmbH in Dresden. Neben der manuellen Auswertung der Punktwolken mit Hilfe der zur Verfügung stehenden *AutoCAD*-Befehle, ist auch eine halbautomatische Modellierung durch Ebenenfiting und Verschneidung dieser Ebenen möglich. Außerdem ist eine kombinierte Auswertung von Bild- und Laserscannerdaten nach dem Prinzip des Monoplottings integriert. Im Bild gezeichnete Elemente z.B. Punkte und Kanten werden direkt geometrisch korrekt in die Punktwolke übertragen. Hierbei werden die Vorteile beider Datentypen ausgenutzt: die hohe geometrische Auflösung und der hohe Interpretationsgrad der Bilder sowie die genauen 3D Informationen der Laserscannerpunktwolken.

Voraussetzung für die gemeinsame Nutzung von Bildern und Laserscannerpunktwolken für Messprozesse ist eine genaue geometrische Referenzierung zwischen den Daten. Aus diesem Grund bezieht sich dieser Beitrag auf die Referenzierung zwischen Laserscannerpunktwolken und unabhängig aufgenommenen Einzelbildern. Das Ziel besteht darin, die äußere Orientierung eines Einzelbildes aus im Bild und in der Punktwolke identischen Punkten oder Linien zu bestimmen. Falls die Bilddaten mit einer Amateurkamera aufgenommen wurden, sollte auch eine simultane Kalibrierung der Kamera möglich sein.

Erste Auseinandersetzungen hinsichtlich der relativen und absoluten Bildorientierung mit Linien sind in KUBIK (1991) dargelegt. Seitdem wurden auf dem Gebiet der Linienphotogrammetrie zahlreiche Publikationen mit verschiedenen Ansätzen veröffentlicht (u.a. HABIB et. al, 1999; PATIAS et. al, 1995; TOMMASELLI & TOZZI, 1996; HEMKEN & LUHMANN, 2002).

¹ Nadine Meierhold und Anne Bienert, Technische Universität Dresden, Helmholtzstraße 10, 01069 Dresden, E-Mail: Nadine.Meierhold@tu-dresden.de und Anne.Bienert@tu-dresden.de

² Armin Schmich, kubit GmbH, Fiedlerstraße 36, 01307 Dresden, E-Mail: armin.schmich@kubit.de

In SCHENK (2004) werden zwei grundsätzliche Linienansätze unterschieden: der Kollinearitäts- und der Koplanaritätsansatz. HEUVEL (2003) stellt u.a. einen Ansatz zur Bestimmung der äußeren Orientierungsparameter aus den parallelen Geraden einer Ebene vor. Mit Hilfe von 3 Eckpunkten, der sich schneidenden Geraden und dem Projektionszentrum, wird über den Volumenansatz eines Tetraeders die äußere Orientierung abgeleitet.

Das 2. Kapitel stellt zwei Methoden zur Referenzierung von Einzelbildern anhand von Linien vor, von denen der erste Ansatz auf dem Kollinearitätsmodell der Punkte beruht. Im 3. Abschnitt werden die vorgestellten Methoden an zwei Datensätzen getestet und die Ergebnisse der punkt- und linienbasierten Orientierung vorgestellt und analysiert. Ein kurzer Ausblick (Abschnitt 4) beendet den Beitrag.

2 Methoden zur linienbasierten Referenzierung von Einzelbildern

Die Orientierung eines Bildes zu einer Punktwolke kann auf im Bild und in der Punktwolke identischen Punkten oder Linien basieren. Bei Verwendung von Passpunkten kann diese durch einen räumlichen Rückwärtsschnitt realisiert werden. Die Notwendigkeit der Messung diskreter Punkte in der Punktwolke stellt sich bei der punkt-basierten Referenzierung als Nachteil heraus, da aufgrund der Unterabtastung des Laserscanners ein markanter Punkt nicht immer durch einen Messpunkt repräsentiert wird. Linienbasierte Verfahren haben dagegen den großen Vorteil, dass es nicht notwendig ist, im Bild und in der Punktwolke identische Punkte zu detektieren, was zum Beispiel bei Objektverdeckungen Probleme bereitet. Der Übergang von einem punkt-basierten Ansatz zu linienbasierten Methoden stützt sich auch auf die Tatsache, dass viele anthropogene Objekte (z.B. Fassaden in der Architektur) zahlreiche geradlinige Merkmale aufweisen, die für die Aufgabe der Bildorientierung genutzt werden können. Dazu kommt, dass Linien sowohl aus Punktwolken als auch aus Bildern einfacher automatisch zu extrahieren sind als diskrete Punkte. Aus den in der Literatur bereits vorhandenen Ansätzen zur Linienphotogrammetrie wurden zwei Methoden ausgewählt, die in den nächsten Abschnitten näher beschrieben werden.

2.1 Linienmethode mit Punkt-zu-Linie Korrespondenz

Ein Linienansatz mit einer Punkt-zu-Linie Beziehung wurde bereits von KUBIK (1991) zur Bestimmung der sieben Transformationsparameter bei der absoluten Orientierung verwendet. Hierbei wurden die Passpunkte des übergeordneten Zielsystems durch „Passgeraden“ ersetzt. Als Passpunkte im Ausgangssystem dienten dann zu den Passgeraden korrespondierende Punkte. Zur Auswertung von Bildverbänden bei der Aerotriangulation führte SCHENK (2004) erweiterte Kollinearitätsgleichungen als Beobachtungsgleichungen in die Bündelblockausgleichung ein. Diese Arbeit liefert den im Weiteren dargestellten Ansatz zur Orientierung eines Einzelbildes.

2.1.1 Mathematisches Modell

Diese erste Linienmethode basiert auf der Definition von Objektgeraden in der Punktwolke und Messung von Punkten auf den zugehörigen Linien im Bild. Für die Objektgeraden wurde eine 4-Parameter-Beschreibung gewählt, die aus 2 Lageparametern (x_0 , y_0) und 2 Orientierungsparametern (α , θ) besteht (s. Abschnitt 2.1.2).

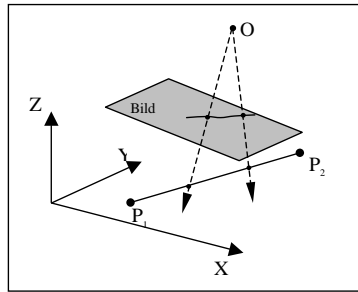


Abb. 1: Prinzip der Linienmethode mit Punkt-Gerade Beziehung

Das Prinzip dieses Ansatzes besteht darin, die Projektionsstrahlen von den Bildpunkten durch das Projektionszentrum mit den zugehörigen Objektgeraden zum Schnitt zu bringen (s. Abbildung 1).

Mathematisch wird diese Punkt-zu-Gerade Korrespondenz durch Erweiterung der Kollinearitätsgleichungen beschrieben, indem die Objektkoordinaten durch die jeweilige Zeile der Objektgeraden ersetzt werden (s. Gleichung 1).

$$\begin{aligned}
 x &= x_h - c \cdot \frac{r_{11} \cdot (X - X_0) + r_{21} \cdot (Y - Y_0) + r_{31} \cdot (Z - Z_0)}{r_{13} \cdot (X - X_0) + r_{23} \cdot (Y - Y_0) + r_{33} \cdot (Z - Z_0)} + dx \\
 y &= y_h - c \cdot \frac{r_{12} \cdot (X - X_0) + r_{22} \cdot (Y - Y_0) + r_{32} \cdot (Z - Z_0)}{r_{13} \cdot (X - X_0) + r_{23} \cdot (Y - Y_0) + r_{33} \cdot (Z - Z_0)} + dy
 \end{aligned}
 \tag{eq. 1}$$

$$\text{mit } \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_0 \cos \alpha \cos \theta - y_0 \sin \alpha + t \cos \alpha \sin \theta \\ x_0 \sin \alpha \cos \theta + y_0 \cos \alpha - t \sin \alpha \sin \theta \\ -x_0 \sin \theta + t \cos \theta \end{pmatrix}$$

Die Bestimmung der Parameter der äußeren Orientierung ($X_0, Y_0, Z_0, \omega, \varphi, \kappa$) erfolgt wie beim punktbasierten Rückwärtsschnitt in einem iterativen Ausgleichsprozess, bei dem die Residuen der Bildkoordinaten minimiert werden. Zusätzlich muss für jeden Bildpunkt der Geradenparameter t als Unbekannte mitgeschätzt werden.

Bei der Verwendung von zwei Bildpunkten pro Objektgerade, sind mindestens drei bekannte nichtparallele Objektgeraden notwendig, um die Parameter der äußeren Orientierung des Bildes zu bestimmen. Wie auch beim räumlichen Rückwärtsschnitt über korrespondierende Punkte ist es möglich, die innere Orientierung (x_h, y_h, c) sowie die Verzeichnungsparameter simultan zu bestimmen.

Wird nur die radial-symmetrische Verzerrung berücksichtigt, sind mindestens 6 Objektgeraden mit jeweils zwei korrespondierenden Bildpunkten zur Lösung des Gleichungssystems erforderlich. Eine Steigerung der Redundanz und damit der Genauigkeit der Ausgleichung kann durch Erhöhung der Bildpunktanzahl je Objektgerade erreicht werden.

2.1.2 Mathematische Beschreibung der Objektgeraden

Es gibt verschiedene Möglichkeiten Geraden im Raum mathematisch zu beschreiben. Für diese Linienmethode wurde eine 4-Parameter-Beschreibung gewählt, die erstmals von ROBERTS (1988) vorgestellt und von SCHENK (2004) aufgegriffen und variiert wurde. Diese Beschreibung hat den Vorteil, dass sie mathematisch eindeutig und frei von Singularitäten ist, so dass keine Spezialfälle extra behandelt werden müssen. Die zwei Lageparameter (x_0, y_0) sowie die zwei Orientierungsparameter (α, θ) sind geometrisch gut vorstellbar.

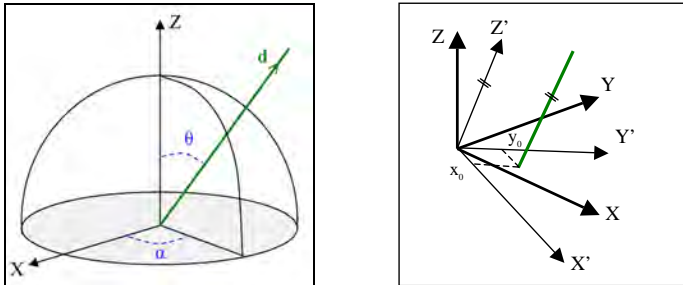


Abb. 2: Parameter der Geradenbeschreibung (nach SCHENK, 2004)

Das Azimut α und der Zenitwinkel θ können aus den sphärischen Koordinaten des Richtungsvektors \mathbf{d} der Geraden abgeleitet werden (s. Abbildung 2 links). Um eine eindeutige Beschreibung der Geraden zu gewährleisten, sind die Wertebereiche der Winkel mit $0 < \alpha < 360^\circ$ und $0 < \theta < 90^\circ$ zu definieren, was einer Beschränkung auf die Halbkugel der positiven Z-Achse entspricht.

Mit Hilfe dieser Winkel erfolgt die Rotation des Koordinatensystems, in der Art, dass die Z-Achse parallel zur Geraden verläuft. Die resultierenden X' - und Y' - Achsen liegen anschließend in der Ebene, die den Ursprung des Koordinatensystems enthält und senkrecht zur Geraden verläuft. Der Durchstoßpunkt der Geraden durch diese Ebene liefert die beiden Lageparameter x_0 und y_0 (s. Abbildung 2 rechts). Er entspricht dem zum Ursprung nächstgelegenen Geradenpunkt \mathbf{p} und muss die Bedingung $\mathbf{p} \cdot \mathbf{d} = 0$ erfüllen.

$$\mathbf{p}' = \begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z \end{pmatrix} = \mathbf{R}_{\alpha\theta} \mathbf{p} \quad \text{eq. 2}$$

Gleichung 2 beschreibt die Transformation eines Geradenpunktes \mathbf{p} in das neue Koordinatensystem. Die Rotation jedes Punktes $\mathbf{p}_i = (X_i, Y_i, Z_i)$ der Geraden führt auf die gleichen Lagekoordinaten x_0 und y_0 , aber zu unterschiedlichen Z-Koordinaten. Der z-Wert hat demzufolge die gleiche Bedeutung wie der Geradenparameter t der Punkt-Richtungsdarstellung einer Geraden. Die Objektkoordinaten eines Geradenpunktes ergeben sich aus der Umkehrung dieser Rotation (s. Objektpunktvektor in Gleichung 1).

2.2 Linienmethode mit Gerade-zu-Gerade Korrespondenz

In diesem Abschnitt wird eine Linienmethode behandelt, die von SCHWERMANN (1995) vorgestellt wurde. Sie beruht auf einer Bildgerade-zu-Objektgerade Korrespondenz, d.h. die Orientierung eines Einzelbildes basiert auf in der Punktwolke definierten Objektgeraden und der Messung der zugehörigen Geraden im Bild. Die Beschreibung der Bildgeraden erfolgt über die Koordinatendarstellung (s. Gleichung 3). Im Unterschied zu SCHWERMANN (1995), der für die Objektgeraden ebenfalls die Koordinatendarstellung verwendet, wird zur Reduzierung von Fallunterscheidungen in diesem Beitrag die Punkt-Richtungsdarstellung eingeführt (s. Gleichung 4). Die dadurch bedingte Überparametrisierung der Objektgeraden bringt für den Rückwärtsschnitt keine Nachteile. Die Verwendung der in Abschnitt 2.1.2 eingeführten Geradenbeschreibung würde diese Überparametrisierung beseitigen.

$$g : y = m \cdot x + n \quad \text{oder} \quad x = m^* \cdot y + n^* \quad \text{eq. 3}$$

$$G : \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_p \\ Y_p \\ Z_p \end{pmatrix} + t \begin{pmatrix} d_x \\ d_y \\ d_z \end{pmatrix} \quad \text{eq. 4}$$

Das Prinzip dieses Ansatzes besteht darin, durch geeignete Umformung der Kollinearitätsgleichungen, Beobachtungsgleichungen für die Parameter der Bildgeraden aufzustellen, die nur von den Parametern der inneren und äußeren Orientierung und von den Parametern der Objektgeraden abhängig sind. Diese Gleichungen sind nachfolgend dargestellt.

$$m = \frac{V_2 W_1 - V_1 W_2}{U_2 W_1 - U_1 W_2}$$

$$n = y_h - x_h \frac{V_2 W_1 - V_1 W_2}{U_2 W_1 - U_1 W_2} + c \frac{U_1 V_2 - U_2 V_1}{U_2 W_1 - U_1 W_2} \quad \text{eq. 5}$$

$$\begin{aligned} U_1 &= r_{11} d_x + r_{21} d_y + r_{31} d_z & U_2 &= r_{11} (X_p - X_0) + r_{21} (Y_p - Y_0) + r_{31} (Z_p - Z_0) \\ \text{mit } V_1 &= r_{12} d_x + r_{22} d_y + r_{32} d_z & V_2 &= r_{12} (X_p - X_0) + r_{22} (Y_p - Y_0) + r_{32} (Z_p - Z_0) \\ W_1 &= r_{13} d_x + r_{23} d_y + r_{33} d_z & W_2 &= r_{13} (X_p - X_0) + r_{23} (Y_p - Y_0) + r_{33} (Z_p - Z_0) \end{aligned}$$

Bezüglich der Bildgeraden ist jedoch eine Fallunterscheidung notwendig (s. Gleichung 3), um zu verhindern, dass der Anstieg m der Geraden unendlich wird (senkrechte Gerade). In diesem Fall sind die inversen Beziehungen aus Gleichung 6 als Beobachtungsgleichungen einzuführen.

$$m^* = \frac{1}{m} \quad \text{und} \quad n^* = -\frac{n}{m} \quad \text{eq. 6}$$

Zur Bestimmung der äußeren Orientierung sind mindestens 3 nichtparallele Geraden erforderlich. Dieses Modell enthält keine Korrekturterme für die Verzeichnung des Objektivs. Um die Verzeichnung trotzdem zu berücksichtigen, könnte diese zuvor z.B. durch eine plumb-line Kalibrierung (LERMA & CABRELLES, 2007) bestimmt werden. Die Messung der Bildgeraden würde dann im entzeichneten Bild stattfinden.

3 Analyse der Methoden

3.1 Interaktion in der CAD-Umgebung

Die beschriebenen punkt- und linienbasierten Verfahren zur Bildorientierung wurden in das Softwaresystem *PointCloud* der kubit GmbH implementiert. Der typische Ablauf der Bildorientierung in *PointCloud* ist in der nachfolgenden Abbildung dargestellt.

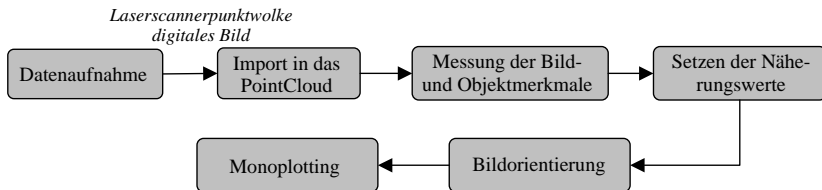


Abb. 3: Ablauf der Bildorientierung mit *PointCloud*

Nach dem Import der terrestrischen Laserscannerpunktwolke und des digitalen Bildes finden die, für die Bildorientierung notwendigen, Interaktionen des Benutzers in der CAD-Umgebung statt. Diese Interaktion beinhaltet das manuelle Messen der Punkt- oder Linienmerkmale im Bild und in der 3D Punktwolke sowie das Setzen der näherungsweise äußeren Orientierung des Bildes. Nach der Referenzierung der Daten wird das orientierte und entzeichnete Bild in *PointCloud* durch ein speziell dafür entwickeltes *AutoCAD-Tool* angezeigt, und der Benutzer hat die Möglichkeit der 3D Auswertung anhand des orientierten Bildes oder direkt in der Punktwolke.

3.2 Datensätze

Die vorgestellten Methoden zur Orientierung eines Bildes wurden an zwei verschiedenen Datensätzen getestet. Der erste Datensatz ist ein räumliches Testfeld mit einer Ausdehnung von ca. 2x3m, bestehend aus insgesamt 27 Geraden (8 horizontal; 10 vertikal; 9 schräg, davon 3 raumdiagonal), die durch jeweils 4 uncodierte Punkte signalisiert wurden. Die Laserscanneraufnahmen beider Datensätze erfolgten mit dem Riegl LMS Z-420i. Für das Testfeld wurde zusätzlich ein Bildverband mit 23 konvergenten Bildern aufgenommen (3 verdrehte Aufnahmen aus der Mitte). Bei der Auswertung des Bildverbandes mit dem *AICON 3D Studio*, über codierte Passpunkte höherer Genauigkeit, wurden die Objektkoordinaten der uncodierten Geradenpunkte mitbestimmt. Die in der Bündelblockausgleichung ermittelten äußeren Orientierungen der Bilder dienen als Referenz für die später durchgeführten Einzelbildorientierungen in *PointCloud*.

Das Nymphenbad (ein Teil des Zwingers in Dresden) ist Gegenstand des zweiten Datensatzes. Die südöstliche Fassade wurde mit einer Auflösung von 0,04° gescannt, woraus sich ein Punkt- abstand je nach Aufnahmeentfernung von 1,4 mm bis 1,3 cm ergibt. Die gesamte Punktwolke umfasst etwa 3 Mio. Punkte. Die Bildaufnahme erfolgte für beide Datensätze mit einer digitalen Spiegelreflexkamera mit einer Auflösung von 3008x2000 Pixeln (6 MegaPixel) und einer Pixelgröße von etwa 7,8 µm. Für das Testfeld wurde ein 28mm und für das Nymphenbad ein 14mm Objektiv verwendet.

3.3 Ergebnisse

3.3.1 Datensatz „Testfeld“

Aufgrund von großen Streuungen der Laserscannerpunkte im Bereich der retroreflektierenden Marken war es nicht möglich, die Objektkoordinaten der signalisierten Geradenpunkte zuverlässig in der Punktwolke zu erfassen. Stattdessen wurden die im Zuge der Bündelblockausgleichung bestimmten Objektkoordinaten für die Auswertung dieses Datensatzes herangezogen. Für drei aus dem Bildverband ausgewählte Bilder wurden die äußeren Orientierungen ermittelt. Hierbei gingen die signalisierten Geradenpunkte zum einen direkt als Passpunkte in den photogrammetrischen Rückwärtsschnitt ein. Die Linienmerkmale wurden jeweils durch die beiden äußeren Geradenpunkte definiert. Die nachfolgende Tabelle zeigt die gemittelten Differenzen zwischen den Einzelbildorientierungen und der Bündelblockausgleichung für jeden geschätzten Parameter.

Tab. 1: Vergleich der Parameter der äußeren Orientierung aus Einzelbildorientierungen und der Bündelblockausgleichung

Vergleich	Mittel der Differenzen der Parameter					
	X ₀ [mm]	Y ₀ [mm]	Z ₀ [mm]	ω [°]	φ [°]	κ [°]
Bündel - RS mit Punkten	1,316	2,442	2,743	0,051	0,009	0,006
Bündel - RS mit Strecken (Modell 1)	4,539	3,290	4,018	0,072	0,084	0,004
Bündel - RS mit Strecken (Modell 2)	2,623	8,527	2,722	0,050	0,051	0,048

Tab. 2: Mittelwerte der Genauigkeiten der geschätzten Parameter

Verfahren	m ₀ [mm]	Mittel der mittlere Fehler der Parameter					
		m _{x0} [mm]	m _{y0} [mm]	m _{z0} [mm]	m _ω [°]	m _φ [°]	m _κ [°]
Bündelblockausgleichung	0,00039	0,0623	0,0962	0,0551	0,002	0,002	0,007
RS mit Punkten	0,00365	0,517	0,264	0,533	0,006	0,006	0,006
RS mit Strecken (Modell 1)	0,00740	2,884	1,038	1,603	0,026	0,030	0,031
RS mit Strecken (Modell 2)	0,01602	7,469	2,848	3,890	0,065	0,081	0,080

In Tabelle 2 sind die mittleren Gewichtseinheitsfehler (m₀) der Ausgleichungen sowie die mittleren Fehler der geschätzten Orientierungsparameter zusammengefasst (gemittelt für alle 3 Bilder). Anhand der erreichten Genauigkeiten lässt sich eine Abstufung der verschiedenen Verfahren zur Einzelbildorientierung erkennen. Wie zu erwarten war, wurden mit dem punktbasierten Rückwärtsschnitt die besten Ergebnisse erzielt (m₀ ≈ ½ Pixel). Dies zeigt sich auch in den mittleren Absolutabweichungen der Orientierungsparameter gegenüber dem Bündel (s. Tabelle 1). Der mittlere Gewichtseinheitsfehler der Punkt-zu-Gerade Methode (Modell 1) war um den Faktor zwei größer als bei der Orientierung mit Punkten (m₀ ≈ 1 Pixel). Der zweite Linienansatz (Modell 2) erreichte nochmals eine geringere Genauigkeit mit einem m₀ von etwa 2 Pixeln. Da die geschätzten Parameter variieren und korreliert sind, ist es schwierig aus ihren mittleren Abweichungen eine Aussage über die Güte / Richtigkeit der Abbildungsmodelle zu treffen. Deshalb

wurden mit Hilfe der für jedes Bild bestimmten Orientierungsparameter 32 Objektpunkte, die nicht in die Einzelbildorientierung eingegangen sind, in den jeweiligen Bildraum projiziert. Die resultierenden Bildpunktkoordinaten wurden mit der automatischen Bildpunktmessung des Bildverbandes im *Aicon 3D Studio* verglichen. Die Standardabweichungen sind in der folgenden Tabelle aufgeführt.

Tab. 3: Standardabweichungen der Bildpunktkoordinaten

Vergleich	s_x [Pixel]	s_y [Pixel]	s_{xy} [Pixel]
Bündel -RS mit Punkten	0,9	0,8	0,9
Bündel - RS mit Strecken (Modell 1)	1,0	1,1	1,1
Bündel - RS mit Strecken (Modell 2)	1,9	1,9	1,9

In diesen Standardabweichungen spiegelt sich die gleiche Abstufung der Verfahren wieder. Die Standardabweichungen liegen für die linienbasierten Verfahren in der Größenordnung der mittleren Gewichtseinheitsfehler der Bildorientierung. Auffällig ist die Standardabweichung, die sich für das Modell aus der punktbasieren Referenzierung ergibt. Diese entspricht etwa der Genauigkeit der Punkt-Gerade Methode.

3.3.2 Datensatz „Nymphenbad“

Dieser Datensatz wurde ausgewählt, um die verschiedenen Methoden zur Bildorientierung unter realen Bedingungen zu testen. Die Orientierung des Einzelbildes erfolgte zum einen über 22 natürliche Punkte (z.B. markante Gebäudeecken, Fensterkreuze), die gleichmäßig über das Bild verteilt und in Bild und Laserscannerpunktwolke gemessen wurden. Die linienbasierte Referenzierung beruht auf 16 nichtparallelen Geraden mit jeweils 2 zugehörigen Bildpunkten, so dass für beide Linienmethoden die gleichen Geraden verwendet werden konnten. Aufgrund der unbekannt inneren Orientierung der Kamera wurde diese einschließlich der radial-symmetrischen Verzeichnung (beschränkt auf A_1 und A_2) mitbestimmt.

Die Differenzen der geschätzten Parameter zwischen den Linienmethoden und der punktbasieren Orientierung sind in Tabelle 4 dargestellt. Es ist zu sehen, dass die Abweichungen für den größten Teil der Parameter bei der Punkt-zu-Gerade Methode geringer sind als beim zweiten Streckenmodell. Der mittlere Gewichtseinheitsfehler lag für die Bildorientierung mit Punkten und für das erste Streckenmodell bei etwa 1 Pixel. Die mittleren Fehler der geschätzten Parameter waren jedoch für den punktbasieren Rückwärtsschnitt im Mittel um das Zweifache besser. Die dennoch geringeren Genauigkeiten des punktbasieren Rückwärtsschnittes bei diesem Datensatz resultieren aus der Messung diskreter Punkte in der Laserscannerpunktwolke.

Tab. 4: Abweichungen der geschätzten Parameter der inneren und äußeren Orientierung (ohne geschätzte Verzeichnungsparameter)

Verfahren	X_0 [m]	Y_0 [m]	Z_0 [m]	ω [°]	ϕ [°]	κ [°]	c [mm]	x_h [mm]	y_h [mm]
Differenz Punkt-Strecke (Modell 1)	-0,024	0,045	-0,001	-0,084	0,197	0,017	-0,030	-0,072	-0,081
Differenz Punkt-Strecke (Modell 2)	0,046	0,081	0,004	0,067	0,706	-0,172	-0,223	-0,133	-0,057

Mit zunehmender Entfernung des Objektes zum Scanner (hier: 2 m - 18 m) verringert sich die Punktdichte und verschlechtert sich die Genauigkeit der gemessenen Objektpunkte. Die Genauigkeit des zweiten Linienmodells sowie die mittleren Fehler der Orientierungsparameter sind um eine Zehnerpotenz schlechter als bei der Verwendung von Passpunkten.

Im Weiteren wurde untersucht, welche Genauigkeiten beim Monoplotting in *PointCloud* mit den ermittelten Bildorientierungen möglich sind. Hierzu wurden 18 Einzelpunktmessungen im Bild durchgeführt, und die aus der Interpolation in der Laserscannerpunktwolke resultierenden 3D Objektkoordinaten wurden anschließend mit manuell in der Punktwolke gemessenen Koordinaten verglichen, da keine anderen Referenzdaten (z.B. Tachymeteraufnahmen) zur Verfügung standen.

Tab. 5: Standardabweichungen der Distanzen zwischen modellierten Objektpunkten und Referenzdaten

Verfahren	RS mit Punkten	RS mit Strecken (Modell 1)	RS mit Strecken (Modell 2)
Standardabweichungen der Punktabstände [m]	0,030	0,030	0,151

Tabelle 5 zeigt, dass mit dem punktbasierten Rückwärtsschnitt und dem ersten Streckenansatz für diesen Datensatz die gleichen Genauigkeiten beim Monoplotting erreichbar sind.



Abb. 4: Orientiertes Bild mit überlagerter Laserscannerpunktwolke (gelb) und modelliertem Fensterbereich (rot)

3.3.3 Fazit

Die Ergebnisse zeigten, dass der Punkt-zu-Gerade Ansatz der zweiten vorgestellten Streckenmethode überlegen ist. Neben den besseren Genauigkeiten hat die erste Linienmethode durch ihre Bildpunkt-zu-Objektgerade Korrespondenz einen wesentlichen praxisrelevanten Vorteil: Geraden müssen im Bild nicht als Geraden abgebildet sein. D.h. der Bildorientierung müssen keine Bestimmung der Verzeichnungs-korrekturen und kein anschließendes Resampling vorausgehen, so dass die Bildmessung im Originalbild stattfinden kann. Werden die Abbildungsfehler des op-

tischen Systems nicht berücksichtigt, sind auf Bildgeraden beruhende Ansätze nur für eine näherungsweise Bildorientierung einsetzbar.

Dagegen zeigt der Linienansatz basierend auf Bildpunkten und Objektgeraden beim Monoplotting mit 3 cm ein Genauigkeitspotential, das dem der punktbasierten Referenzierung entspricht und für viele Anwendungen ausreichend ist.

4 Ausblick

Zukünftige Arbeiten beschäftigen sich mit der automatischen Linien- /Kantendetektion in Bild- sowie Laserscannerdaten. Dabei ist zunächst eine einseitige Automatisierung (entweder nur im Bild oder nur in der Punktwolke) angestrebt, die vom Nutzer durch Zuordnen und Definieren der korrespondierenden Kanten vervollständigt wird. Der nächste Schritt wäre die vollautomatische Bildorientierung anhand von Linien, welche durch geeignete Verfahren der Linienzuordnung in Bild und Punktwolke das interaktive Messen des Bearbeiters umgeht. Zur Detektion grober Fehler in der Punkt- bzw. Linienzuordnung ist ein Ausreißertest vorgesehen. Außerdem soll eine weitere Methode, welche den Koplanaritätsansatz nach TOMMASELLI & TOZZI (1996) verfolgt, implementiert und getestet werden.

5 Literaturverzeichnis

- HABIB, A.; ASMAMAW, A.; KELLEY, D. & MAY, M., 1999: Linear Features in Photogrammetry. Department of Civil and Environment Engineering and Geodetic Science, The Ohio State University. Department Report No. 450.
- HEMKEN, H. & LUHMANN, T., 2002: Mehrbildorientierung mit geometrischen Elementen. Abschlussbericht Forschungsschwerpunkt Raum-Rohr-Boden, Teilprojekt 3, Wissenschaftlicher Bericht der Fachhochschule Oldenburg/Ostfriesland/Wilhelmshaven, Nr. 2.
- HEUVEL, F. 2003: Automation in Architectural Photogrammetry. PhD thesis, Publication on Geodesy 54, NCG, Netherlands Geodetic Commission, Delft
- KUBIK, K., 1991: Relative and absolute orientation based on linear features. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 46 (1991), pp. 199-204.
- LERMA, J. L. & CABRELLES, M., 2007: A review and analyses of plumb-line calibration. *The Photogrammetric Record*, 22 (118) (June 2007), pp. 135-150.
- PATIAS, P.; PETSAS, E. & STREILEIN, A., 1995: Digital Line Photogrammetry. Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, Bericht Nr. 252.
- ROBERTS, K. S., 1988: A New Representation for Lines. *IEEE Proceedings of Computer Vision and Pattern Recognition*, (1988), pp. 635-640.
- SCHENK, T., 2004: From point-based to feature-based aerial triangulation. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 58 (2004), 315-329, 2004.
- SCHWERMANN, R., 1995: Geradengestützte Bildorientierung in der Nahbereichsphotogrammetrie. Dissertation, Veröffentlichung des Geodätischen Instituts der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, Nr. 52.
- TOMMASELLI, A. M. G., & TOZZI, C. L., 1996: A recursive approach to space resection using straight lines. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol. 62, No. 1, January 1996, pp. 57-66.

Erfahrungen bei der messtechnischen Erfassung, Modellierung und Darstellung von kleinförmigen Kunstobjekten

JÜRGEN PEIPE¹, NICOLAS KOZUSCHEK² & HEINZ-JÜRGEN PRZYBILLA²

Zusammenfassung: Eine Vielzahl kunsthistorischer Objekte verfügt über komplex ausgestaltete Oberflächen und sind eher klein dimensioniert. Im vorliegenden Bericht werden Erfahrungen bei der optischen 3D-Erfassung solcher Objekte vorgestellt, Problemfelder werden genannt und es wird über die Eignung der eingesetzten Messsysteme - Streifenprojektionssysteme und Laserscanner - berichtet. Diese Geräte sind grundsätzlich für die 3D-Digitalisierung kleinförmiger Objekte ausgelegt. Allerdings sind Laserscanner meist relativ teuer und daher für viele potentielle Anwender - gerade im Bereich Kunstwissenschaft und -dokumentation etc. - kaum erschwinglich. Mit dem MicroScan Lasersensor, befestigt am MicroScribe Messarm, steht jetzt eine preiswerte Alternative zur Verfügung. Mit Messgenauigkeiten im Bereich von 0.2-0.3 mm bietet das System eine ausreichende Erfassungsqualität für vielfältige Anwendungen. Neben einer einfachen Bedienung ist insbesondere die rasche Erfassungsgeschwindigkeit ein nicht zu unterschätzender Vorteil. Am Beispiel der 3D-Digitalisierung des Kissens Karls des Kühnen werden erste Erfahrungen mit dem Lasersensor dokumentiert. Der Vergleich mit einer parallel ausgeführten Objektmessung mit einem Streifenprojektionssystem zeigt die grundsätzliche Qualität beider Messsysteme.

1 Einleitung

Im Rahmen der 27. Wissenschaftlich-Technischen Jahrestagung der DGPF im Jahre 2007 wurde in einem Vortrag über die *3D-Dokumentation des Essener Domschatzes* berichtet (BANGE et al. 2007a). Der Stand des Projekts wurde aufgezeigt, d. h. die eingesetzten Messsysteme (Streifenprojektionssysteme) wurden vorgestellt sowie Kalibrieraspekte und Genauigkeitsmaße genannt. Abschließend wurden modellierte Kunstobjekte als Ergebnis der 3D-Digitalisierung gezeigt. Inzwischen ist ein weiteres Messsystem für dieses Aufgabengebiet hinzugekommen, das speziell zur Erfassung kleinvolumiger Kunstgegenstände geeignet ist. Es handelt sich um einen preiswerten und flexibel einsetzbaren Laserscanner, bestehend aus einem MicroScribe Messarm und einem MicroScan Lasersensor (RSI 2008; Abb. 1). Ein Genauigkeitstest des Gerätesystems wurde durchgeführt und erste Ergebnisse wurden publiziert (PRZYBILLA et al. 2008).

Im Folgenden sollen die für die Dokumentation von Kunstwerken eingesetzten Geräte an Hand ihrer technischen Spezifikationen einander gegenübergestellt werden (Kap. 2). Anschließend werden die bei der Messung auftretenden Problemfelder beschrieben und es wird auf eigene Erfahrungen hingewiesen, inklusive eines Vergleichs der Messsysteme (Kap. 3 und 4).

¹⁾ Jürgen Peipe, Universität der Bundeswehr München, Institut für Photogrammetrie und Kartographie, e-mail: j.k.peipe@unibw-muenchen.de

²⁾ Nicolas Kozushek & Heinz-Jürgen Przybilla, Hochschule Bochum, Fachbereich Vermessung und Geoinformatik, e-mail: heinz-juergen.przybilla@fh-bochum.de

2 Messsysteme und Software

Als Messwerkzeuge zur Digitalisierung von Kunstobjekten wurden zunächst zwei Streifenprojektionssysteme eingesetzt: ein Breuckmann *optoTOP HE-600*, das durch ein *triTOS* System mittlerer Genauigkeit abgelöst wurde (BREUCKMANN 2008; PEIPE & PRZYBILLA 2005; BANGE et al. 2007a). Das *triTOS* enthält die auf einer Basis montierten Systemkomponenten, bestehend aus Kamera (1.3 MPixel) und Streifenlichtprojektor, wobei unterschiedliche Basislängen und Objektive für unterschiedliche Arbeitsbereiche zur Verfügung stehen. Bei flächenhafter Objekterfassung wird eine Genauigkeit von ca. 0.1 - 0.2 mm erreicht. Hinweise zur Kalibrierung und Handhabung des Messsystems finden sich auch in BANGE et al. (2007b).

Der Laserscanner MicroScan wird in Verbindung mit dem Messarm MicroScribe eingesetzt (RSI 2008; Abb. 1). Der Lasersensor registriert 28000 3D-Punkte pro Sekunde, während er über die zu erfassende Oberfläche geführt wird. Innerhalb eines Arbeitsbereichs von ca. 1.5 m (Durchmesser) wird eine Messgenauigkeit von ca. 0.2 - 0.3 mm erzielt (PRZYBILLA et al. 2008). Der Messarm behält auch in Verbindung mit dem Lasersensor seine taktilen Fähigkeiten, d. h. die 3D-Bestimmung von Einzelpunkten, Konturen etc. ist parallel zur flächenhaften Antastung mit dem Scanner möglich.



Abb. 1: Laserscanner G2LX, bestehend aus Messarm MicroScribe und Lasersensor MicroScan

Die Software des Systems leistet u. a. die nutzerseitige Kalibrierung, die Anpassung der Empfindlichkeit der im Laserscanner eingebauten Kamera an die Beschaffenheit der Objektoberfläche (Reflexionseigenschaften), die Steuerung des Messablaufs, die Verknüpfung von Punktwolken aus unterschiedlichen Scans desselben Objekts und den Datenexport (Punktwolken bzw. diverse Polygonformate). Insgesamt gesehen bildet die Kombination MicroScribe + MicroScan ein preiswertes, relativ kleines und leichtes, daher gut transportierbares und flexibel einsetzbares Messsystem, das zudem einfach zu handhaben ist.

Die der Generierung der Punktwolken folgenden Editier- und Modellierarbeiten wurden innerhalb der Geomagic Studio / Qualify Software durchgeführt (GEOMAGIC 2008).

3 Objekte, Messablauf, Problemfelder

Typische Messobjekte aus dem Essener Domschatz sind Becher und Kelche, Schwerter und Leuchter, Skulpturen und Statuen, Buchdeckel und Kästchen, etc. – all dies sind relativ kleinvolumige Objekte. Sie bestehen aus den unterschiedlichsten Materialien wie Gold, Messing, Kupfer, Holz, Elfenbein u. a., sind mit Edelsteinen und Perlen besetzt und weisen oftmals komplexe Oberflächen auf. Von solchen (und anderen) objektspezifischen Gegebenheiten lassen sich Problemfelder ableiten, wie zum Beispiel:

- Reflexionsverhalten des Objekts: Materialabhängig kann es zu starken Reflexionen kommen. Aber auch transparente Oberflächen (Edelsteine etc.) werden nicht korrekt erfasst. Es ist zu untersuchen, wie das Messsystem auf solche, nicht-kooperative Oberflächen reagiert. Reflexionen kann man unter Umständen umgehen, wenn man den Sensor umpositioniert und weitere Scans aus anderen Richtungen erzeugt, mit anschließender Verknüpfung der Punktwolken.
- Kontrastschwelle: Ein gerätespezifisch definierter Mindestkontrast am Objekt sollte dafür sorgen, dass nur sinnvolle Punkte gemessen werden. Wenn die Punkterfassung – z. B. an Kanten – unsicher wird, sollte der Sensor die Messung einstellen. In diesem Fall kann es hilfreich sein, das Messsystem umzupositionieren und unter günstigeren Bedingungen eine weitere Messung zu starten.
- Krümmung des Objekts, d. h. wie groß ist die Neigung der Oberfläche des Objekts im Verhältnis zur Blickrichtung des Sensors. Eine bestimmte Grenzneigung darf nicht überschritten werden, um korrekte Messpunkte zu erhalten.
- Verdeckungen, Abschattungen, Hinterschneidungen: Messsystem umpositionieren und weitere Aufnahmen machen.
- Punktdichte: Weitgehend von der Form und Struktur des Objekts abhängig. Limitierung der Punktzahl, wenn die Kapazität der Software für die Weiterverarbeitung der Rohdaten nicht ausreicht (Krümmungsbasierte Datenreduktion sinnvoll).
- Messablauf: Betrieb/Handhabbarkeit eines Messsystems, z. B. auch Aufwärmzeit, Kalibrierung, Dauer der Datenerfassung pro Einzelaufnahme, Zeitbedarf für die Aufstellung am Messplatz bzw. für das Umpositionieren.
- Umgebungsbedingungen: Stabile Temperaturverhältnisse sollten vorliegen, keine Vibrationen, kein Staub, möglichst geringer Fremdlichteinfluss während der Messungen, etc.
- Datenverarbeitung: Rechengeschwindigkeit bei großen Punktmengen, Algorithmen zur Vereinigung verschiedener Punktwolken desselben Objekts, Überführung der originalen Messdaten in Polygondarstellungen, Texturierung und Visualisierung des Objektmodells.

4 Testmessungen und Bewertung der Messsysteme

Wie in BANGE et al. (2007a) angedeutet, ist die 3D-Digitalisierung der in ihrer Oberflächencharakteristik stark variierenden Kunstgegenstände ein komplexes und aufwendiges Vorhaben. Eine besondere Schwierigkeit stellt der "Materialmix" der Objekte dar. Glänzende Gold- oder Silber-

flächen einerseits, Edelsteine und Emailleflächen andererseits erschweren die optische Objekterfassung. Hinzu kommen oftmals filigrane Strukturelemente der Kunstwerke. Räumliche Hinterschneidungen und Verdeckungen sind insbesondere bei figürlichen Darstellungen häufig anzutreffen. Bei Behältnissen (Dosen, Kelche, Urnen etc.) sind als Folge schmaler Grenzflächen die Punktwolken der äußeren und inneren Teile nur mit hohem Aufwand zu verknüpfen. Ähnliche Probleme treten bei lang gestreckten Objekten (z. B. Lanzen, Schwerter, Bischofsstäbe) auf. Zu berücksichtigen ist zudem, dass das Anbringen von Signalisierungen oder die Bearbeitung der Oberflächen mit Sprays zur Verbesserung des Reflexionsverhaltens grundsätzlich nicht möglich sind.

Streifenprojektionssysteme lassen sich vorteilhaft einsetzen, wenn das zu messende Objekt möglichst vollständig im – systembedingt begrenzten – Messvolumen aufgenommen werden kann. Die Positionierung des Messgegenstands auf einem Drehteller vereinfacht die Erfassung erheblich: Bei ortsfestem Sensor kann das Objekt durch Rotation des Tellers allseitig erfasst werden. Zu beachten ist eine hinreichend große Überdeckung benachbarter Scans, da als Folge von Objektkrümmung und Reflexion die abgebildeten Punktwolken oft zu schmalen „Punktstreifen“ degenerieren (Abb. 2). Ihre räumliche Verknüpfung – über ICP-Algorithmen – führt in einem solchen Fall nicht unbedingt zur Konvergenz, da die Struktur der Objekte zu wenig ausgeprägt ist (glatte Flächen) und die verfügbare Anzahl identischer Punkte zu gering ist.

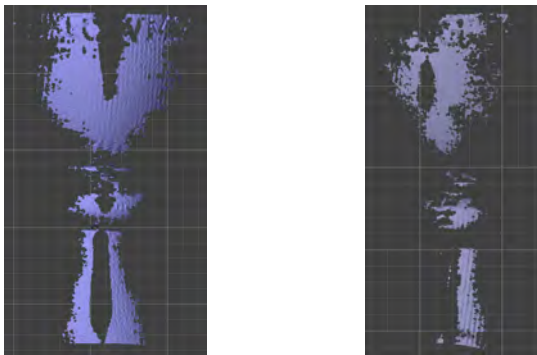


Abb. 2: Einzelscan eines Kelchs mit normalen (li.)
und geringem Punktvolumen, als Folge veränderter Aufnahmerichtung (re.)

Das Streifenprojektionssystem wird in der Regel zum Messobjekt transportiert und dort aufgebaut. Dabei können die vom Hersteller vorgesehene Kalibrierung und notwendige Aufwärmphasen der Sensorik durchaus einen zeitlichen Umfang von einer Stunde in Anspruch nehmen. Das Umgebungslicht ist bei einem Messverfahren mit aktiver Beleuchtung (strukturiertes Licht) nicht ohne Einfluss, d. h. sowohl zu helle als auch zu dunkle Messräume behindern die Funktion des Systems. Im Extremfall ist eine Messung unmöglich.

Die vor Beginn der Messung festzulegende Konfiguration des Streifenprojektionssystems (Länge der Basis, Objektivbrennweiten) definiert das nutzbare Messvolumen sowie den Abstand vom Sensor zum Objekt. Dies schränkt die Flexibilität der Aufnahmeconfiguration ein, wobei die relativ geringe Tiefe des Messbereichs ein weiteres limitierendes Element dargestellt. So kann es sein, dass eine Gesamtmessung aus vielen, zum Teil nur sehr wenig Information enthaltenden Scans besteht. Dabei sind – selbst bei kleineren Gegenständen – oft 50-100 Scans notwendig, um eine objektdeckende Abbildung zu erhalten. Daraus resultiert ein nicht zu unterschätzender Aufwand für die Verknüpfungsberechnungen, der – in Abhängigkeit von der Qualität der Punktwolken – ein Mehrfaches der Erfassungsdauer beansprucht. Stehen Kunstobjekte nur begrenzte Zeit zur Verfügung, bietet es sich an, die Orientierung der Teil-Punktwolken im Post-Processing durchzuführen.

Die Kombination aus Messarm und Triangulationsscanner, wie sie im System MicroScribe + MicroScan realisiert ist, hat sich als ausgesprochen flexibles Messwerkzeug erwiesen. Die freie räumliche Positionierung, die durch den Messarm (in einem Radius von ca. 80 cm) gewährleistet ist, ermöglicht ein zügiges Messen, mit deutlichen Geschwindigkeitsvorteilen gegenüber dem Streifenprojektionssystem. Bei dem in Abb. 3 und 4 (li.) dargestellten Kissen Karls des Kühnen lag die Aufnahmedauer mit dem MicroScribe + MicroScan bei ca. 1.5 Stunden, während eine vergleichbare Messung mit dem triTOS-System (einschließlich Verknüpfung) um den Faktor 3 länger beanspruchte. Dabei wurde der MicroScan-Sensor in einem Abstand von ca. 50 mm über das Messobjekt geführt. Ohne Positionswechsel des Messarms konnte nicht nur die Oberseite des Kissens erfasst werden, auch die Kissenseiten (bis zum Rand des innen hohlen Objektes) ließen sich problemlos messen.

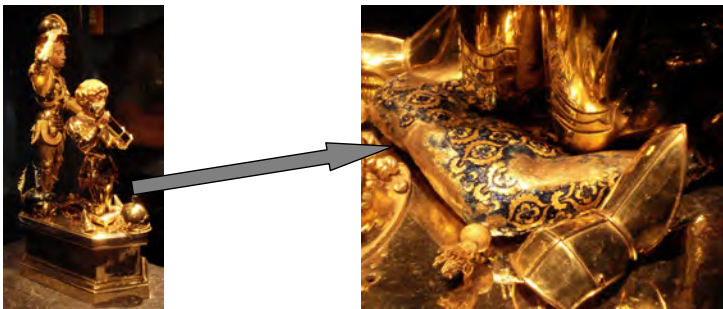


Abb. 3: Reliquiar Karls des Kühnen – rechts das Kissen

Da der Sensor linienhaft erfasst, sollte das Messobjekt aus mehreren – zumindest zwei senkrechten – Richtungen abgetastet werden. Dies gewährleistet eine homogene Punktdichte, vergleichbar mit der des rasterförmig messenden Streifenprojektors (Abb. 4 re.). Besonders vorteilhaft arbeitet das System, wenn das Messobjekt aus kleineren Flächenelementen besteht und der Sensor, dem Krümmungsverlauf folgend, in gleichmäßigem Abstand über die Oberfläche geführt werden kann. Die Freihandführung des Scanners erfordert jedoch eine gewisse Übung, insbesondere auch, um eine möglichst senkrechte Abtastung zu erreichen. Die Handhabung eines Streifenprojektionssystems ist im Vergleich dazu weniger problematisch. Sie bietet zudem bei großen – quasi in einer Aufnahme erfassbaren – Oberflächen Vorteile.

Nach den bisherigen Erfahrungen reagiert der Laserscanner deutlich weniger kritisch auf die bei kunsthistorischen Objekten häufig anzutreffenden Materialeigenschaften. Während z. B. die Emaille-Oberfläche des Kissens durch den Streifenprojektor nur unvollständig erfasst werden konnte (Abb. 6), enthielt der Datensatz aus der Messung mit dem MicroScan nur wenige, kleinere Datenlöcher, die im Rahmen der weiteren Bearbeitung mit der Geomagic Software problemlos geschlossen werden konnten (Abb. 5).

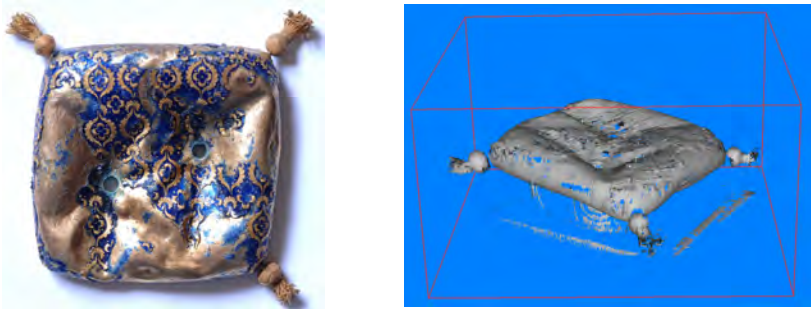


Abb. 4: Foto des Kissens nach Entnahme aus dem Reliquiar (li.) – MicroScan Rohdaten (re.)

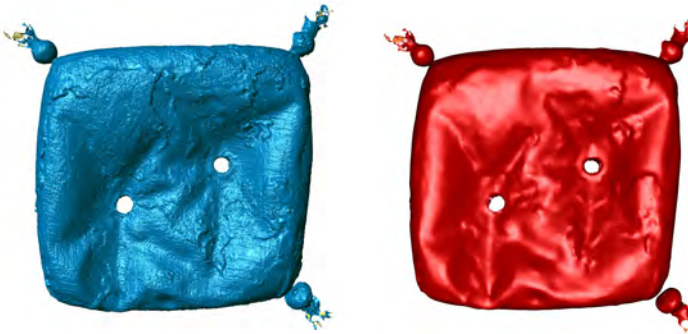


Abb. 5: Bearbeitetes Polygonmodell (li.) – geglättetes Modell als Basis für Replikat (re.)

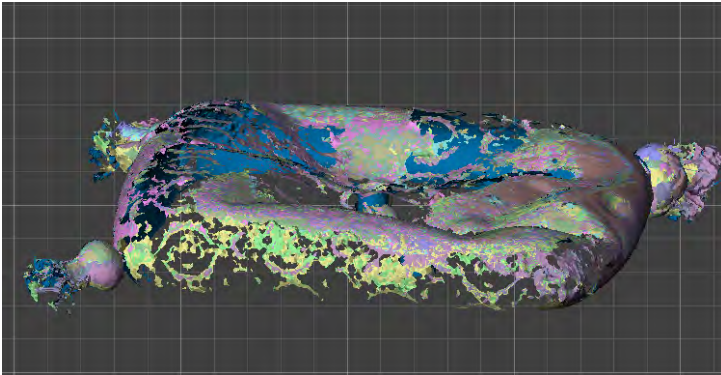


Abb. 6: triTOS-Punktwolke – schwarze Bereiche im Objekt beschreiben Datenlücken

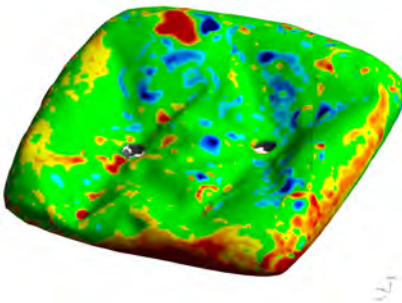


Abb. 7: Abweichungen der Oberflächen

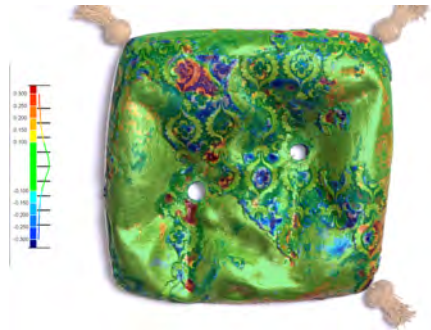


Abb. 8: wie Abb. 7, jedoch mit gemappter Textur

Ein Vergleich der aus den parallel durchgeführten Messungen mit Streifenprojektionssystem und MicroScribe + MicroScan abgeleiteten 3D-Modelle (Abb. 7 und 8) zeigt in weiten Bereichen eine sehr gute Übereinstimmung der triangulierten Oberflächen. Lediglich in Randbereichen, die vom Streifenprojektor nur unvollständig erfasst werden konnten, sowie an einigen emaillierten Stellen auf der Kissenoberseite, liegen die Abweichungen oberhalb 0.3 mm. Beide Systeme dokumentieren somit ihre grundsätzliche Eignung für derartige Aufgabenstellungen.

5 Schlussbemerkungen

Der Einsatz eines Streifenprojektionssystems und des MicroScribe + MicroScan Laserscanners bestätigte deren grundsätzliche Eignung für die Digitalisierung und virtuelle Rekonstruktion von kleinvolumigen Kunstobjekten. Beide Geräte weisen eine ähnliche Messgenauigkeit auf, aber auch eine Reihe von Unterschieden in der Handhabung und bei der Objekterfassung selbst. Es liegt nahe, bei kommenden Untersuchungen eine gemeinsame, sich ergänzende Anwendung der beiden Messsysteme zu testen. Vorstellbar ist eine "Übersichtsaufnahme" mit dem Streifenprojektionssystem, während die detaillierte Feinarbeit – auch an kritischen Stellen (Kanten, Abschattungen, schwierige Materialien etc.) – mit dem Laserscanner erfolgen könnte.

6 Literaturverzeichnis

- BANGE, L., PEIPE, J. & PRZYBILLA, H.-J., 2007a: 3D-Dokumentation des Essener Domschatzes. Publ. DGPF, Bd. 16 (Hrsg.: E. Seyfert), Muttentz/Schweiz, S. 433-440.
- BANGE, L., PEIPE, J. & PRZYBILLA, H.-J., 2007b: Genauigkeitsmaße eines Streifenprojektionssystems zur 3D-Objekterfassung. In: Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik - Oldenburger 3D-Tage 2007 (Hrsg. T. Luhmann & Ch. Müller), Wichmann, Heidelberg, S. 116-122.
- BREUCKMANN, 2008: Produktinformation optoTop & triTOS. www.breuckmann.com (27.02.08)
- GEOMAGIC, 2008: Produktinformation Geomagic. www.geomagic.com (27.02.08)
- PEIPE, J., PRZYBILLA, H.-J., 2005: Modeling the Golden Madonna. In: Proceedings CIPA 2005 XX Int. Symposium, Turin, Italy, ISSN 1682-1777, S. 934-936.
- PRZYBILLA, H.-J., PEIPE, J. & KOZUSCHEK, N., 2008: Zur Genauigkeitsprüfung eines preiswerten, kleinvolumigen Laserscanners. In: Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik - Oldenburger 3D-Tage 2008, Wichmann, Heidelberg (im Druck)
- RSI, 2008: Produktinformation MicroScribe und MicroScan. www.rsi-gmbh.de (27.02.08)

Virtuelle 3D-Stadtmodelle im kommunalen Einsatz Entwicklungen, Trends und Perspektiven

LUTZ ROSS¹ & BIRGIT KLEINSCHMIT¹

Zusammenfassung: Der Beitrag diskutiert an Hand von Beispielen aus der Praxis und der Forschung gegenwärtige Entwicklungen beim Aufbau und Einsatz von virtuellen 3D-Stadtmodellen für kommunale Anwendungen und leitet daraus aktuelle Trends und Perspektiven ab. Als wesentliche technische Entwicklungen werden die zunehmende Etablierung von CityGML (City Geography Markup Language) als Datenschema für die Modellierung von 3D-Stadtmodellen und erste Beispiele für dienstbasierte Integrationslösungen identifiziert. Im Hinblick auf die Inhalte von 3D-Stadtmodellen wird festgestellt, dass in den meisten Praxisanwendungen bisher auf die Modellierung der Flächeninfrastruktur und der Vegetation verzichtet wird. Aufkommende Anwendungen aus dem Bereich der Planung, etwa Planinformationssysteme und Systeme für die Unterstützung von Beteiligungsprozessen oder für die kollaborative Nutzung von 3D-Stadtmodellen durch verschiedene Nutzer über das Internet fordern aber die Integration eben dieser Inhalte. Für die aktive Nutzung von virtuellen 3D-Stadtmodellen in Planungsprozessen sind zukünftig innovative Systeme und Fachfunktionen zu entwickeln.

1 Einleitung

Virtuelle 3D-Stadtmodelle werden zunehmend von Städten, Regionen und auf Ebene der Bundesländer entwickelt und bereitgestellt, um sie als 3D-Rauminformationssysteme für unterschiedlichste Anwendungen zu nutzen. Einige Beispiele sind das Berliner 3D-Stadtmodell (www.3d-stadtmodell-berlin.de), das Dresdener 3D-Stadtmodell (www.dresden.de/3d), die Kooperation 3D-Ruhrgebiet (www.ruhr3.de) oder das in der Machbarkeitsstudie zur Umsetzung der EU-Umgebungslärmrichtlinie in Nordrhein-Westfalen (PLÜMER et al., 2006) verwendete Modell des Landesvermessungsamtes NRW. Der Aufbau weiterer und die Nutzung bestehender 3D-Stadtmodellen in vielen Kommunen und Städten sowie die Herausgabe und Entwicklung von Leitfäden für den Aufbau (STÄDTETAG NRW, 2004) und die Fortführung (STÄDTETAG NRW, 2007, Zwischenbericht) von Stadtmodellen durch den Städtetag Nordrhein-Westfalen belegen die zunehmende Akzeptanz und Etablierung von virtuellen 3D-Stadtmodellen in Deutschland.

Grundlage für die zunehmende Etablierung der Technologie ist die Verfügbarkeit von Daten, Methoden und Softwaresystemen, die für die effiziente Erstellung, Administration und Präsentation von virtuellen 3D-Stadtmodellen geeignet sind. Hier hat es in den letzten Jahren erhebliche Fortschritte gegeben, die die effiziente Erstellung größerer und zunehmend detaillierter Modelle erlauben. Aktuelle Praxis- und Forschungsbeispiele zeigen die vielfältigen Einsatzbereiche von 3D-Stadtmodellen in der kommunalen Praxis. Dieser Beitrag versucht, an Hand ausgewählter Beispiele aktuelle Entwicklungen und Trends zu identifizieren, um daraus zukünftige Potentiale und nötige Forschungs- und Entwicklungsarbeiten abzuleiten.

¹ Technische Universität Berlin, Institut für Landschaftsarchitektur und Umweltplanung, Fachgebiet Geoinformationsverarbeitung, Straße des 17. Juni 145, 10623 Berlin; E-Mail lutz.ross@tu-berlin.de & birgit.kleinschmit@tu-berlin.de

Zur Differenzierung unterschiedlicher Detailgrade von Stadtmodellen wird dabei auf die Definition von Detailgraden (Level of Detail - LOD) nach KOLBE et al. (2005) zurückgegriffen, nach der eine zunehmende geometrische und semantische Differenzierung von LOD-1 (Blockmodelle) nach LOD-4 (Innenraummodelle) vorliegt.

2 Einsatz virtueller 3D-Stadtmodelle in Städten und Kommunen

An Hand von kommunalen Praxisbeispielen und Forschungsanwendungen sollen aktuelle Trends und Entwicklungen sowie zukünftige Potentiale für die Nutzung von virtuellen 3D-Stadtmodellen im kommunalen Einsatz identifiziert werden. Es wird dabei im Rahmen des Beitrages auf exemplarische Anwendungen eingegangen, die nach Ansicht der Autoren typische Entwicklungen, Probleme und Anwendungen darstellen. Eine abschließende Übersicht über die Einsatzgebiete und Anforderungen von 3D-Stadtmodellen in der kommunalen Praxis kann der Beitrag nicht liefern. Hierzu gibt der STÄDTETAG NRW (2004) eine umfassende Übersicht.

2.1 Stadtmarketing

Die Selbstpräsentation einer Stadt über ein 3D-Stadtmodell bietet die Möglichkeit, einen Stadtraum virtuell erlebbar zu machen und immer mehr Städte (u. a. Hamburg, Berlin, Dresden) nutzen die prominente Oberfläche von Google Earth, um dort ihr 3D-Stadtmodell zu präsentieren. Ein Beispiel hierfür ist das Berliner 3D-Stadtmodell. Das Berliner 3D-Stadtmodell wurde im Rahmen einer Pilotstudie entwickelt mit dem Ziel, bestehende Stadtmodelle der Stadtplanung und der Wirtschaftsförderung zusammenzuführen. Das Modell liegt in einer CityGML-konformen Datenbank auf Basis von Oracle 10g vor (vgl. Dokumentation zur 3D-Geodatenbank Berlin, IKG, o. D.). Es umfasst neben einem Geländemodell und hochauflösenden Orthophotos etwa 200.000 Gebäude der Innenstadt, die im LOD-1 bis LOD-2 vorliegen sowie einige detailliert ausmodellerte Landmarken. In der ersten Version war das Modell zunächst untexturiert, später erfolgte eine Texturierung mit rund 800 typischen Fassadentexturen und aktuell wird an der Erfassung individueller Fassadentexturen aus georeferenzierten Schrägluftbildern gearbeitet. Das Modell wird bei der Investorenberatung im Business Location Center der Stadt Berlin genutzt und war weltweit das erste Modell, dass in größerer Flächenausdehnung in Google Earth betrachtet werden konnte. Dazu wurde ein Konverter entwickelt, der die Stadtmodellgeometrien und Darstellung in das Austauschformat KML (Keyhole Markup Language) umsetzt. Für die Popkomm, einer Veranstaltung der Musik- und Entertainmentbranche, wurde eine Version mit integrierten Veranstaltungsstandorten erstellt, die in die Google Earth Variante integriert wurde. Im Google Earth Modell sind zudem Informationen zu freien Gewerbeimmobilien abrufbar (vgl. Abbildung 1). Intern wird das Modell auf Basis von LandXplorer Technologie der 3D Geo GmbH genutzt, wodurch vielfältige Interaktionen möglich sind. So können ÖPNV-Verbindungen oder der ehemalige Mauerverlauf eingeblendet, Daten aus dem Stadtplanungsmodell (Architekt, Baujahr) abgerufen und Planungsvarianten eingeblendet werden. Zudem ist eine Integration von 2D-Geodaten aus dem Berliner Geodatenbestand möglich. Diese werden bei Bedarf als Geländetexturen in das Modell integriert.

Das Beispiel Berlin zeigt exemplarisch die Möglichkeiten zur Integration und Präsentation von heterogenen raumbezogenen Informationen auf Basis virtueller 3D-Stadtmodelle. Die

Anforderungen an die Darstellung des 3D-Stadtmodells sind hierbei eine repräsentable Darstellung der Gebäude, die es Nutzern erlaubt, die reale Welt im Modell wieder zu finden und sich zu orientieren. Aus diesem Grund wird das Modell aktuell um individuelle Fassadentexturen ergänzt. Von zentraler Bedeutung ist auch die Erweiterbarkeit des Modells, die zum einen darüber gewährleistet wird, dass das Datenbankschema auf CityGML beruht. Dies ermöglicht die Integration von Varianten und unterschiedlich detaillierten Repräsentationen eines Objektes (in LOD-1 bis LOD-4) sowie die Erweiterung des Modells über Application Domain Extensions (ADE). Eine weitere richtungweisende Entwicklung ist sicherlich die Möglichkeit, das bestehenden 3D-Stadtmodell in KML konvertieren zu können, wodurch mit Google Earth eine populäre und öffentlichkeitswirksame Plattform zur Präsentation genutzt werden kann.



Abbildung 1: 3D-Stadtmodell von Berlin in Google Earth mit Informationen zu Firmen der Musikindustrie (links) und Informationen zu freien Gewerbeimmobilien in Berlin (rechts).

Eine wesentliche Einschränkung betrifft sowohl das intern genutzte Stadtmodell als auch die Google Earth Variante. Beide lassen sich gut und intuitiv steuern, so lange das Modell aus der Luft betrachtet wird. Die Navigation in Innenräumen und am Boden ist dagegen umständlich. Hier fehlen in beiden Präsentationssystemen, Google Earth und LandXplorer, entsprechende physikalische Einschränkungen, die das Durchdringen von Geometrien verhindern. Zudem wirkt selbst ein hoch auflösendes Luftbild aus der Nähe pixelig und flach. Fehlendes 3D-Straßenrauminventar und fehlende 3D-Vegetationsmodelle beeinträchtigen den Gesamteindruck in der Fußgängerperspektive.

Schlussfolgerungen:

- 3D-Stadtmodelle können bereits heute produktiv im Stadtmarketing eingesetzt werden.
- Durch die Nutzung von Google Earth steht ein leistungsfähiger Viewer bereit, der auf Millionen PC-Systemen bereits installiert ist.
- Aufgrund ihrer Repräsentationsfunktion werden im Stadtmarketing texturierte Gebäudemodelle im LOD-2 bis LOD-4 bevorzugt.
- Erweiterbarkeit und Mehrfachnutzungen sind Voraussetzung für eine nachhaltige Nutzung und erzeugen Mehrwert.
- Flächeninfrastruktur und Vegetation werden derzeit nicht bzw. selten abgebildet, sind aber auch für Anwendungen des Stadtmarketings nicht zwingend notwendig.

2.2 Stadtplanungs- und Umweltinformationssystem

Ein weiteres potentiell Einsatzgebiet ist die Nutzung von virtuellen 3D-Stadtmodellen als Informationsportal für Pläne und Umweltinformationen innerhalb einer Kommune. Rechtsgültige Pläne und Informationen zu laufende Planverfahren werden bereits seit einiger Zeit über das Internet bereitgestellt. Zunehmend bieten Städte und Kommunen den Onlinezugriff auf Umweltdaten über Webmapping-Anwendungen an, die den Zugriff auf klassische 2D-Geodatendokumente über einen Webbrowser ermöglichen. Das im Rahmen des BMBF-Förderschwerpunkts REFINA (www.refina-info.de) geförderte Projekt „Flächeninformationssysteme auf Basis virtueller 3D-Stadtmodelle“ erarbeitet Konzepte, Methoden und Prototypen für eine Nutzung von virtuellen 3D-Stadtmodellen als Medium zur Präsentation und Exploration von Umweltinformationen und Plänen (vgl. www.refina3d.de). Das Projekt wird gemeinsam von der Technischen Universität Berlin, dem Hasso-Plattner-Institut an der Universität Potsdam und der 3D Geo GmbH durchgeführt. Dazu wurden bisher bestehende Pläne und Umweltinformationen als Geländetexturen in ein 3D-Stadtmodell der Potsdamer Innenstadt integriert. In einem zweiten Schritt wurden ein exemplarischer Bebauungsplan und ein Strukturkonzept in 3D-Repräsentationen transformiert, um eine visuelle Exploration der Planungen innerhalb ihres räumlichen Umfeldes zu ermöglichen (Abbildung 2).

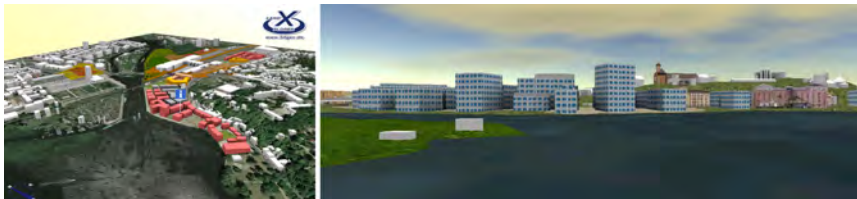


Abbildung 2: Ausschnitte aus dem prototypischen 3D-Planinformationssystem Potsdams Mitte.

Aus den bisher erfolgten Arbeiten ergeben sich bereits eine Reihe von Schlussfolgerungen und Fragen. Die Integration sowohl von Plänen als auch von 3D-Raumnutzungskonzepten in das virtuelle 3D-Stadtmodell wurde von Vertretern der Stadt, der Wirtschaftsförderung und der kommunalen Liegenschaftsgesellschaft allgemein als hilfreich und gut interpretierbar empfunden, die Realisierung von 3D-Planrepräsentationen ist aber noch sehr aufwändig. Hier müssten Methoden entwickelt werden, die eine ad hoc Integration ermöglichen. Beispielsweise könnte durch eine standardisierte Spezifikation von Planinhalten und Attributen sichergestellt werden, dass Pläne direkt integriert und die Bestandsobjekte innerhalb des Gültigkeitsbereichs automatisiert ausgeblendet werden können. Einen Ansatz bietet hier das objektorientierte Datenaustauschformat XPlanGML (BENNER & KRAUSE, 2007), mit dem sich die rechtlich geregelten Inhalte von Bebauungsplänen in einem standardisierten Format beschreiben lassen. Durch die Entwicklung von Transformationsvorschriften könnten die Planinhalte automatisch in ein 3D-Stadtmodell integriert werden.

Kritisch wird auch die Darstellung der geplanten Baukörper im Gegensatz zu den vorhandenen Gebäuden gesehen. Eine sehr einfache Darstellung als Blockmodelle wird akzeptiert, wenn die Gebäude im Umfeld ähnlich einfach gehalten sind. Sind diese aber detailliert ausmodelliert und texturiert, erscheinen die geplanten Gebäude im Kontrast zu grob und dominant. Hier werden

Visualisierungssysteme benötigt, die eine schnelle Konfiguration der Darstellung von Stadtmodellobjekten erlauben und dabei unterschiedliche Optionen, wie beispielsweise „Verwerfe alle Texturen“ oder „Generiere eine abstrakte Entwurfszeichnung“, bieten. Dafür wird im Vorhaben ein Plangebäude eingeführt, dessen semantische und geometrische Beschreibung sich an CityGML orientiert. Dies Plangebäude wird unter anderem Angaben zur Anzahl der Geschosse und zur Gebäudehöhe enthalten, die genutzt werden können, um abstrakte Gebäudedarstellungen mit skizzierten Geschosswechsellinien und Fenstern zu generieren (vgl. Abbildung 2, rechts). Hinsichtlich der Integration von Umweltinformationen in das Stadtmodell gibt es vergleichbare Reaktionen. So wird die beispielhafte Integration des Altlastenkatasters, von Schutzgebieten und der Biotopbewertung zwar als hilfreich angesehen, jedoch ist der Aufwand bei einer verteilten Datenhaltung in den Kommunen sehr hoch, weil die Daten von unterschiedlichen Behörden beschafft und eingespielt werden müssen. Abhilfe könnte hier eine dienstbasierte Integration wie sie beispielhaft auf der Basis der Geovisualisierungsplattform LandXplorer Studio im OGC OWS-4 Testbed (DÖLLNER & HAGEDORN, 2007) erfolgt ist. Eine dienstbasierte Integration auf Basis standardisierter Schnittstellen (bspw. OGC WebFeature Services und WebCoverage Services) bietet drei wesentliche Vorteile: Automatisierung der Integration, Aktualität der Daten und Verbleib der Originaldaten bei der zuständigen Behörde. Voraussetzung ist, dass in den Kommunen entsprechende Geodateninfrastrukturen und Dienste existieren.

Kritisch wird die Aktualität und Genauigkeit des virtuellen 3D-Stadtmodells gesehen. Das genutzte 3D-Stadtmodell wurde auf Basis der Automatisierten Liegenschaftskarte (ALK) und einer automatisierten photogrammetrischen Auswertung von Luftbildern erstellt. Dabei wurde festgestellt, dass die ALK nicht alle existierenden Gebäude enthält, bzw. teilweise bereits abgerissene Gebäude noch aufführt, so dass das Modell Inkonsistenzen aufweist. Für eine laufende und kontinuierliche Nutzung müsste daher ein Weg gefunden werden, der eine möglichst hohe Aktualität gewährleistet. Darüber hinaus besteht von Seiten der Nutzer der Wunsch, Planungen aus der Fußgängerperspektive betrachten zu können. Dabei gelten aber, wie im Berliner 3D-Stadtmodell, Einschränkungen, da die Flächeninfrastruktur bisher meist durch ein texturiertes Geländemodell wiedergegeben wird, wodurch eine realistische Darstellung nicht gewährleistet ist. Die gleichen Restriktionen treffen auch auf die Integration der Vegetation zu. Gerade im Bereich der Potsdamer Innenstadt gibt es viele historische Sichtachsen, deren potentielle Beeinträchtigung durch Neubauten sich mit einem 3D-Modell überprüfen ließen. Zwei davon liegen auf einer Anhöhe, die einen hohen Deckungsgrad an Bäumen und Strüchern aufweist. Eine realistische visuelle Überprüfung der Sichtachsen würde deshalb zwingend die Integration von realistischen Vegetationsdarstellungen in das 3D-Stadtmodell erfordern. Dazu werden im Projekt flächige und punktuelle Vegetationsvorkommen auf der Basis von CityGML definiert, die durch intelligente Visualisierungsalgorithmen in realistische 3D-Repräsentationen umgesetzt werden. Ein Beispiel für die Integration realistischen Vegetationsdarstellungen in CityGML Datensätzen mit der Geovisualisierungssoftware LandXplorer zeigt die Abbildung 3.

Schlussfolgerungen:

- Inkonsistente und falsche Darstellungen sind nicht tragbar und müssen durch effektive Qualitätssicherung und Aktualisierungsstrategien ausgeschlossen werden.

- Pläne, 3D-Planrepräsentationen und Umweltinformationen lassen sich grundsätzlich mit den verfügbaren Technologien realisieren.
- Dienstebasierte Integrationslösungen und die Automatisierung von Transformationen von Plänen in 3D-Darstellung versprechen wesentliche Vorteile.
- Standardisierte, semantische Objektmodelle wie CityGML können genutzt werden, um intelligente Visualisierungsverfahren zu entwickeln.
- Die bisher fehlende Ausmodellierung und Repräsentation von Vegetation und der Flächeninfrastruktur wird als Hemmnis für den Einsatz von 3D-Stadtmodellen für die Kommunikation von Planungen gesehen.



Abbildung 3: Integration realistischer Vegetationsdarstellungen in CityGML Datensätzen mit der Geovisualisierungssoftware LandXplorer (Quelle: Lutz Ross, TU Berlin)

2.3 Planungsunterstützungssysteme

Gegenüber Plan- und Umweltinformationssystemen auf Basis virtueller 3D-Stadtmodelle, die nur zur Präsentation von Daten und Informationen genutzt werden sollen, erfordern interaktive und kooperative Planungsunterstützungssysteme erweiterte Funktionen. Das europäische Projekt „Virtual Environmental Planning“ (VEPs, vgl. www.veps3d.org) entwickelt und erprobt Konzepte für den Einsatz von 3D-Stadtmodellen in Beteiligungsverfahren und Planungsprozessen. Die bisher erreichten Ergebnisse zeigen eine Reihe von prototypischen Anwendungen auf Basis virtueller 3D-Stadtmodelle, die über Webbrowser zugänglich sind. Dazu zählen ein 3D-Kommentierungstool mit dem Pläne bzw. Plankomponenten kommentiert werden können, ein Beteiligungstool zur Exploration und Kommentierung unterschiedlicher Planvarianten, ein

3D-Masterplaner, der es erlaubt vordefinierte und eigene Gebäude in 3D-Stadtmodelle einzufügen sowie Überflutungsmodelle und Lärmkarten, die auf Basis von 3D-Stadtmodellen präsentiert werden.

Eine effektive und interaktive e-Participation erfordert nach Ansicht von COUNSELL et al. (2006) einerseits Werkzeuge zur Kommentierung und zum Ein- und Ausblenden von Planvarianten, andererseits aber auch Werkzeuge, die es ermöglichen, ad hoc und online neue Varianten zu erstellen und in das System einzustellen. Damit eine wirkliche Kommunikation über die Varianten und Entwürfe und ein gemeinsamer Abstimmungsprozess möglich wird, muss zudem noch die Möglichkeit gegeben werden, dass Teilnehmer sich gegenseitig ihre Sichten nahe bringen können. Dazu wurde innerhalb des Projektes ein erster Entwurf für eine comment / dialog markup language entwickelt. Diese soll es Nutzern erlauben, ihre Wahrnehmung eines Entwurfs in einer erzählenden Abfolge von Blickperspektiven und erläuternden Texten für andere Nutzer festzuhalten. WANG et al. (2007) stellen fest, dass auf Basis einheitlicher Datenmodelle und standardisierter Schnittstellen zukünftig auf der Basis virtueller 3D-Modelle viele Arbeitsschritte und Konsultationen in Planungsprozessen zwischen Kommune und Wirtschaft sowie Kommune und Bürger über Onlinesysteme möglich wären. Er spricht in diesem Zusammenhang von „E-Planning“. Voraussetzung ist, dass Daten über Gebäude, die Flächeninfrastruktur und Vegetation auf Basis eines einheitlichen Datenmodells in einem Modell integriert sind. Die aktuell im VEPs Projekt als geeignet identifizierten Datenmodelle umfassen CityGML, Industry Foundation Classes (IFC), OGC Web Services und offene 3D-Formate wie VRML und X3D.

Schlussfolgerungen:

- Planungsunterstützungssysteme auf Basis virtueller 3D-Stadtmodelle bieten ein großes Potential, um Geschäftsprozesse und Konsultationen im Bereich Bauen und Planen online abzuwickeln.
- Voraussetzung für marktfähige Lösungen sind die Nutzung standardisierter Datenmodelle und Schnittstellen.
- Für einige Prozesse und Aufgaben wurden prototypische Fachfunktionen innerhalb von VEPs entwickelt und getestet, die bisher aber weder abschließend alle Aufgaben abdecken noch Marktreife erlangt haben.

2.4 Simulationen und Berechnungen

Virtuelle 3D-Stadtmodelle können auch für Simulationen und Berechnungen eingesetzt werden. Beispielsweise wurden im Projekt Sun-Area (www.al.fh-osnabrueck.de/15416.html) der Fachhochschule Osnabrück auf der Basis von Laserscannerdaten detaillierte Dachgeometrien generiert. Auf der Basis der Form, Neigung, Exposition und Verschattung der identifizierten Dachflächen können optimale Standorte für Photovoltaikanlagen bestimmt werden. Im Projekt „Flächeninformationssysteme auf Basis virtueller 3D-Stadtmodelle“ (s.o.) wurde der Wunsch einer entsprechenden Fachfunktion von Seiten der Kommune an die Projektpartner herangetragen, was darauf hindeutet, dass im Kontext der aktuellen Debatten für eine nachhaltige und sichere Energieversorgung ein größeres Interesse seitens der Kommunen an entsprechenden Funktionalitäten besteht.

Ein weiteres Beispiel wäre die Berechnung der Sichtbarkeit von Objekten in Stadtmodellen. Sichtbarkeitsanalysen könnten beispielsweise genutzt werden, um algorithmisch zu ermitteln von wo ein Objekt gesehen werden kann oder auch welche Objekte von einem definierten Standort aus gesehen werden können. Dadurch lassen sich Sichtachsen, nicht nur wie in Abschnitt 2.2 diskutiert, visuell überprüfen sondern auch algorithmisch analysieren.

Für die Erarbeitung von Lärmkarten, die Abschätzung der Beeinträchtigung von Kaltluftabflussbahnen durch geplante Bauwerke oder für die Analyse der Auswirkungen von geplanten Gebäuden auf lokale Windverhältnisse werden 3D-Modelle als Eingangsdaten benötigt. In der Machbarkeitsstudie zur Umsetzung der EU-Umgebungslärmrichtlinie stellen PLÜMER et al. (2006) fest, dass für Lärmausbreitungsberechnungen bisher in der Regel für jedes Projekt die benötigten 3D-Geometrien aus unterschiedlichen Datenbeständen zunächst erzeugt werden mussten, um diese dann für die eigentliche Berechnung nutzen zu können. Dabei erweist sich die Datenbeschaffung, -konvertierung und -modellierung als arbeitsaufwendiger Prozess, der einen Großteil der Ressourcen verbraucht. Nach Berechnungen der Studie könnten erhebliche Einsparungen erzielt werden, wenn die benötigten 3D-Daten sowie die benötigten Straßendaten und Verkehrsdaten für solche Berechnungen zentral vorgehalten und über standardisierte Dienste abgerufen werden könnten, so wie es in der Studie exemplarisch umgesetzt wurde. Eine Übertragung des auf Diensten basierenden Konzeptes auf Windfeldberechnungen, Verschattungsberechnungen oder Eignungsberechnungen für Photovoltaik würden in diesem Fall zu einem Mehrwert bestehender 3D-Stadtmodelle beitragen.

Schlussfolgerungen:

- 3D-Stadtmodelle können als einheitliche 3D-Datenbasis für unterschiedliche Analysen genutzt werden, die bisher auf eigene Datenerhebungen bzw. umfangreiche Konvertierungs- und Modellierungsarbeiten angewiesen waren.
- Mehrfachverwertungen und dienstbasierte Lösungen können helfen, Kosten deutlich zu reduzieren.

3 Zusammenfassung und Diskussion

Die aktuelle Entwicklung zeigt, dass virtuelle 3D-Stadtmodelle inzwischen über rein experimentelle Anwendungen hinausgehen. Insbesondere für Aufgaben des Stadtmarketings wie die Investorenberatung, Tourismusförderung oder für Großveranstaltungen werden 3D-Stadtmodelle in einigen Kommunen bereits erfolgreich eingesetzt. Die Entwicklung geht dabei zu flächendeckenden, texturierten Gebäudedarstellungen im LOD-2 bis LOD-4, die mit einer hohen Übereinstimmung die reale Welt abbilden. Die Flächeninfrastruktur, also die Ausgestaltung der Verkehrs-, Grün- und Freiflächen wird allerdings bisher selten abgebildet und ist für viele Aufgaben des Stadtmarketings nicht notwendig. Anders dagegen sieht es bei Anwendungen aus, die der Vermittlung von Planungen dienen oder gar 3D-Stadtmodelle als Medium für interaktive Planungsprozesse nutzen. Für solche Anwendungen ist die Integration von detaillierten Flächeninfrastruktur- und Vegetationsmodellen eine häufig geforderte Voraussetzung. Insbesondere für die Präsentationen von Plänen aus einer menschlichen Perspektive oder für eine Überprüfung von Sichtbeziehungen müssen diese Elemente mit abgebildet werden. Zudem wird

eine hohe Aktualität der Modelle verlangt, da das Fehlen von bestehenden Bauwerken oder das Vorhandensein von abgebauten Bauwerken die Glaubwürdigkeit der Modelle mindert. Hier gilt es zukünftig verstärkt Methoden zur Modellierung und Integration der Flächeninfrastruktur und der Vegetation zu entwickeln sowie Prozesse zu definieren, die eine hohe Übereinstimmung des Modells mit der Realität gewährleisten.

Eine weitere ungelöste Frage für den Einsatz in Planungsprozessen und als Planinformationssystem betrifft die Darstellung von geplanten Objekten und ihre Integration in das bestehende Modell. Die Darstellung geplanter Gebäude in einem detaillierten Stadtmodell durch LOD-1 Modelle kann einerseits wichtige Planungsinformationen wie etwa die Zahl der Geschosse nicht abbilden und wirkt andererseits durch die grobe Struktur und Einfarbigkeit dominant und störend. Hier sind zukünftig Wahrnehmungs- und Akzeptanzstudien nötig, um gezielt intelligente Integrations- und Visualisierungsverfahren entwickeln zu können.

Aus technischer Sicht sind insbesondere zwei Entwicklungen bemerkenswert. Zum einen die zunehmende Akzeptanz und Verbreitung von CityGML als Datenbankschema und Austauschstandard und zum anderen die zunehmende Nutzung von Diensten für die Bereitstellung von Geoinformationen. Mit CityGML steht ein Datenschema zur Verfügung, das derzeit beim Open Geospatial Consortium (OGC) intensiv als Standard diskutiert wird. Der wesentliche Vorteil von CityGML gegenüber anderen 3D-Formaten ist, dass nicht nur die geometrisch-graphischen Eigenschaften sondern auch eine kohärente Semantik abgebildet werden kann. Dies eröffnet einerseits Möglichkeiten, intelligente Visualisierungsverfahren und Integrationslösungen zu entwickeln und andererseits bietet ein akzeptierter Standard Entwicklungssicherheit. Dienstbasierte Lösungen als zweite technische Neuerung erlauben die Integration von 3D-Inhalten und 2D-Inhalten auf Abruf. Dadurch kann sichergestellt werden, dass immer die aktuellsten Daten direkt vom Datenanbieter eingebunden werden, während die Originaldaten beim Anbieter verbleiben. Dadurch kann der Aufwand für die Datenbeschaffung und -Konvertierung deutlich gesenkt werden, wie die Studie zur Umsetzung der EU-Umgebungsärmrichtlinie zeigt.

Eine Etablierung eines einheitlichen Datenmodells und standardisierter Schnittstellen sind darüber hinaus wichtige Bausteine für eine kostendeckende und nachhaltige Nutzung von virtuellen 3D-Stadtmodellen, weil der Zugriff auf die Modelle und der Austausch von Daten wesentlich erleichtert wird und 3D-Stadtmodelle für unterschiedliche Anwendungen herangezogen werden können. Dies gilt insbesondere für Anwendungen, die auf 3D-Daten angewiesen sind und für die bisher regelmäßig teure Datenerhebungen und Datentransformationen nötig waren.

Innerhalb des Forschungsvorhabens „Flächeninformationssysteme auf Basis virtueller 3D-Stadtmodelle“ werden wir uns zukünftig auf Methoden zur Integration von Plänen und 3D-Planrepräsentationen konzentrieren sowie exemplarische Lösungen für eine Integration einer 3D-Flächeninfrastruktur und realistischen Vegetationsdarstellungen konzentrieren. Die mittelfristige Perspektive ist unserer Meinung nach die annähernde Abbildung aller fest installierten Objekte eines Stadtraumes in einem Modell. Die Realisierung und Implementierung wird dabei auf Basis von CityGML erfolgen.

Quellenverzeichnis

- BENNER, J. & KRAUSE, K.-U., 2007: Das GDI-DE Modellprojekt XPlanung – Erste Erfahrungen mit der Umsetzung des XPlanGML-Standards. In: Schrenk, M., Popovich, V. & Benedikt, J. (Eds.): REAL CORP 2007: To plan is not enough - Proc. of the 12 th international conference on urban planning and spatial development in the information society. May 20th to 23th 2007
- COUNSELL, J.; SMITH, S. & BATES-BRKLJAC, N: (2006): Web 3D based dialogue for public participation and the VEPs Project. Tenth International Conference on Information Visualisation (IV'06), pp. 343-348.
- DÖLLNER, J. & HAGEDORN, B., 2007: Integration von GIS-, CAD- und BIM-Daten mit dienstebasierten virtuellen 3D-Stadtmodellen. In: GIS - Zeitschrift für Geoinformatik, Nummer 11, S. 28-37 - November 2007.
- INSTITUT FÜR KARTOGRAPHIE UND GEOINFORMATION DER UNIVERSITÄT BONN (IKG), o.D.: 3D-Geodatenbank Berlin – Dokumentation V1.0. Online unter: http://www.3d-stadtmodell-berlin.de/imperia/md/content/3d/dokumentation_3d_geo_db_berlin.pdf. Zuletzt abgerufen: 13.03.2008
- KOLBE, T. H.; GRÖGER, G. & PLÜMER, L., 2005: CityGML – Interoperable Access to 3D City Models. In: Oosterom, Zlatanova, Fendel (Hrsg.): Proceedings of the Int. Symposium on Geo-information for Disaster Management, Delft. Springer Verlag
- PLÜMER, L.; CZERWINSKI, A. & KOLBE, T. H., 2006: Machbarkeitsstudie Umsetzung der EU-Umgebungslärmrichtlinie in Nordrhein-Westfalen. Online unter: <http://www.umwelt.nrw.de/umwelt/pdf/machbarkeitsstudie.pdf>. Zuletzt abgerufen: 13.03.2008
- STÄDTETAG NRW, 2004: Orientierungshilfe 3D-Stadtmodelle. Online unter: <http://www.umwelt.nrw.de/umwelt/pdf/machbarkeitsstudie.pdf>. Zuletzt abgerufen: 13.03.2008
- STÄDTETAG NRW, 2007: Fortführung von 3D-Stadtmodellen – Ein Zwischenbericht. Online unter: http://www.citygml.org/fileadmin/citygml/docs/Fortfuehrung_3DStM_Zwischenbericht.pdf. Zuletzt abgerufen: 13.03.2008
- WANG, H.; SONGA, Y.; HAMILTONA, A. & CURWELLA, S. (2007): Urban information integration for advanced e-Planning in Europe. Government Information Quarterly, Volume 24, Issue 4, October 2007, pp. 736-754.

Aktuelle Entwicklungen der Kartographieausbildung an der TU Dresden

MANFRED BUCHROITHNER, WOLF GÜNTHER KOCH & CHRISTINE RÜLKE¹

Zusammenfassung: Ziel des neu konzipierten Bachelor-Studienganges ist es, die Studierenden auf eine berufliche Tätigkeit in forschungs- oder anwendungsbezogenen Berufsfeldern oder auf eine weitergehende berufliche Qualifizierung (z.B. in Master-Studiengängen) vorzubereiten. Zu diesem Zweck ist das Studium darauf ausgerichtet, den Studierenden vertiefte Kenntnisse der Allgemeinen und der Angewandten Kartographie unter besonderer Berücksichtigung von Geomedientechnik und Geoinformationssystemen einschließlich der mathematisch-naturwissenschaftlichen und geowissenschaftlichen Grundlagen zu vermitteln. Die Aneignung fachspezifischer Methoden sowie allgemeiner berufsbezogener Qualifikationen ergänzt und erweitert diese Zielstellung.

1 Planungsstand der Ausbildung an der TU Dresden

Die Studiendokumente (Diplomprüfungsordnung und Studienordnung) für den Diplom-Studiengang „Kartographie“ wurden im Jahr 2000 letztmalig geändert und aktualisiert. Im Zuge des Bologna-Prozesses soll der Diplomstudiengang „Kartographie“ ab Wintersemester 2008/09 durch einen modular aufgebauten Bachelor-Studiengang „Kartographie und Geomedientechnik“ abgelöst werden. Die erweiterte Bezeichnung des Studienganges betont die sowohl georäumlich determinierte als auch medientechnische Ausrichtung (Profilierung). Das bewährte Dresdner Modell des universitären Kartographie-Studiums wird somit zukunftsbezogen weiterentwickelt.

2 Ziele, Inhalt und Aufbau des Bachelor-Studiums

Dieses Modell bildet als Vollstudium eine Alternative zu anderen kartographischen Ausbildungsmodellen im Rahmen der universitären Bachelor-Studiengänge „Geodäsie und Geoinformation“ und „Geographie“ im deutschsprachigen Raum und dürfte in Zukunft noch stärker auf den nicht-deutschsprachigen Raum ausstrahlen.

2.1 Ziele der Ausbildung

Die Absolventen des Bachelor-Studienganges werden befähigt, anwendungs- und forschungsbezogene Probleme der kartographischen Modellierung und Visualisierung funktionsbezogen im Kontext von Natur und Gesellschaft sowie in deren Überschneidungsbereich eigenständig oder im Team zu lösen.

Sie verfügen über theoretisches und methodisches Wissen und umfassende Fähigkeiten in Bezug auf die kartographische Informationsverarbeitung, über Prinzipien, Abläufe, medientechnische Verfahren und Technologien der mono- und multimedialen Visualisierung von Geodaten und deren Auswertung über unterschiedliche Medien des Digital- und Printbereiches.

1) TU Dresden, Institut für Kartographie, 01062 Dresden; E-Mail: Steffi.Sharma@tu-dresden.de

Weiterhin erwerben sie soziale und kommunikative Schlüsselkompetenzen, die sie in die Lage versetzen, effizient zu studieren sowie den Übergang in die Praxis oder zu weiterführenden Studien mit Erfolg zu absolvieren. Sie werden zudem befähigt, fachliche Informationen, Probleme, Ideen und Lösungen sowohl an Experten zu vermitteln als auch für die Öffentlichkeit darzustellen.

Das in den modularen Aufbau des Studiums integrierte Praktikum verfolgt das Ziel, einen Einblick in die Konzeptions- und Produktionspraxis oder in die Forschungstätigkeit mit ihren spezifischen Besonderheiten und Aufgabenstellungen zu gewinnen, Erfahrungen im Projektmanagement zu sammeln und Kontakte zu erfahrenen Praktikern und Wissenschaftlern, auch des Auslands, aufzubauen.

2.2 Aufbau des Studienganges

Das 6-semestrige Studium ist modular aufgebaut. Die Modulprüfungen sind Studien begleitend zu erbringen.

Die Module lassen sich den Bereichen

„Mathematisch-naturwissenschaftliche Grundlagenfächer“ (12 %, 1. und 2. Semester),

„Kernfächer Kartographie und Geomedientechnik“, ohne GIS-Module, (58 %, mit dem Ziel zunehmender Kompetenzentwicklung vom 1. bis 6. Semester),

„Ergänzungsfächer Geowissenschaften“ (20 % Nachbarfächer, 1. bis 5. Semester) sowie

„Allgemeine Qualifikation“ (10 %, 4. und 5. Semester und weitere integrierte Anteile)

zuordnen.

Das Studium umfasst 20 Pflichtmodule und 7 Wahlpflichtmodule, wobei aus drei Modulpaaren jeweils ein Wahlpflichtmodul auszuwählen ist. Bezüglich des Praktikums ist das Themen- bzw. Einsatzgebiet frei wählbar.

Auf den Pflichtbereich des Studienganges einschließlich Bachelor-Arbeit entfallen 166 Leistungspunkte, auf den Wahlpflichtbereich einschließlich Praktikum 14. Insgesamt sind somit 180 Leistungspunkte zu erwerben.

2.3 Zu erwerbende Kompetenzen

Im Verlauf des Studiums werden Kompetenzen auf drei Stufen erworben:

Stufe 1:

- grundlegende Kenntnisse im mathematisch-naturwissenschaftlichen Bereich (einschließlich Programmierung),
- Gesamtüberblick über das zu studierende Fach, seine theoretischen und methodischen Ansätze und wichtigsten Werkzeuge der interaktiven Kartenherstellung,
- Wissen und Grundfähigkeiten in wichtigen Nachbardisziplinen des Geo-Bereichs.

Stufe 2:

Auf den Kompetenzen der 1. Stufe aufbauend:

- Fähigkeiten, diese Kenntnisse mit Wissen aus der Allgemeinen Kartographie, der Photogrammetrie und Fernerkundung und Geoinformatik zu verbinden,

- Auf die Geodaten- und Kartenproduktion bezogenes Überblickswissen in Betriebswirtschaftslehre und Privatrecht/Bürgerliches Recht,
- Kommunikative Grundkompetenz in einer wählbaren Fremdsprache.

Stufe 3:

(gekennzeichnet durch...):

- kommunikations-, modell- und zeichentheoretisch durchdrungene Integration der Kenntnisse und Fähigkeiten auf dem Gebiet der Allgemeinen Kartographie mit besonderer Berücksichtigung der Geomedientechnik in die Praxisbereiche der Angewandten Kartographie,
- exemplarisch vertieft und erweitert durch ein Praktikum, wahlweise in Praxis- oder Forschungseinrichtungen des Auslandes,
- projektbezogen angewandt und belegt in der Bachelor-Arbeit mit sich anschließendem Kolloquium.

Schlüsselqualifikationen erwerben die Studierenden in den Modulen „Grundkurs Fremdsprache“, „Betriebswirtschaftslehre/Recht“, während des Praktikums und im kartographischen Hauptseminar (Teil des Moduls „Theoretische Kartographie/Kartenredaktion“). Wissenschaftliche Arbeitsmethoden, Projektmanagement und Präsentationstechniken werden auch in anderen Modulen vermittelt.

3 Masterstudium

Eine forschungsbezogene Struktur von Modulen einschließlich der zugehörigen Stoffgebiete aus Kartographie, Geoinformatik, wissenschaftlicher Visualisierung und freien Wahlfächern für einen sich anschließenden Master liegt vor und ist weiter zu diskutieren, zu präzisieren sowie in Studiendokumenten umfassend zu formulieren. Es ist beabsichtigt, ab Wintersemester 2011/12 ein viersemestriges Masterstudium anzubieten. Entsprechend den Beschlüssen der Universitätsgruppe „TU 9“ sollte der Regelabschluss des konsekutiven Kartographiestudiums der Master sein.

4 Literaturverzeichnis

- TU 9 GERMAN INSTITUTES OF TECHNOLOGY 2006: Grundsätze der universitären Ingenieurausbildung im zweizyklischen Studiensystem. <http://www.tu9.de>
- KOCH, W.G., 2007: Das universitäre Dresdner Studium der Kartographie - Entwicklung, Stand und Perspektiven. Vortragsmanuskript (unveröff.), Festkolloquium am 09.11.2007 an der TU Dresden.

Verification of intact road networks in satellite imagery for crises applications

MATTHIAS BUTENUTH¹ & STEFAN HINZ²

Abstract: The verification of intact infrastructure is an important issue for the management of civil crises, e.g. caused by floodings or earthquakes. The bundle project DeSecure will build up a framework to provide all relevant information regarding the extent and impact of crises scenarios within shortest time-frames. Thus, a special emphasis is on the exploitation of multi-sensorial optical and SAR satellite images as the current and, in particular, the future availability of these sensors allows to acquiring such images nearly everywhere and at any time. In this paper, the development of a system for the automated detection of intact roads from multi-sensorial imagery is presented to supply information being required for the coordination of rescue teams and the implementation of emergency actions.

1 Introduction

A significant increase of natural disasters such as floodings has been observed over the past decades (cf. Fig. 1). While it is not absolutely clear, whether the number of disasters has really grown or only appears so because of the advances in world-wide communication and global observation methods, there is no doubt that the disasters' impact on the population has dramatically increased due to the growth of population and material assets. The regrettable death of people is accompanied by heavy economic damage, which leads to a long-term backslide of the regions hit by the disaster. This situation calls for the development of integral strategies for preparedness and prevention of hazards, fast reaction in case of disasters, as well as damage documentation, planning and rebuilding of infrastructure after disasters.

It is widely accepted in the scientific community that Remote Sensing can contribute significantly to all these components in different ways, especially because of the large coverage of remotely sensed imagery and its global availability. The bundle project DeSecure will build up a framework to provide all relevant information regarding the extent and impact of crises scenarios within shortest time-frames. Time, however, is the overall dominating factor once a disaster has hit a particular region. This becomes manifest in several aspects: firstly, available satellites have to be selected and commanded immediately. Secondly, the acquired raw data has to be processed with specific signal processing algorithms to generate images suitable for interpretation, particularly for Synthetic Aperture Radar (SAR) images. Thirdly, the interpretation of multi-sensorial images, extraction of geometrically precise and semantically correct information as well as the production of (digital) maps need to be conducted in shortest time-frames to support crises management groups.

¹ Matthias Butenuth, Technische Universität München, Lehrstuhl für Methodik der Fernerkundung, Arcisstr. 21, D-80333 München, Email: matthias.butenuth@bv.tum.de

² Stefan Hinz, Technische Universität München, Lehrstuhl für Methodik der Fernerkundung, Arcisstr. 21, D-80333 München, Email: stefan.hinz@bv.tum.de

While the first two aspects are strongly related to the optimization of communication processes and hardware capabilities (at least to a large extent), the main methodological bottleneck is posed by the third aspect: the fast, integrated, and geometrically and semantically correct interpretation of multi-sensorial images. The main goal is the development of methods for automatic understanding and interpretation of airborne and space borne optical and radar images to support the fast reaction after disasters. Special focus is on the extraction, analysis and characterization of infrastructural objects like roads due to their importance for the immediate planning and implementation of emergency actions. Different types of models – physical, stochastic and semantic models – will therefore be used in an integrated approach.



Fig. 1: IKONOS image from the Elbe flooding in Germany in 2002

2 State of the art

The extraction of roads from remotely sensed image data has been of considerable interest in recent years, mainly driven by the rapid progress of 2D and 3D geographic information systems as well as navigation systems and their increasing importance in daily life. The advances can be seen in the relevant computer vision literature, for instance in the compendia and overview papers of (GRÜN et al. 1997, MAYER 1999, BALTSAVIAS et al. 2001, GAMBA et al. 2003, GERKE et al. 2004) and many others.

Despite of numerous technological advances the process of semantic data acquisition still needs lot of manual interaction of a human operator to yield results relevant for practical applications, which is of course both time-consuming and expensive. While this is true for optical images, the situation is even harder for Synthetic Aperture Radar (SAR). SAR is an active and coherent imaging technique which leads to the well-known speckle noise and image derogations due to radar shadow and layover. Thus, the imaged objects are subject to drastic changes in their appearance depending on the radar illumination parameters. Deterministic and stochastic modeling of this varying object appearance is far from being solved today. The scientific challenges of man-made object extraction, in particular roads and buildings, from SAR data can be viewed, for instance, in (BAUMGARTNER et al. 1999, WIEDEMANN & HINZ 1999, WESSEL & HINZ 2004, SÖRCEL et al. 2006, HEDMAN et al. 2006).

However, besides the drawbacks due to the specific viewing geometry and coherent imaging, SAR holds also some prominent advantages over optical images, which are in particular helpful in crisis situations. For instance, SAR is an active system, which can operate during day and night. It is also nearly weather-independent and, moreover, during bad weather conditions SAR is the only operational system available today.

Hence, under the light of today's and tomorrow's available optical and SAR satellite systems, the development of integrated approaches for object extraction from multi-sensorial images are an attractive alternative to support fast and accurate information extraction. To this end, models and extraction strategies need to be developed that integrate the different geometric and radiometric sensor characteristics attached with stochastic models to accommodate for the inherent modeling and measurement uncertainties.

3 Model and strategy

The extraction of topographic objects from images usually relies on a *semantic model*, which represents an abstraction of the corresponding real-world object classes (e.g. "road network" or "buildings"). Such model must be developed for intact and damaged object classes, an example is given in Fig 2.

Since humans tend to organize objects and object classes hierarchically using different levels of abstraction, it is reasonable to map this hierarchical structure to the model. Semantic models allow representing the knowledge about the objects in a very transparent fashion. The model comprises explicit knowledge about geometry (e.g. road characteristics), radiometry (reflectance properties), topology (mutual relations, network structure) and context (relations with other objects). The model to develop should consist of two components: The first component describes

characteristic properties of man-made objects in the real world and in the used data. The second component defines different local contexts, i.e. relations between neighboring objects and assigns them to global context areas (e.g. open landscape, settlement) (BUTENUTH et al. 2003). Furthermore, prior knowledge from a GIS-database can be incorporated in the model to provide information about existing objects (BUTENUTH et al. 2007). For example, the knowledge about a road can narrow the search space within the up-to-date imagery to ease the interpretation. In addition to the common appearance of objects, also potential damages must be modeled. Since it seems hardly possible to model the variety of damages deterministically, the semantic model can be extended by a stochastic model, including potential damages as hypothetical prior information, which are tested against the evidence from the data.

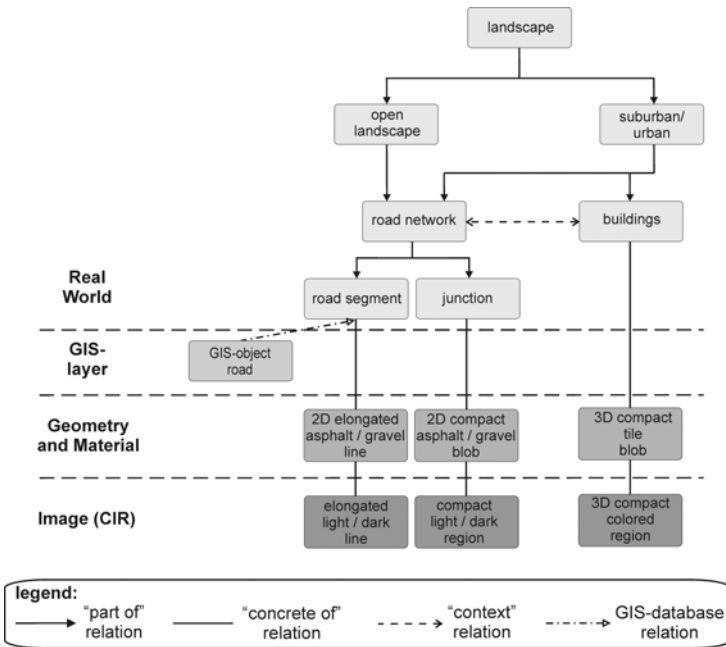


Fig. 2: Semantic model

In a very general sense, the extraction *strategy* comprises knowledge about how and when certain parts of the object and context model are optimally exploited. Although the models incorporate 3D information to a considerable extent, the aim is to extract the objects in 2D first, before exploiting the third dimension. In doing so, many 3D feature matching procedures and 3D geometrical/topological analyses can be avoided during the extraction process, which become

computationally and methodically cumbersome for higher scene complexities. In contrast, the extraction strategy will process the objects in 2D first, until larger objects with (nearly) unambiguous semantics are extracted in each image separately. Thereafter, the extracted objects or object parts are passed to a multi-source fusion module, which exploits the 3D information. Contrary to single-source image, a fusion of multi-aspect optical and/or SAR data on pixel-level makes hardly any sense, because the sensor characteristics are far too diverse. Besides different types of noise (white noise, speckle), the appearance of elevated objects is dependent on the sensor viewing geometry and may appear totally different in multi-aspect SAR images compared to optical images. Hence, decision-level fusion, which means that an estimate (decision) is made based on the information from each sensor alone and these estimates are subsequently combined in a fusion process, shall be used. To be able to solve possible conflicts while keeping the mutually supporting information, the uncertainty of the objects needs to be estimated before fusion. Consequently, each feature extraction algorithm will be designed in such a way that it delivers a quality measure attached to its result. Finally, the selection and fusion will be carried out by a Bayesian reasoning process.

4 System

The system for the automated detection of intact roads from multi-sensorial imagery is divided into two main parts. The first step is an automatic road extraction module comprising an internal evaluation, followed by an interactive module to deal with rejected and uncertain road parts.

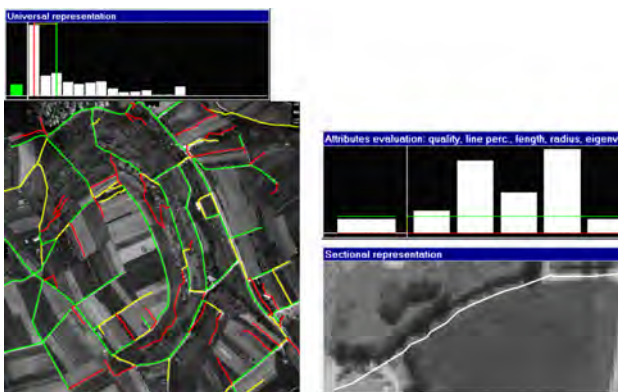


Fig. 3: Example of an evaluation of roads with two levels of detail

The initial automatic phase of road extraction is done with the system of (WIEDEMANN & HINZ 1999). The results of this phase are internally evaluated using the self-diagnosis scheme described in (HINZ & WIEDEMANN 2004). The aim is to derive a priority of road segments, which

have to be checked in a subsequent process. An example of initial road part evaluation is given in Fig. 3: roads which could be detected are depicted in green, not detected roads are labeled red and uncertain decisions of the system are labeled yellow. In the following step, a road network is generated incorporating the topological characteristics of the network functionality. This step is important, because the connection of two places within a road network is very relevant concerning crises applications.

The second phase contains an interactive module to deal with rejected or uncertain road parts. The system will provide two resolutions supporting the final processing: the coarse resolution shows an overview of the road network while the uncertain road parts can be displayed in a higher resolution (cf. Fig. 4). The user can chose three types to connect road parts, if the first automatic step of the system fails. The first possibility is to use a snake-based approach incorporating topological knowledge of networks as introduced in (BUTENUTH 2007). The second opportunity is an algorithm for road tracking as developed by (BAUMGARTNER et al. 2002), an example is shown in Fig. 4. The third possibility is a manual digitizing of the missing road parts by the user, if the first two approaches fail.

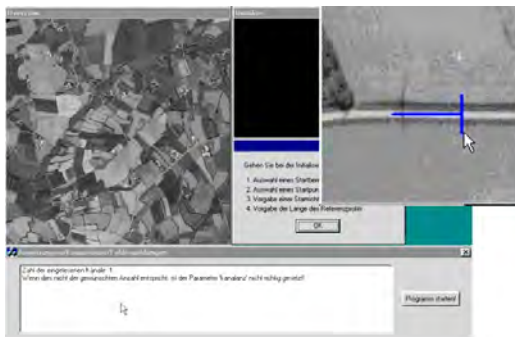


Fig. 4: Interface of an experimental system for road tracking

5 Conclusions and outlook

We presented a concept for a system for the automated detection of intact roads from multi-sensorial imagery. Some core modules have already been implemented. However, the integration into a complete system has still to be done, and tests with numerous real application scenarios need to be carried out. In addition, manually derived reference data have to be used to evaluate the system. A further methodical goal is to investigate, how the integration of the optical and radar imagery can be accomplished in detail and, in addition, which image type or combination can provide a promising data source for crises applications.

6 Literature

- BALSAVIAS, E.; GRÜN, A. & VAN GOOL, L. (EDS.), 2001: Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images (III). Balkema Publishers, Lisse Abingdon Exton(PA) Tokio: 415.
- BAUMGARTNER, A.; HINZ, S. & WIEDEMANN, C., 2002: Efficient Methods and Interfaces for Road Tracking. In: International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, **34** (3B): 28-31.
- BAUMGARTNER, A.; STEGER, C.; MAYER, H.; ECKSTEIN, W. & EBNER, H., 1999: Automatic Road Extraction Based on Multi-Scale, Grouping, and Context. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, **65** (7): 777-785.
- BUTENUTH, M., 2007: Segmentation of Imagery Using Network Snakes. Photogrammetrie Fernerkundung Geoinformation, **1/2007**: 7-16.
- BUTENUTH, M.; GÖSSELN, G. V.; TIEDGE, M.; HEIPKE, C.; LIPECK, U. & SESTER, M., 2007: Integration of Heterogeneous Geospatial Data in a Federated Database. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, **62** (5): 328-346.
- BUTENUTH, M.; STRAUB, B.-M.; HEIPKE, C. & WILLRICH, F., 2003: Tree Supported Road Extraction from Aerial Images Using Global and Local Context Knowledge. In: Crowley, Piater, Vincze, Paletta (eds.), Computer Vision Systems, Lecture Notes in Computer Science **2626**, Springer: 162-171.
- GAMBA, P.; HELLWICH, O. & LOMBARDO, P. (EDS.), 2003: ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, **58** (1-2), Theme issue on Algorithms and Techniques for Multi-Source Data Fusion in Urban Areas: 125.
- GERKE, M.; BUTENUTH, M.; HEIPKE, C. & WILLRICH, F., 2004: Graph Supported Verification of Road Databases. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, **58** (3/4): 152-165
- GRÜN, A.; BALSAVIAS, E. & HENRICSSON, O. (EDS.), 1997: Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images (II). Birkhäuser Verlag, Basel.
- HEDMAN, K.; HINZ, S. & STILLA, U., 2006: A Probabilistic Fusion Strategy Applied to Road Extraction from Multi-Aspect Sar Data. In: International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing, and Spatial Information Sciences, **36** (3): 55-60.
- HINZ, S. & WIEDEMANN, C., 2004: Increasing Efficiency of Road Extraction by Self-Diagnosis. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing **70** (12): 1457-1466.
- MAYER, H., 1999: Automatic Object Extraction from Aerial Imagery - A Survey Focusing on Buildings. Computer Vision and Image Understanding **74** (2): 138-149.
- SOERGEL, U.; THOENNESSEN, U.; BRENNER, A. & STILLA, U., 2006: High-resolution SAR data: new opportunities and challenges for the analysis of urban areas. In: IEEE Proceedings on Radar, Sonar & Navigation **153** (3): 294-300.
- WESSEL, B. & HINZ, S., 2004: Context-supported Road Extraction from SAR-Imagery: Transition from Rural to Built-up Areas. In: Proceedings of EUSAR 04: 399-403.
- WIEDEMANN, C. & HINZ, S., 1999: Automatic Extraction and Evaluation of Road Networks from Satellite Imagery. In: International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, **32** (3-2W5): 95-100.

DESECURE - Satellitengestützte Kriseninformation für Deutschland

MONIKA GÄHLER¹ & STEFAN VOIGT¹

Zusammenfassung: DESECURE ist ein Verbundprojekt mit dem Ziel der Verbesserung der Verfügbarkeit satellitengestützter Kriseninformation in Deutschland und geht einher mit dem Ausbau der GMES Aktivitäten auf europäischer Ebene. Die Verbesserung der Krisenlageinformation erfolgt unter anderem durch eine Stärkung der in Deutschland verfügbaren methodisch-technischen Notfalkartierungskapazitäten. Dabei wird der gesamte relevante Produktionszyklus von satellitengestützter Information (Satellitendatenempfang, Prozessierung, Informationsextraktion, Kartenerstellung und -bereitstellung) analysiert und an entscheidenden Stellen verbessert. Hierbei werden auch insbesondere die deutschen Sensoren TerraSar-X und RapidEye in die Analyseprozesse eingebunden und damit nationalen und internationalen Nutzern besser zugänglich gemacht. Ferner werden durch Universitäten und Industriepartner technisch-operative Analysemethoden geschaffen, die die Anwendungsentwicklung und Vermarktung der Daten und Informationsprodukte auch über den Krisensektor hinaus stärken.

1 Hintergrund

Mit der fast stetig steigenden Zahl der Naturkatastrophen bedingt u.a. durch den globalen Klimawandel und einem starken globalen Bevölkerungswachstum wächst auch die Zahl der betroffenen Menschen und der wirtschaftlichen Schäden- lediglich die Zahl der Personen, die durch Naturkatastrophen getötet wurden, zeigt keine einheitlichen Trends.

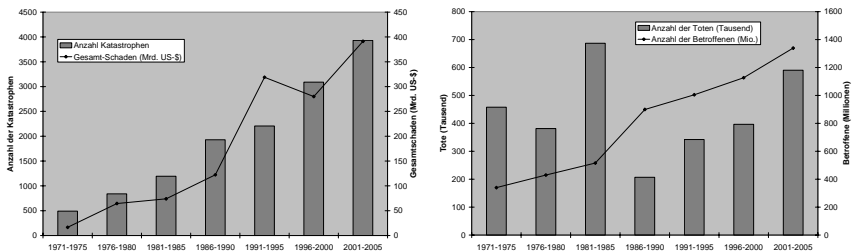


Abb. 1: Vergleich der Anzahl der Katastrophen und der wirtschaftlichen Schäden (links) und der Anzahl der Toten und Betroffenen (rechts) für den Zeitraum 1971-2005 (CRED 2008)

Mit der weltweiten Zunahme von Naturkatastrophen, humanitären Notsituationen und zivilen Gefahrenlagen steigt auch der Bedarf an zeitnaher, präziser und flächendeckender Lageinformation. Diese aktuellen und umfassenden Informationen können inzwischen zu einem großen Teil durch Analyse von satellitengestützten Fernerkundungsdaten bereitgestellt werden. Vorausset-

¹ Dr. Monika Gähler und Dr. Stefan Voigt: DLR-DFD, Abteilung Umwelt & Sicherheit, Postfach 1116, 82234 Wessling. Email: Vorname.Nachname@dlr.de

zung hierfür ist besonders die Sensor- und Systementwicklung. Innerhalb der letzten 10 Jahre haben Satellitenbilder eine Qualität im Bezug auf Verfügbarkeit und Genauigkeit erreicht, die es ermöglicht sie routinemäßig für die Gewinnung von zeitnaher Kriseninformation einzusetzen. Darüber hinaus sind Strukturen und Kapazitäten notwendig, die eine schnelle Aufnahme und Aufbereitung der Satellitendaten ermöglichen. Vor diesem Hintergrund hat das DLR das Zentrum für satellitengestützte Kriseninformation (ZKI) als Service des Deutschen Fernerkundungsdatenzentrums eingerichtet. Seine Aufgabe ist die schnelle Beschaffung, Aufbereitung und Analyse von Satellitendaten bei Natur- und Umweltkatastrophen, für humanitäre Hilfsaktivitäten und für die zivile Sicherheit (vgl. VOIGT et. al. 2005 und 2007). Die Auswertungen werden nach den spezifischen Bedürfnissen für nationale und internationale politische Bedarfsträger sowie Hilfsorganisationen durchgeführt. Das ZKI operiert dabei im nationalen, europäischen und internationalen Kontext und ist eng vernetzt mit verschiedenen behördlichen Partnern auf EU-, Bundes- und Landesebene (Krisenreaktionszentren, Zivil- und Umweltschutz), Nicht-Regierungsorganisationen (humanitäre Hilfsorganisationen) sowie Satellitenbetreibern und Weltraumorganisationen. Bei seiner Arbeit stützt sich das ZKI auf die breite Expertise in Empfang, Verarbeitung und Analyse von Fernerkundungsdaten innerhalb des DLR und arbeitet eng mit Partnern aus Forschung und Industrie zusammen.

Seit dem Jahr 2002 hat das ZKI in mehr als vierzig Fällen die Partner mit satellitengestützter Lageinformation unterstützt, darunter Einsätze wie die Tsunami-Katastrophe im Indischen Ozean (2004), das schwere Erdbeben in Pakistan (2005), aber ebenfalls die Waldbrände der letzten Jahre im Mittelmeerraum, die Überflutungen der Elbe (2002, 2006) sowie in Großbritannien 2007². Bei der Analyse stützt sich das ZKI auf Daten, die im Rahmen von verschiedenen Initiativen wie z.B. der "International Charter on Space and Major Disasters" zur Verfügung gestellt werden.

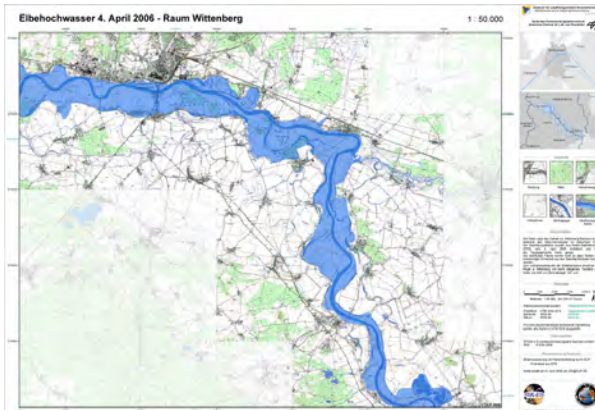


Abb. 2: Elbehochwasser 2006 - Detektion von Überflutungsflächen im Raum Wittenberg abgeleitet aus ERS und visualisiert auf einer Topographischen Karte

² Eine aktuelle Übersicht über die Aktivierungen findet sich auf folgender Webseite: <http://www.zki.dlr.de>

Ein satellitengestütztes Kriseninformationsprodukt ist die Karte in Abbildung 2, eine Karte im Raum Wittenberg (Sachsen-Anhalt), die das Elbehochwasser vom 4. April 2006 dargestellt. Für das Elbehochwasser wurden sowohl verschiedene Satellitendaten (Optik und Radar) vor und nach der Katastrophe zunächst radiometrisch und geometrisch korrigiert, analysiert und dann mit anderen Geodaten kombiniert (Topographische Karten). In der dargestellten Karte wurden die Hochwasserflächen aus ERS-Daten abgeleitet.

2 DESECURE im GMES-Kontext

Die Entwicklung des ZKI auf deutscher Seite ging einher mit dem Ausbau der GMES (*Global Monitoring for Environment and Security*)- Aktivitäten auf europäischer Ebene. Um das enorme Potential der Erdbeobachtung auch zur Unterstützung politischer Entscheidungsträger und Behörden auf europäischer, nationaler, regionaler und lokaler Ebene optimal nutzen zu können, wurde eine gemeinsame Initiative der Europäischen Kommission und der europäischen Raumfahrtagentur ESA für globale Umwelt- und Sicherheitsbeobachtung (GMES) ins Leben gerufen. Nach dem Aufbau der GMES-Kapazitäten bis zum Ende 2008 sollen die GMES Dienste in den operationellen Betrieb sowie eine evolutionäre Weiterentwicklung übergeführt werden. Dies wird zunächst durch GMES Kerndienste für Land, Ozean und Notfallkartierung geschehen.

Sowohl auf Seiten der ESA wie auch auf Seiten der Europäischen Kommission gibt es dementsprechend eine Reihe von Aktivitäten u.a. zum Themenkomplex zivile Sicherheit und Kriseninformation. Das DLR und verschiedene Verbundpartner sind in eine Reihe von Projekten zum Thema eingebunden (RESPOND, Risk-EOS, PREVIEW, LIMES, BOSS4GMES, GMOSS).

Um die europäischen GMES-Aktivitäten und nationale Kapazitäten in der Informationserzeugung und -bereitstellung besser koppeln zu können, wurden die nationalen Projekte DeCOVER, DeMARINE und DeSECURE initiiert. Diese nationalen Verbundvorhaben haben Schnittstellenfunktion zu den europäischen GMES Kerndiensten und sollen den nationalen und föderalen Informationsbedarf im Bereich der Datennutzung bedienen. Die Projekte werden über das DLR Raumfahrtmanagement aus dem nationalen Raumfahrtprogramm gefördert.

Durch DESECURE wird gewährleistet, dass die deutsche Position im Bereich der Notfall- und Krisenkartierung besser vernetzt und im europäischen Kontext verankert wird. In diesem Zusammenhang ist die Integration der aktuellen und kommenden deutschen Sensoren TerraSar-X bzw. RapidEye auch über den Bereich Notfall- und Krisenkartierung von großer Bedeutung.

3 Übergeordnete Ziele und Verbundpartner des Projekts

Die Bereitstellung von Krisenlageinformation mit Hilfe von Satellitendaten ist eine hochkomplexe Aufgabe bei der vor allem Schnelligkeit und sowie geometrische und thematische Genauigkeit der gewonnenen Information von übergeordneter Bedeutung sind. Die Gewinnung von satellitengestützter Kriseninformation erfolgt heute noch zu einem überwiegenden Teil durch visuelle Interpretation der unterschiedlichen Bilddaten, da das semantische und synoptische Bildverständnis von geschulten Bildinterpreten bis heute kaum oder nur sehr schwer in standardisierten und automatisierten Algorithmen, allgemeingültig und für die verschiedensten Bildquellen gleichsam geltend, gefasst werden kann. Daher gibt es an dieser Stelle ein bedeutendes Entwick-

lungspotential und verschiedene Forschungsfragen für die Optimierung der Notfallkartierungen. Ferner gibt es auch im Bereich des Datenempfangs und der Vorverarbeitung der Satellitenbilddaten Potential zur Verbesserung, vor allem in Bezug auf Geschwindigkeit und Genauigkeit. Daher ist das übergeordnete Ziel des Verbundprojektes die Verbesserung der operativen Bereitstellung von Krisenlageinformationen, vor allem durch eine Stärkung der in Deutschland verfügbaren methodisch-technischen Notfallkartierungskapazitäten. Durch das Projekt DESECURE sollen die Schnittstellen zwischen den Partnern aus Forschung und Industrie (siehe Abbildung 3) optimiert und neue, nach Möglichkeit standardisierte, Methoden der Informationsgewinnung aus Satellitenbilddaten entwickelt werden.



Abb. 3: Verbundpartner des DESECURE-Projektes

Mit diesen Methoden soll schneller und verlässlicher krisenrelevante Information aus Fernerkundungsdaten abgeleitet und auch über verbesserte Prozessketten des ZKI verfügbar gemacht werden. Weiterhin werden mit DESECURE die deutschen Sensoren TerraSar-X und RapidEye besser in die Krisenkartierungsaktivitäten eingebunden und damit neben den deutschen auch den europäischen Nutzern besser zugänglich gemacht. Ferner werden durch Universitäten und Industriepartner technisch operative Analysemethoden geschaffen, die die Anwendungsentwicklung und Vermarktung der Daten und Informationsprodukte auch über den Krisensektor hinaus stärken.

Die Koordination von DESECURE obliegt der Abteilung Umwelt und Sicherheit im Deutschen Fernerkundungsdatenzentrum des DLR.

4 Wissenschaftliche und technische Arbeitsziele

Das Projekt DESECURE befasst sich mit allen Bereichen des Produktionszyklus von satellitengestützter Kriseninformation (siehe Abbildung 4). Ausgehend von einer Krisensituation und einer Nutzeranfrage müssen zunächst sehr rasch, relevante Satelliten ausgewählt und so programmiert werden, dass sie das entsprechende Krisengebiet schnellstmöglich abdecken.

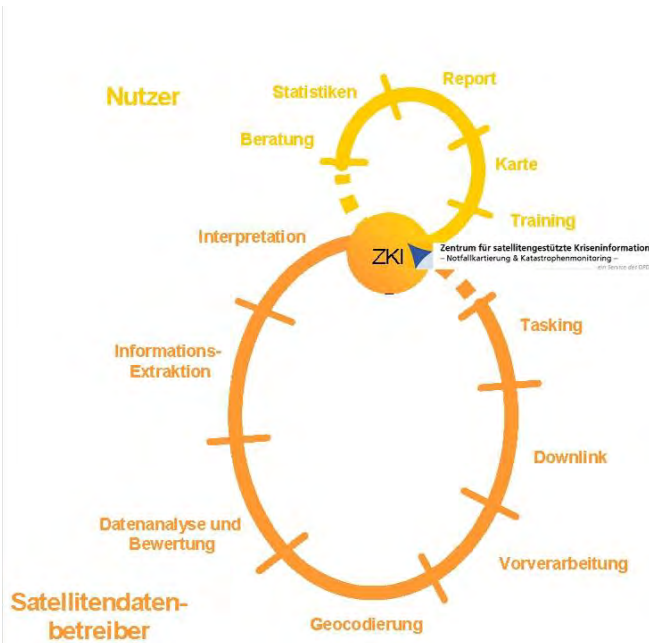


Abb. 4: Aufgaben des ZKI an der Schnittstelle zwischen Satellitenanbietern und Nutzern

Ferner spielt der optimierte Datenempfang und die Vorbereitung von entsprechenden Bodenstationen eine wichtige Rolle bei der Notfallkartierung, denn hier können wichtige Stunden, teilweise sogar Tage bei der Verarbeitung eingespart werden. Im Bereich Datenanalyse gilt es die Verfahren so automatisch, aber auch so robust wie möglich zu gestalten, um die extrahierte Informationen verlässlich interpretieren und so aufbereiten zu können, dass sie möglichst intuitiv vom Nutzer aufgenommen werden können. Auch die Form und der Weg der Weitergabe der Informationsprodukte an die Endnutzer in Lagezentren von Behörden und Hilfsorganisationen oder direkt an die Einsatzkräfte vor Ort in den Krisengebieten sind hierbei zu beachten und ggf. zu

optimieren. Nach Rücksprache mit den Nutzern werden Teile des Produktionszyklus ggf. wiederholt durchlaufen, um neue oder spezifischere Informationen zu gewinnen. Alle diese Aufgabenbereiche werden in DESECURE kritisch untersucht sowie ggf. optimiert. Im Folgenden werden die wichtigsten Forschungsfragen dabei (vgl. Kapitel 4.1 – 4.6) erläutert.

4.1 Nutzeranforderungen

In DESECURE werden Nutzerbedarf und Informationsanforderungen auf verschiedenen Ebenen (international, national und regional) gesammelt und in einer Nutzerdatenbank zusammengeführt. Ziel ist es unter anderem dabei, die Nutzer für den Einsatz von satellitengestützter Kriseninformation zu sensibilisieren. Gleichzeitig sollen ihre Anforderungen im DESECURE-Kontext (z.B. direkte Schnittstellen zum Nutzer, Anforderungen an ausgewählten, ereignisorientierten Standardkarten und -dienste für bestimmte Krisensituationen) berücksichtigt und die Interoperabilitätsanforderungen an DESECURE-Dienste, sowie bereits bestehende Informationsquellen, Anwendungen, Portale und Standards mit einbezogen werden.

Ein weiterer Schwerpunkt ist die Ausarbeitung von Einsatz- und Finanzierungsszenarien für die Datenbeschaffung im Krisenfall. Das ZKI hat im Laufe der letzten Jahre in vielen Krisensituationen satellitengestützte Kriseninformation für deutsche, europäische aber auch außer-europäische Nutzer verfügbar gemacht und konnte dabei auf verschiedenste Datenquellen zurückgreifen. Diese wurden entweder im Rahmen der International Charter ‚Space and Major Disasters‘ zur Verfügung gestellt, durch Förderprojekte finanziert (z.B. RESPOND, Risk-EOS) oder aber durch bilaterale Absprachen mit Satellitenanbietern zur Verfügung gestellt. Vor diesem Hintergrund sollen Szenarien ausgearbeitet werden, wie Daten der beiden Sensoren TerraSAR-X und RapidEye für Notfallkartierungen des ZKI im Krisenfall zielgerichtet und zeitoptimal zugänglich gemacht werden können.

4.2 Zeitnahe Satellitendatenbeschaffung/Datenhandhabung

Zur Verbesserung der krisenrelevanten Prozessierungsketten ist die Integration von RapidEye und TerraSAR-X in die operationelle Arbeit des ZKI's geplant. Dabei wird eine neue Qualität der Bereitstellungszeit von Datenprodukten angestrebt. Der Anforderung zur schnellstmöglichen Satellitenkommandierung, der erforderlichen Datenaufnahme durch den Satelliten und der Akquisition (Empfang) sowie der Prozessierung von Basisprodukten in nahe Echtzeit wird im besonderen Rechnung getragen. Hierzu erfolgt eine detaillierte Anforderungsanalyse, die Durchführung von Simulationsläufen, Maßnahmen zur Optimierung und deren Tests sowie die echtzeitnahe Anbindung der Prozesskette an das Datenmanagement mit dem System DIMS des DLR.

4.3 Echtzeitspezifische geometrische & radiometrische Korrekturen

In DESECURE wird versucht, eine Nah-Echtzeit Korrektur von Satellitenbilddaten zu erreichen, um eine möglichst schnelle Auswertung der Daten für Krisenfälle zu erreichen. Hierfür werden Methoden und Verfahren, die eine Nah-Echtzeit-Korrektur bzgl. Geometrie und Radiometrie erlauben, getestet bzw. weiterentwickelt und implementiert sowie weitestgehend automatisiert.

4.4 Informationsextraktion

Die automatisierte Informationsextraktion stellt eines der zentralen Elemente dieses Projektes dar. Zielsetzung insgesamt ist dabei die Gewinnung semantischer Information aus Bilddaten mittels semi- und vollautomatischer Extraktionsansätze. Die Datengrundlage hierfür bilden sowohl optische Bilddaten, wie auch Radar-Daten und Informationen aus GIS-Datenbeständen. Neben der Adaption, Weiterentwicklung und Effizienzsteigerung bestehender Algorithmen sollen hier in beträchtlichem Umfang technisch-methodische Neuentwicklungen vorangebracht werden, die einerseits einen starken Bezug zu krisenrelevanten Fragestellungen aufweisen, andererseits aber methodisch in soweit generisch gehalten sind, dass sie im Ansatz auf andere Anwendungen der automatisierten Bildanalyse übertragbar sind.

Diese Zielstellung soll dadurch realisiert werden, dass drei komplementäre methodische Ansätze mit jeweils einem krisenrelevanten Schwerpunktthema verknüpft werden. Zum einen werden statistische wie auch trainierte Segmentierungsalgorithmen zur Bildobjekterfassung und -aggregation mit dem Schwerpunkt der (multitemporalen) Veränderungsdetektion, insbesondere zur Flutkartierung behandelt. Ein weiterer Fokus wird auf die automatisierte Objektmodellgenerierung und Objektextraktion („Objektkategorisierung“) mittels generischer, selbst-lernender wie auch semi-automatischer Verfahren gelegt. Der Einsatz solcher Verfahren ist insbesondere für flächenhafte Objekte und Objektveränderungen gewinnbringend, die schwer explizit modellierbar sind, wie dies z.B. für (teil-) zerstörte Gebäude oder Hangrutschungen der Fall ist. Komplimentiert werden die Analysen durch die Entwicklung von Methoden zur automatisierten Extraktion linearer Strukturen. Im Katastrophenfall sind insbesondere aktuelle Informationen über das Straßennetz von größter Bedeutung, weshalb der Schwerpunkt in erster Linie auf einer effizienten Straßenerfassung inklusive einiger Straßenattribute liegen soll.

4.5 Optimierte Visualisierung und Kartenerstellung

Eine weitere wichtige Aufgabe ist die optimierte und standardisierte Visualisierung der satellitengestützten Kriseninformation. Dies beinhaltet zum einen Darstellungsoptimierungen der Satellitenbilder durch synoptische Visualisierung von optischen und Radardaten und die dreidimensional interaktive Geovisualisierung. Zum anderen werden Methoden zur verdichteten und standardisierten Kartendarstellung von krisenrelevanten Bildinhalten entwickelt, die es den Nutzern ermöglichen sollen, schnell eine Lagesituation aus einer Karte zu erkennen. Zur Erweiterung der Datenbasis werden außerdem freiverfügbare Datenquellen recherchiert.

4.6 Dissemination und Anwendungen

Inwieweit neue Wege zur Weitergabe der satellitengestützten Kriseninformation über internetbasierte Kartendarstellung aufgebaut und gleichzeitig satellitengestützte Kriseninformationen an krisenrelevante Informationssysteme und Portale Deutschlands angebunden werden können, wird ebenfalls in DESECURE analysiert. Daneben werden Satellitenbildmosaiken für das Gebiet Bundesrepublik Deutschland als Referenz für akute Krisensituationen auf Basis von Daten der Satelliten IRS-P6 und RapidEye aufgebaut.

5 Fazit und Ausblick

Erdbeobachtung kann zunehmend einen wertvollen Beitrag zur Katastrophenvorsorge und zum -management leisten, der sowohl Entscheidungsträgern aber auch vor allem den Einsatzkräften vor Ort zu Gute kommt. Sowohl die räumliche als auch zeitliche Auflösung insbesondere der neuen Sensoren können zukünftig den Nutzeranforderungen besser gerecht werden. Entscheidend ist dabei, dass die gesamte Datenkette von der Aufnahme bis zum Informationsprodukt zur Verfügung steht und optimiert ist, um eine nahe-Echtzeitfähigkeit zu gewährleisten. Hierfür sind jedoch auch Strukturen (z.B. Finanzierungs- und Einsatzstrategien) dauerhaft zu institutionalisieren, die einen derartigen Service gewährleisten können, so dass durch satellitengestützte Kriseninformation die Erdbeobachtung zivile und humanitäre Anwendungen unterstützen kann.

6 Dank

Das Projekt wird mit Mitteln aus dem nationalen Raumfahrtprogramm über das DLR Raumfahrtmanagement gefördert.

7 Literaturverzeichnis

- CRED (,CENTRE FOR RESEARCH ON THE EPIDEMIOLOGY OF DISASTERS'), 2008: Emergency Events Database, <http://www.emdat.be/>.
- VOIGT, S.; KEMPER, T.; RIEDLINGER, T.; KIEFL, R.; SCHOLTE, K. & MEHL, H., 2007: Satellite image analysis for disaster and crisis-management support. – In: IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 45 (6), S. 1520-1528.
- VOIGT, S.; RIEDLINGER, T.; REINARTZ, P.; KÜNZER, C.; KIEFL, R.; KEMPER, T. & MEHL, H., 2005: Experience and Perspective of Providing Satellite Based Crisis Information, Emergency Mapping & Disaster Monitoring Information to Decision Makers and Relief Workers. – In: Geoinformation for Disastermanagement. Springer, Heidelberg, S. 519-531.

Surface deformation mapping employing a kinematic GPS approach

MICHAEL BUCHWITZ¹, THOMAS HEINIG¹, MARIA HELBIG¹, RICHARD GLOAGUEN¹
& BEKELE ABEBE²

Abstract: *In the northern Main Ethiopian Rift we document surface morphologies and strain distribution patterns of recently active small-dimensional N/S- to NE/SW-striking normal faults transitional to fissures and monoclines which occur in young Neogene volcanic rocks along the rift axis. By applying kinematic GPS measurements in a dense raster high-resolution data supplementing the air photo and aerial DEM analysis of superficial structures can be raised: While the recording of elevation profiles perpendicular to the structural trend defines individual morphologies of fault/ fissure/ monocline systems in detail, matching corners along the former adjacent walls of a fissure or fault are measured in order to infer displacement vectors. A two-kilometer-long fault/ fissure/ monocline system to the NW of the rift lake Beseka was mapped using a network of about 2150 GPS points, including the endpoints of 180 slip vectors. From this data base we derived a model of strain distribution, displaying local deviations from the overall trend of extension, and surface models of the structure illustrating patterns of segment jointing and morphological transition.*

1 Introduction

The Main Ethiopian Rift (MER) is a NE- to SW-trending section of the East African Rift System (EARS). It has been shown to be tectonically segmented: In distinct en-échelon arranged zones of intense tectonism, referred to as Wonji Fault Belt (WFB), normal faults with a N/S- to NNE/SSW trend oblique to the direction of the marginal fault systems and rift shoulders develop (see BOCCALETTI 1999 and references therein). This study focuses on a system of faults, fissures and monoclines within the Lake Beseka graben to the south of the Fantale caldera volcano (Fig.1).

Normal faults of this graben and several other sites in the MER are particular in displaying atypical morphologies: Rather than dipping towards the fault face the hanging wall is tilted in the opposite direction. Hanging and foot walls are not adjacent but separated by a fissure-like opening declining with depth. Often atypical faults are transitional to fissures when their vertical offset is dying out laterally. Their vertical displacement/ fault length ratio is relatively low (GLOAGUEN & CASEY 2002, KURZ et al. 2007, BUCHWITZ 2007).

¹) Institut für Geologie, TU Bergakademie Freiberg, Bernhard-v.-Cotta-Str. 2, 09599 Freiberg, Germany, E-Mail: michael@buchwitz.de

²) Department of Earth Sciences, Addis Ababa University, P.O. Box 1176, Addis Ababa, Ethiopia

Since local variation in the kinematics of atypical faults and their along-fault morphological change has not yet been documented in detail we focus here on the high-resolution mapping and analysis of a single recent structure which is only negligibly degraded by recent erosion. We use the term ‘fault/ fissure/ monocline system’ (FFMS) referring to the observation that atypical normal faults in our study site are not occurring isolated and distinct from other structures but in association with and transitional to fissures, monoclines and narrow grabens.

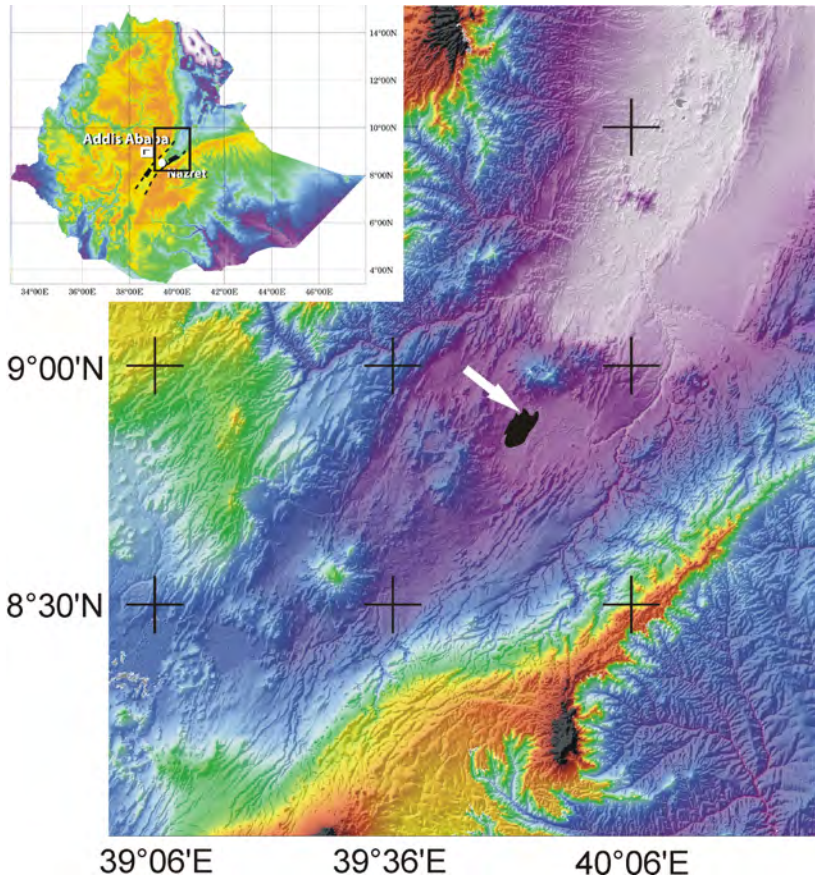


Figure 1: Location of the study site within the northern Main Ethiopian Rift of central Ethiopia. The white arrow marks the north-western shore of Lake Beseka (black) where the mapped structure is outcropping.

2 Methods

We use a measurement setup with one stationary and one mobile Trimble 5700L1 receiver for a kinematic GPS measurement (“post processing kinematic” mode). During the survey each waypoint is measured for a period of at least 15 seconds. Recording points along the fault hanging and foot walls and on both sides of a fissure we preferably chose former adjacent corners and edges recognizable by their matching relief (Fig. 2b). These can be regarded as endpoints of a slip vector. To have a further control of its accuracy we record the vector length and orientation using a tape measure and a geologist’s compass. Additionally we measure elevation profiles perpendicular to the structural trend in order to register the effects of bending and block tilting (Fig. 2c). Resulting measurement paths following these purposes can be complex (Fig. 2d), requiring field markings to recover profile endpoints and matching points.

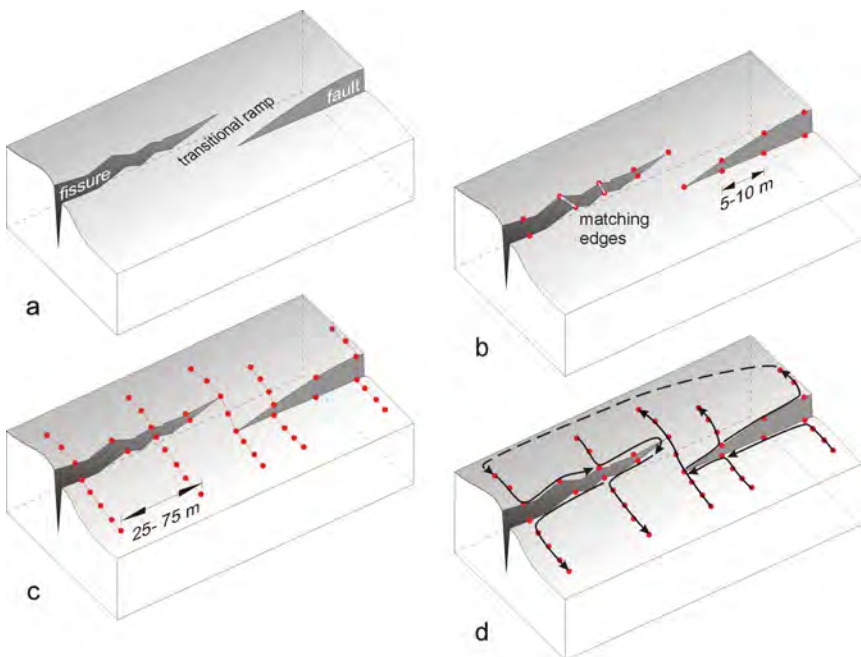


Figure 2: Methodology of measurements: a) showcase morphology; b) point sampling along fault and fissure outlines with consideration of matching corners and edges; c) sampling along perpendicular elevation profiles; d) optimized measurement path.

We derive a distribution model of displacement directions using a GIS software (ArcGIS 9) to process the GPS data and depict working steps (Fig. 3). From the whole data set we extract the perpendicular profiles which can be interpreted separately in terms of morphology (Fig. 4), the traces of faults and fissures (Fig. 3-A: blue areas) and the slip vectors whose reference point is defined as the middle of its two endpoints (Fig. 3-B).

In order to compare the local orientations and opening directions we digitalize an intermediate fault trend as a polyline and subdivide it by equal-spaced vertices (Fig. 3-C). For each vertex we calculate (1) a structural trend (as an angle from north) using the coordinates of neighbouring vertices and (2) an average slip direction as the spherical mean value of all slip vector orientations from a 25 m neighbourhood (circles in Fig. 3-D), weighted according to vector length. The resulting point dataset comprises the vertex coordinates and the 'local fault trend' and 'slip direction' as attributes. The obliquity angle is derived as the difference of the local dip direction (perpendicular to the local trend) and the slip direction. The change of these parameters over the length of the observed FFMS can be depicted in maps (Fig. 3-E, 3-F, Fig. 5)

We create surface models of the entire structure on the basis of the complete GPS data set employing different methods: (1) Ordinary kriging with a spherical semivariogram model using the program Surfer 8.02. Points were added from a high-resolution aerial DEM for the interpolation of the marginal areas. (2) Modelling with GoCAD Suite 2.1.4: Representing discontinuities the fault faces and fissures are left out from the surface interpolation. The intervening sections are created as separate surfaces, partitioned iteratively and adapted to the constraining GPS points. By adjustment of their margins and merging of these separate, sections a comprehensive surface arises which is only discontinuous where the fissures and faults occur.

3 Results

The elevation profiles perpendicular to the structural trend display characteristic morphologies (Fig. 4) which can be distinguished by the amount of vertical and horizontal displacement and by the types of structures which are accommodating this displacement: (1) often several fissures occur alongside gently sloping monoclines. (2) In some profiles a certain amount of vertical offset appears in one of the fissures, (3) in others only the horizontal spacing in one of the fissures is particularly high. (4) Atypical normal fault profiles are characterized by that most of the vertical displacement is carried by the fissure-like fault and not by the monoclinical bend in the hanging wall. (5) Rarely the bended or tilted wall is raised above the other wall (Fig. 4: no. 9).

In the distribution of displacement directions a particularly conspicuous segmentation pattern can be found, correlating largely with some segmentation seen in the fault trend (Fig. 5). As for tensional fractures the recorded direction of tectonic movement is mostly perpendicular to the structural trend and not following a similar overall direction of extension for the whole system. In addition to the variation in the parameters 'fault trend' and 'displacement direction' the two surface models (Fig. 6, 7) display how the vertical displacement is distributed over length of the

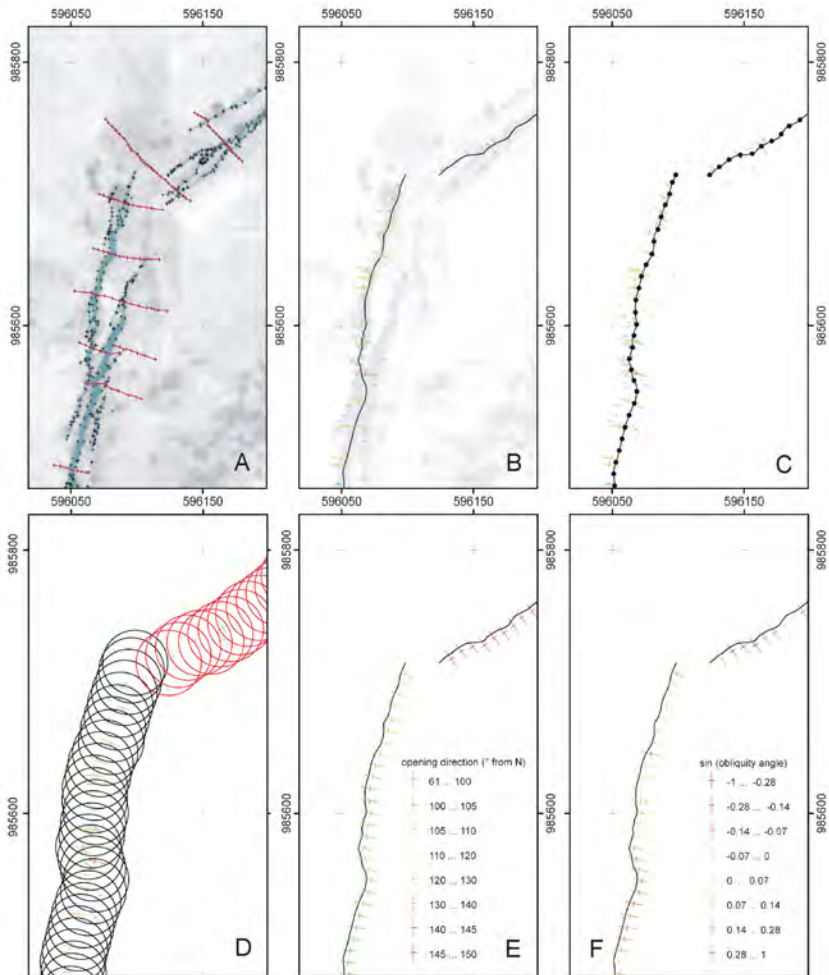


Figure 3: Conversion of GPS data into a distribution of displacement directions: A) Measurement points, reconstructed fault trace (blue), and profile lines (red) superimposed on an air photo. B) Structural trend line (black) and orientation of displacement vectors (blue: smallest displacement amounts, reddish: largest amounts). C) Trend line partitioned by equal-spaced vertices. D) Vectors from the neighbourhood of each vertex (black and red circles) are used for calculation of average directions. E, F) Average (horizontal) displacement directions, colouring according to different orientation parameters.

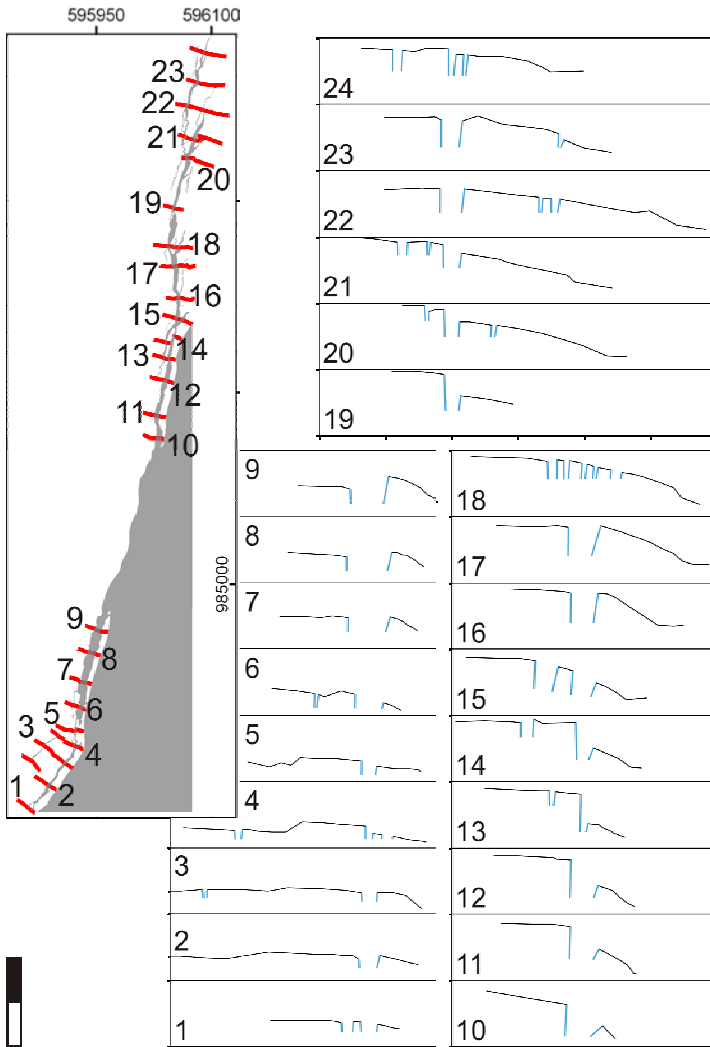


Figure 4: Map of the southern section of the analyzed FFMS and the respective elevation profiles (red). Grey: Lake Beseka area and fissure spacing. Blue profile lines illustrating how the faces of faults and fissures may proceed with depth have not been measured. Scale bar: 20 m. Coordinates: UTM/Adindan.

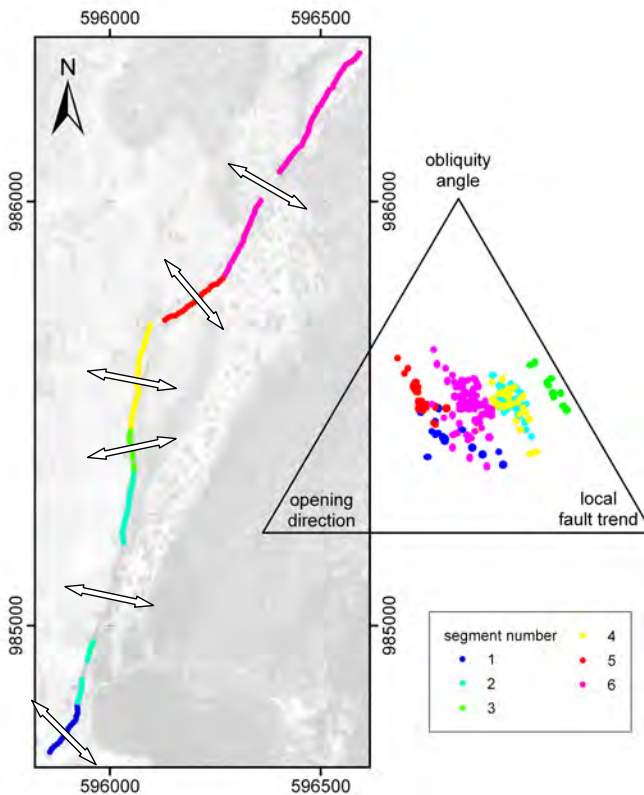


Figure 5: Map and triplot illustrating the segmentation of the FFMS according to displacement directions.

FFMS: Only the two segments with a N100-105°E slip direction (Fig. 5, 6: II, IV) comprise with high vertical offsets. Including all the morphological details considered during the kinematic GPS survey the GoCAD surface model depicts atypical faults with higher accuracy than in previous approaches.

4 Discussion

The exact referencing of matching corners in fissures and faults (as slip vector endpoints) is a clear advantage of this kinematic GPS approach compared to other kinematic indicator measurements in the MER (e.g. ACOCELLA & KORME 2002, WAUSCHKUH 2006) improving the reproducibility of such data.

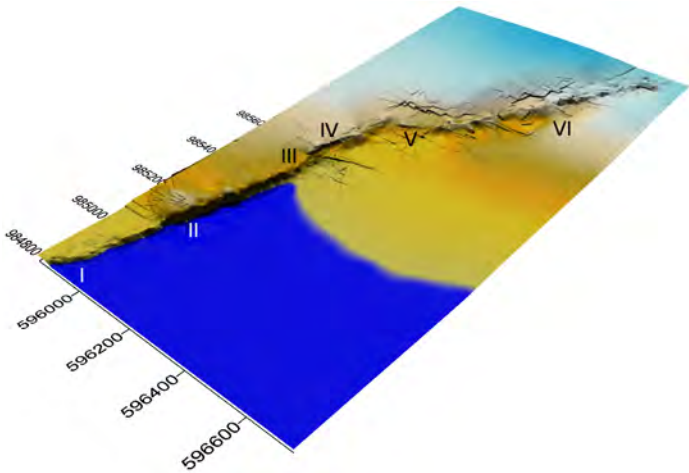


Figure 6: Surface model calculated with Surfer 8.02 on the basis of 2150 GPS points and some further control points taken from an aerial DEM. Dark blue: the surface of Lake Beseka. Structural segments are numbered. Coordinates: UTM/ WGS 84. Vertical exaggeration: 1.5-fold.

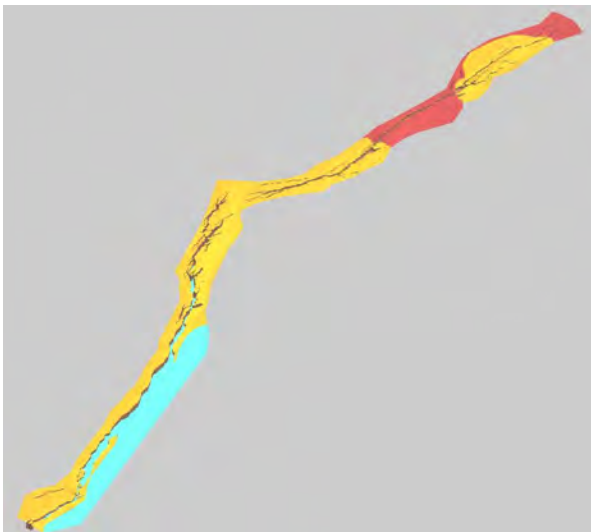


Figure 7: Surface model created with the GoCAD Suite 2.1.4 using the same GPS points as in Fig. 6. Yellow: rock type ignimbrite; red: rock type basalt; cyan: lake surface.

Slip directions of certain structural segments are deviating from the overall direction of extension (between N90°E and N110°E for the MER, see CASEY et al. 2006), indicating a local stress field distortion which is governed by a locally effective factor - we assume that it can be attributed to surface-near magmatic dyking (see BUCHWITZ 2007) and the influence of the Fantale magma chamber. This would be in agreement with scenarios for the development of the MER and other rifts involving dyke-induced faulting and a magmatic alteration of the direction of tectonic movement (e.g. GLOAGUEN & CASEY 2002, TENTLER 2005, KURZ et al. 2007, PAQUET et al. 2007).

We are interpreting the characteristic morphologies seen in the elevation profiles along the FFMS as representing different stages in the development of such a system: A monocline and a system of growing and joining tensile fractures, develop over a subsurface normal fault (similar to the model of GRANT & KATTENHORN 2004). Only when the fault face is connective to the fractures the growing vertical displacement occurs in the form of a vertical fault offset. Fault profiles with atypically tilted hanging walls and horizontal fissure growth without increasing vertical offsets could be explained by underlying upward-propagating magmatic dykes prohibiting the usual down-slide movement of the normal fault hanging wall.

5 Literaturverzeichnis

- ACOCELLA, V. & KORME, T., 2002: Holocene extension direction along the Main Ethiopian Rift, East Africa. *Terra Nova* **14**: 191- 197
- BOCCALETTI, M.; BONINI, M.; MAZZUOLI, R. & TRUA, T., 1999: Pliocene-Quaternary volcanism and faulting in the northern Main Ethiopian Rift (with two geological maps at scale 1:50,000). *Acta vulcanologica* **11** (1): 83- 97
- BUCHWITZ, M., 2007: Surface Deformation and Quaternary Structural Development of the Lake Beseka Basin, Ethiopia. Freiberg, Germany [diploma thesis, unpublished]
- CASEY, M.; EBINGER, C.; GLOAGUEN, R.; KEIR, D. & MOHAMED, F., 2006: Strain accommodation in transitional rifts: extension by dike intrusion and faulting in the Ethiopian rift magmatic segments. In: YIRGU, G., EBINGER, C.J. & MAGUIRE, P.K.H., eds., 2006: The Afar volcanic province within the East African Rift System. Geological Society, London, Special Publications **359**: 143- 163
- GLOAGUEN, R. & CASEY, M., 2002: Dike intrusion inferred from the morphology of induced faults in the Quaternary Magmatic Segments, Ethiopia. AGU Fall Meeting, San Francisco 10-15 Dec. 2002. *Eos Trans. AGU*, **83**(47), Fall Meet. Suppl., Abstract T22A-1123
- GRANT, J.V. & KATTENHORN, S.A., 2004: Evolution of vertical faults at an extensional plate boundary, southwest Iceland. *Journal of Structural Geology* **36**: 537- 557
- KURZ, T.; GLOAGUEN R.; EBINGER, C.; CASEY, M. & B. ABEBE, 2007: Deformation distribution and type in the Main Ethiopian Rift (MER); a remote sensing study. *J. Afr. Earth Sc.* **48**: 100- 114
- PAQUET, F.; DAUTEUIL, O.; HALLOT, E. & MOREAU, F., 2007: Tectonics and magma dynamics coupling in a dyke swarm of Iceland. *J. Struct. Geol.* **29**: 1477 – 1493.
- TENTLER, T., 2005: Propagation of brittle failure triggered by magma in Iceland. *Tectonophysics* **406**: 17 – 38.

Estimation of erosion with remote sensing data on a large scale – an approach for Tibet

MATHIAS LEIDIG¹ & RICHARD GLOAGUEN²

Zusammenfassung: Ziel dieser Studie ist es, eine Methode zu entwickeln, welche Fernerkundung mit RUSLE (Revised Soil Loss Equation) kombiniert um Erosion in einem großen Gebiet einschätzen zu können. Das untersuchte Territorium umfasst ganz Tibet, einschließlich des Himalayas und des westlichen Pamirs. Es handelt sich um ein tektonisch sehr aktives Gebiet, das eine große klimatische Bedeutung für die Region, sowie Asien aber auch im globalen Maßstab besitzt. Die komplexe Interaktion von Niederschlag, Bodenbeschaffenheit, Topographie, Vegetation und Kultivierung erschweren die Untersuchung Tibets mit Mitteln der Fernerkundung. Weitere Herausforderungen sind das riesige Gebiet mit seinen einzigartigen geomorphologischen Merkmalen und die kaum verfügbaren Langzeitmessungen klimatischer Größen wie zum Beispiel des Niederschlages. Neben der Flussprofilanalyse, welche eine geeignete Methode zur Einschätzung von Erosion in vielen Einzugsgebieten zu sein scheint, besteht die Notwendigkeit der Erosionsanalyse in größerem Maßstab über Einzugsgebietsgrenzen hinaus.

1 Introduction

The majority of studies dealing with climate and precipitation in southern Asia have excluded the Himalayan belt and Tibet due to the region's extreme topography where climatological patterns are complex, poorly known and because of the lack of adequate rain-gauge data (KANSAKAR et al., 2004). The coupling of crustal deformation and erosion results in the kinematics of mountain building. This fact can be seen in the relief that reflects the interplay between tectonics and erosion. Erosion influences tectonic processes by controlling boundary conditions at the Earth's surface through denudation and deposition. Consequently erosion depends on climate and with this on precipitation, especially in a region where monsoon is active. It has been shown, e.g. in numerical simulations, that relief is primarily controlled by climate and uplift rate and that mountain building is a complex cycle with different feedback mechanisms that link crustal deformation, denudation and climate. In most studies uniform climate and with this uniform precipitation is considered, which remains doubtful when examining a large area like entire Tibet. This approach is aimed at the estimation and (relative) calculation of erosion using SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) and Landsat data in combination with other different remote-sensing data obtained e.g. from the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) or the Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS). In contrast to former attempts e.g. with GIS (e.g. By RAGHUNATH, 2002 or ONORI et al., 2006) and ground based data this research focuses on calculations (using the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)) based on remote sensing data as consequence of the large (entire Tibet, and connected landscapes) and hardly accessible territory.

¹ Mathias Leidig, Remote Sensing Group, Institute for Geology, TU Bergakademie, B. von - Cottastr. 2, 09599 Freiberg, Germany; Corresponding Author Email : mathias.leidig@web.de

² Richard Gloaguen, Remote Sensing Group, Institute for Geology, TU Bergakademie, B. von - Cottastr. 2, 09599 Freiberg, Germany

2 Study area

The study area includes the Tibet Plateau with the Himalayas, the whole Tibet Autonomous Region, the main part of the Qinghai Tibet Plateau and a part of Pamirs. Tibet and the Himalayas are among a tectonically very active area, where faulting and rock uplift are responsible for a rugged topography and due to that a unique relief. It covers more than 1.20 million km² and has an average altitude of 4500m. The major river systems of Asia are sourced from Himalayan headwaters. Consequently this area has a major influence on the environment and climate, not only of the region and Asia but also on global scale.

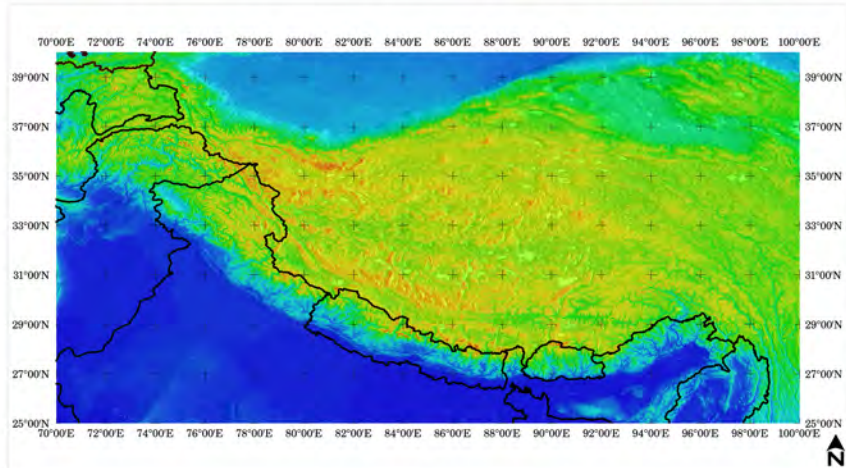


Figure 1: Map of study area including country borders

3 Motivation

There is a clear research gap in defining erosion based on interactions of the morphology with precipitation including the effects of extreme and complex topography across Tibet and the Himalayas. Large-scale patterns in precipitations are particularly not very useful but the local distribution of precipitation has major influence on the expected erosion for a defined area. This research aims to present a methodology that combines remote sensing with RUSLE to estimate the spatial distribution of erosion and sediment yield on a very large scale. It is important to understand precipitation and erosion across Tibet from a climatological perspective and also for socioeconomic reasons. Soil erosion sensitivity could be defined as a response of the regional environment to changes of impact factors like precipitation, soil texture, topography, vegetation and cultivation management. The complex interrelationship among all the components (natural factors and human activities), the large area with its unique geomorphological features and the lack of available long term data sets are an outstanding challenge for the investigation of the Tibet Plateau by modern remote sensing methods. Consequently, the need to quantify the amount of erosion and sediment delivery in a spatially distributed form has become essential (FERNANDEZ et al., 2003). Sediment yield

from e.g. a watershed is an integrated result of all erosion and transport processes occurring in the entire contributing area. The potential for soil erosion varies depending on the configurations like shape, topography, soil characteristics or local climate conditions and landuse as well as management practices. The identification of the spatially distributed sediment source allows us to think about possible implementations of special conservation efforts or may allow us a better understanding of topographic and orogenesis development.

4 Main purpose and methods

The main purpose of this project is to estimate and calculate the erosion based on interactions of the morphology with precipitation in a very large and active area.

Compared to former attempts, eg. in Turkey or Italy (AHMET et al. 2007, ONORI et al. 2006), this study focuses on an area where no long term precipitation data are available and where precipitation differs a lot due to the relief and monsoon vs. non-monsoon seasons. In most studies uniform climate and as consequence uniform precipitation is considered, which remains doubtful when examing a large area like whole Tibet, including the Himalayan.

Beside river profile analysis, which appears to be a suitable method for erosion estimation in many different regions in the world, there is the need of erosion estimation on larger scales than watershed basis. The understanding of the spatial structure in precipitation regime shape (seasonal variability) and size (magnitude) may help to understand and estimate the amount of erosion also in extreme physical environments where climatological patterns are complex and consequently hardly known. This is done by analysing the precipitation pattern. In addition to that the precipitation (amount and place) is analysed with respect to the elevation by many profiles among the study area. Two examples are shown in figures 3 and 4.

These figures show in a very simple way the different pattern in precipitation in different areas.

It allows us to distinguish where monsoon and where less or almost no monsoon is active and analyse the consequences for soil loss in these regions.

In general, precipitation displays small-scale variability that requires frequent, closely spaced observations for an adequate representation.

Such observations are not possible for whole globe or hardly accessible areas - when depending on surface based measurements.

Consequently One of these possibilities is to analyse the data sets based on the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM), which provide a calibration-based scheme for combining precipitation estimates from multiple satellites at fine scales. These data sets have a resolution of $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ and are available 3-hourly since 1998 observations depend on a variety of satellites to estimate precipitation on a global basis (HUFFMANN et al., 2006 and HONG et al., 2006).

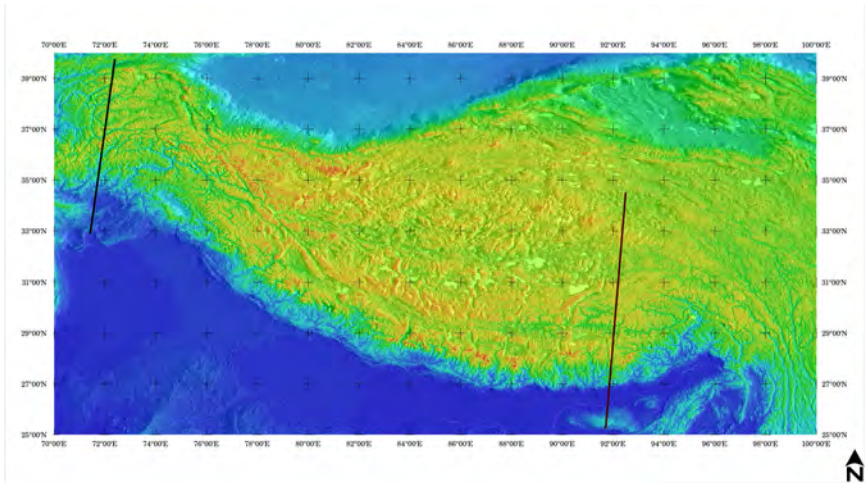


Figure 2: Study area with two example profiles.

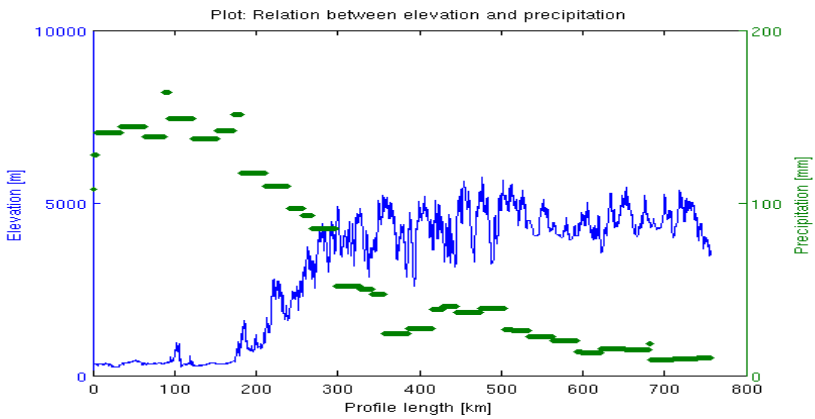


Figure 3: Example of profile through the study area (west side) showing the relation between elevation and precipitation in August.

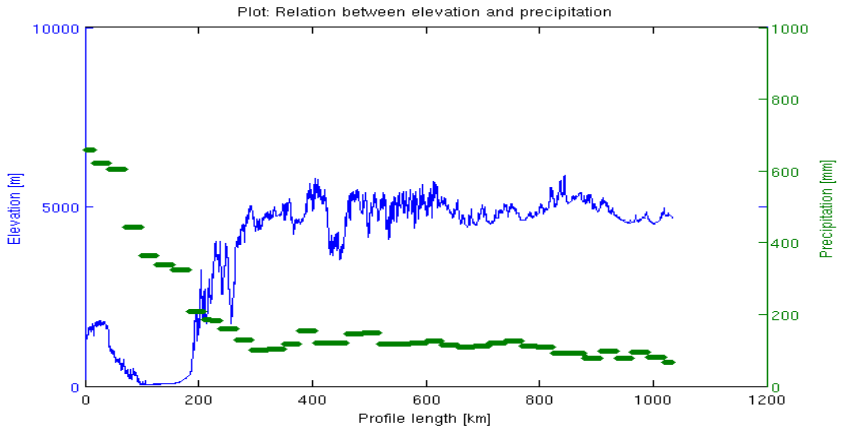


Figure 4: Example of profile through the study area (east side) showing the relation between elevation and precipitation in August.

One of the main aspects remains to find a formula that is able to describe the R-factor adequately. Usually R is connected to the maximum amount of rain falling within 30 consecutive minutes (RENARD et al., 1994). In other studies adoptions have been made by recalculating R based on ground measurements, which are not available in the needed detail and spatial resolution for the study area. This approach is aimed at the estimation and (relative) calculation of erosion using SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) and Landsat data in combination with other different remote-sensing data obtained e.g. from the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) or the Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) to solve the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). RUSLE is the most extensively used empirical soil erosion model. For the present it is state of art in soil erosion modelling. The Revised Soil Loss Equation like its predecessor the Universal Soil Loss Equation (USLE) is an erosion prediction model designed to predict the long-term average annual soil loss from specific field slopes in specific land management and land use systems (RAGHUNATH, 2002).

The equation for the Revised Universal Soil Loss can be written as:

$$A = R * K * L * S * C * P \quad (\text{eq.1}),$$

where A is the averaged quantity of soil erosion ($t * ha^{-1} * y^{-1}$), R the precipitation erosivity ($MJ * mm * ha^{-1} * h^{-1} * y^{-1}$), K is the soil erodibility factor ($MJ^{-1} * mm^{-1}$), LS is slope length and slope steepness factor, C and P are crop and erosion control practices factors. LS, C and P are dimensionless. One of the relevant characteristics and reason for applying the RUSLE model here is that all main factors, which influence soil processes, can be evaluated pretty accurately. In addition to that, it is possible to replace missing detailed data with reliable estimates. Further more it is applicable with surfaces of varying extension, from a small plot to large scales (IRVEM et al., 2007). Due to a population density of about $2.08 \text{ people} * km^{-2}$ the conservation practice factor P can be set as 1. The remaining equation for sensitivity of soil erosion (SSE) can be expressed as:

$$SSE = R * K * L * S * C$$

The whole procedure is summarized in Figure 5.

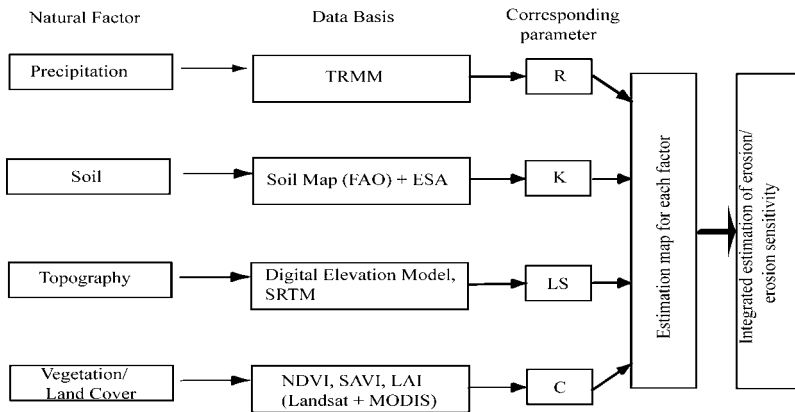


Figure 5: Soil erosion sensitivity/ calculation scheme of this study

5 References

- FERNANDEZ C., WU J.Q., MCCOOL D.K. & STÖCKLE, C.O., 2003: Estimating water erosion and sediment yield with GIS, RUSLE, and SEDD. *Journal of Soil and Water Conservation*, 58 (3): 128-136.
- HONG, Y., ADLER, R.F. & HUFFMANN, G.F., 2006: Evaluation of the potential of NASA multi-satellite precipitation analysis in global landslide hazard assessment, *Geophysical Research Letters*, 33 (L22402): 1-5.
- HUFFMANN G.J., ADLER R.F., BOLVIN D.T., GU G., NELKIN E.J., BOWMAN K.P., HONG Y., STOCKER E.F. & WOLF D.B., 2007: The trmm multisatellite precipitation analysis (tmpa): Quasi-global, multiyear, combined-sensor precipitation estimates at fine scales, *Journal of Hydrometeorology*, 8: 38-55.
- IRVEM A., TOPALOGLU F. & UYGUR V., 2007: Estimating spatial distribution of soil loss over seyhan river basin in Turkey, *Journal of Hydrology*, 336: 30-37.
- KANSAKAR, S. R., HANNAH, D. M., GERRARD, J. & REES GWYN, 2004: Spatial pattern in the precipitation regime of Nepal, *International Journal of Climatology*, 24: 1645-1659.
- ONORI F., BONIS P. & GRAUSO S., 2006: Soil erosion prediction at the basin scale using the revised universal soil loss equation (RUSLE) in a catchment of Sicily (southern Italy), Springer-Verlag, published online.
- RAGHUNATH, J., 11-13 SEPT. 2002: Potential erosion map for Bagmati Basin using GRASS GIS, *Proceedings of the Open Source GIS – GRASS users conference, Trento, Italy*.

Neotectonics development in North-Eastern Potwar (Pakistan): inferences from Remote Sensing and Geophysical Methods

FAISAL SHAHZAD¹, SYED AMER MEHMOOD¹ & RICHARD GLOAGUEN¹

Abstract: North-Eastern Potwar is a potential earthquake hazard zone in North Western Himalayan Fold and thrust belt in Pakistan. Neotectonic investigations are important in this area because important cities like Rawalpindi and Islamabad, the capital of Pakistan with higher earthquake hazard lies in this region. We used digital elevation models (DEM) from SRTM data, earthquake seismology and gravity methods for neotectonics investigation in this area. Tectonically, this study area is bounded by famous Jehlum strike slip fault on eastern side and Main boundary thrust (MBT) on the northern side. The other well known tectonic features in the area are Soan syncline, Khairi-Murat Fault, Soan backthrust, Riwar Fault, Shakar Parian anticline, Rawal anticline, Golra Fault and Bokra anticlinal structure. Drainage network of the area has been extracted from DEM in form of longitudinal elevation profiles and catchment area profiles. This drainage network contributes to Soan River which has played major role in forming present day landscape of Potwar area. Stream profile analysis is applied on 35 streams of this area and concavity and steepness values have been obtained. From Concavity and steepness, uplift rate maps have been prepared from further analysis of drainage network. Detailed seismotectonic map of the area is prepared using seismological data compiled from various resources. Tectonic information is obtained from previous compiled maps and Bougar gravity maps. Bougar gravity map is studied for understanding of tectonic features. Seismicity is disseminated in the area and there is no distinct pattern. Moment tensor solutions in the area shows strike slip component with thrust dominance. Our results from remote sensing and geophysical data support that the area is tectonically active with thrust and strike slip component. The results show high uplift on northern and eastern side while southern parts are comparatively less uplifted and show less seismicity.

1 Introduction

North-Eastern Potwar is a potential earthquake hazard zone in North Western Himalayan Fold and thrust belt in Pakistan. Neotectonics investigations are important in this area because important cities like Rawalpindi and Islamabad, the capital of Pakistan with higher earthquake hazard lies in this area. We used digital elevation models (DEM), earthquake seismology for neotectonics investigation in this area. We use Digital Elevation Models from SRTM (90 m resolution) (JARVIS et al. 2006) and Seismological database prepared from United States Geological Survey (USGS), Howard Moment Tensor solution (HMT) and local networks. The study area lies between 73° to 73°15' Longitude and 33°30' to 33°45' Latitude in Himalayas as shown in Figure 1a.

1) Remote Sensing Group, Institut für Geologie, TU Bergakademie Freiberg, Freiberg, 09599, Germany. geoquaidian@gmail.com

Tectonic setting of Potwar plateau is influenced by the northward subduction of the Indian plate beneath Eurasian plate. Seismological data of the area suggests that this area is under continuous subduction and thus confirms with the drainage analysis of the area.

In present study we analysed 35 streams which drains Soan River in the area. These tributaries are located at the start of this river which divides Potwar plateau into two broad regions i.e. Northern Potwar deformed zone and Southern Potwar Platform zone. Drainage networks of this area have been extracted from DEM. This extracted drainage network is in the form of stream longitudinal profiles and catchment area profiles. This drainage network contains some errors mainly due to interpolation. We use moving average smoothing algorithm to remove these errors. Stream power law for steady state conditions is used to calculate the steepness and concavity indices. Uplift rate map of the area is prepared using concavity and steepness values which shows the spatial variation of uplift rate. Changes in uplift rates provide a clue to understand neotectonics in the area.

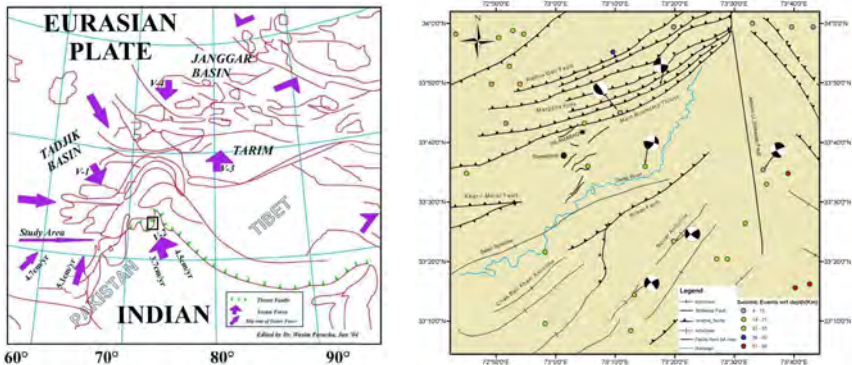


Fig. 1a: Tectonic map of the Himalayas and box shows the location of NE Potwar, modified from (Paracha 2004) and fig. 1b: shows detailed seismotectonic map of study area.

2 Tectonic setting of the area

The collision between Indian and Eurasian plates has formed Himalayas which is the world's highest and youngest mountain belt. The effect of thrusting started shifting towards Main Central Thrust (MCT) and Main Boundary Thrust (MBT) respectively as a result of this continuous orogeny. South of MBT, the Salt Range/Potwar Plateau (SR/PP) represents the Himalayan forelands fold and thrust belt in Pakistan. Potwar Plateau is seismically less active part of this region. It extends from Main Boundary Thrust (MBT) in the north to the Salt Range Thrust in the south, while Jehlum Fault and Kalabagh Fault mark its eastern and western boundaries respectively. Potwar Plateau is structurally very complex and in some cases surface features do not reflect the subsurface features (KHAN et al. 1986; BAKER et al. 1988; JADOON & FRISCH 1997; JADOON et al. 1997; MONALISA et al. 2002; JAN et al. 2005; MONALISA et al. 2007). This study is part of Northern Potwar deformed zone also referred to as North-Eastern Potwar

deformed zone. In addition to the regional faults the other well known regional tectonic features in this area are Soan Syncline, Khairi-Murat Fault, Soan Backthrust, Riwayat Fault, Shakar Parian Anticline, Rawal Lake Anticline, Golra Fault and Bokra anticlinal structure. These tectonic features are inferred from Bougar gravity anomaly map of the area and are shown in figure 1b (SETHI et al. 2005; SHAHZAD 2006).

3 Methods Applied

Remote sensing and Geophysical methods are important tools for understanding the neotectonics of an area. We have applied stream profile analysis on drainage network extracted from SRTM DEM and seismological study on earthquakes data compiled from various resources. These methods are described below in detail respectively.

Modern image processing technique helps us to extract drainage network of the area from DEM. Flow direction is dependent on upslope area and specific catchment area. Stream longitudinal profiles are identified and selected based upon a least cost path analysis which computes the downstream flow path. Individual streams are prepared in ASCII format for further processes. We use moving average filter for smoothening of the streams as they contain some error typically because of interpolation. Stream power law for steady state condition is used to draw area slope profile of all streams (HOWARD & KERBY 1983; HOWARD 1994). Trends are selected from each profile based upon the knickpoints information. The concavity and normalised steepness indices are calculated by regression analysis. These parameters help us to calculate the uplift rate in the area as shown in figure 2. We have prepared an uplift rate map and Hack index map of the area as shown in figure 3. These maps are prepared by using the calculated indices on different streams as a function of the respective spatial locations. This drainage network that contributes to Soan River has played major role in the formation of present day landscape of Potwar area (HACK 1973; SNYDER et al. 2000; WHIPPLE et al. 2000; KIRBY & WHIPPLE 2001; WAKABAYASHI & SAWYER 2001; SNYDER et al. 2003; BISHOP et al. 2005; WOBUS et al. 2006; SHAHZAD et al. 2007).

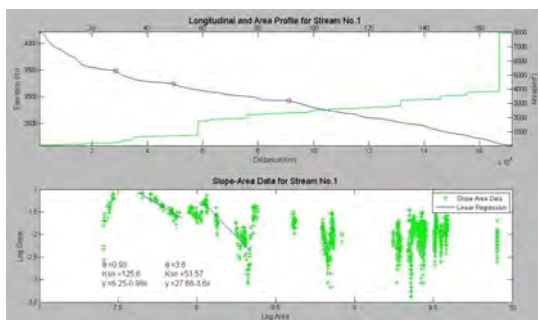


Fig. 2: Stream Profile analysis with selected knickpoints and calculated stream indices

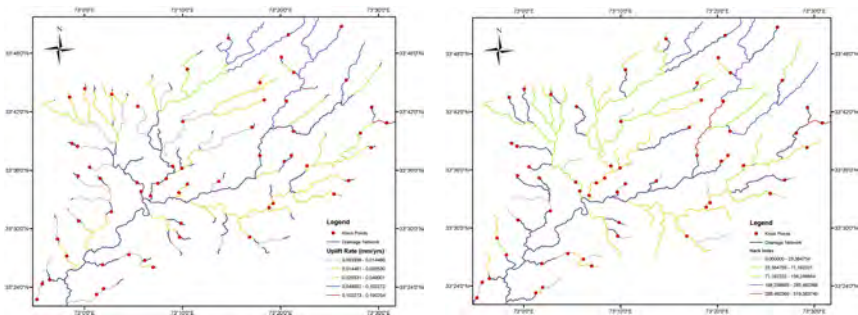


Fig. 3: Uplift rate map (a) and Hack Index map (b) of North Eastern Potwar

Seismology plays an important role in neotectonics studies. It helps us to understand the tectonic features and their behaviours (WIEMER 2001). Seismotectonic map of the area is shown in fig. 1b. Major tectonic features are taken from already compiled maps of the area and regional tectonic features are taken from reinterpreted Bougar anomaly map (SETHI et al. 2005). The reinterpretation of this map shows an extension in Bokra anticlinal structure as shown in the map (Fig. 1b). Moment tensor solutions which are compiled from different resources are also plotted in the map to understand the type of tectonic feature. This map also shows seismicity with respect to depth and helps to understand the depth of active region.

4 Results and discussion

Bedrock incision model provides important information to understand neotectonics of the area. We analyse stream profiles to calculate the concavity and steepness values of their different trends. These values help us not only to understand the individual stream morphology but also the spatial distribution of these values. We analysed 35 stream profiles of the area and observe concavity in the range of 0.05 to 3.85 and steepness in between 3.34 to 195.25. This suggests that variable tectonic changes are occurring in the area. The maps in fig. 3 help to interpret the topographic variation using uplift rates and slope variation using Hack index. Knickpoints are marked on each stream and they show change in hill slope or lithologies of the area. We observe high uplift rate in the north eastern and northern part as interpreted from uplift rate map and on the southern side of Rawalpindi the uplift rates are again higher.

Seismotectonic map of the area show that area is tectonically less active. We plotted 6 moment tensor solutions on the map and 5 shows thrust behaviour with dominant strike slip motion. One moment tensor solution is thrust dominant that confirms the activate nature of MBT. This map also shows that focal depth of the earthquake events is increasing southward and indicates different subsurface blocks i.e. basement decollement. Variable uplift rates and Hack index suggest that different blocks of both high and low uplift are present in this area. This suggests that variable deformation is disseminated in this region.

5 Conclusion

Geophysical methods show that the study regime is under active compressional tectonics. The steepness and concavity indices are good indicator to monitor the uplift rates in an ongoing deformed zone. Stream analysis shows that higher uplift rate and thus higher incision rates on the northern, north eastern side and south of Rawalpindi. Hack index map of the area shows higher values on the north eastern side that confirms high slope content on this side. This study can be improved by using high resolution DEMs/GPS data and other geological and geophysical means.

References

- BAKER, D. M.; LILLIE, R.J.; YEATS, R.S.; JOHNSON, G.D.; YOUSUF, M. & ZAMIN, A.S.H., 1988: Development of the Himalayan frontal thrust zone: Salt Range, Pakistan. *Geology*, **16**: 3-7.
- BISHOP, P.; HOEY, T.B.; JANSEN, J.D. & LEXARTZA ARTZA, I., 2005: Knickpoint recession rate and catchment area: The case of uplifted rivers in Eastern Scotland. *Earth Surface Processes and Landforms*, **30**(6): 767-778.
- HACK, J. T., 1973: Stream-profile analysis and stream-gradient index. U.S. Geological Survey Journal of Research, **1**(4): 421-429.
- HOWARD, A. D., 1994: A detachment-limited model of drainage basin evolution. *Water Resources Research*, **30**(7): 2261-2285.
- HOWARD, A. D. & KERBY, G., 1983: Channel changes in badlands. *Geological Society of America Bulletin*, **94**(6): 739-752.
- JADOON, I. A. K. & FRISCH, W., 1997: Hinterland-vergent tectonic wedge below the Riwat thrust, Himalayan foreland, Pakistan: Implications for hydrocarbon exploration. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, **81**(3): 438-448.
- JADOON, I. A. K.; FRISCH, W.; KEMAL, A. & JASWAL, T.M., 1997: Thrust geometries and kinematics in the Himalayan foreland (North Potwar deformed zone), North Pakistan. *Geologische Rundschau*, **86**(1): 120-131.
- JAN, M. Q.; GAETANI, M. & ZANCHI, A., 2005: 32nd International Geological Congress field trip (PR01): A traverse through Himalaya-Karakorum of Pakistan. *Episodes*, **28**(2): 124-125.
- JARVIS, A.; REUTER, H.I.; NELSON, A. & GUEVARA, E., 2006: Hole-filled seamless SRTM data V3, International Centre for Tropical Agriculture (CIAT), <http://srtm.csi.cgiar.org>.
- KHAN, M. A.; AHMED, R.; RAZA, H.A. & KEMAL, A., 1986: Geology of Petroleum in Kohat-Potwar depression, Pakistan. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, **70**(4): 396-414.
- KIRBY, E. & WHIPPLE, K., 2001: Quantifying differential rock-uplift rates via stream profile analysis. *Geology*, **29**(5): 415-418.
- MONALISA, KHWAJA A.A. & QAISER, M., 2002: Focal Mechanism Studies of Kohat and Northern Potwar Deformed Zone. *Geol. Bul. Univ. of Peshawar*, **35**: 85-95.
- MONALISA, KHWAJA A.A. & JAN, M.Q., 2007: Seismic hazard assessment of the NW Himalayan fold-and-thrust belt, Pakistan, using probabilistic approach. *Journal of Earthquake Engineering*, **11**(2): 257-301.
- PARACHA, W., 2004: Kohat Plateau with Reference to Himalayan Tectonic General Study. *CSEGE RECORDER*, April 2004.

- SETHI, K. W.; MUJTABA, G.; MAHMOOD, H.; KHAN, W.A. & ALAM, I., 2005: Delineation of regional tectonics of north eastern Potwar by using Gravitational Methods. Annual technical conference.
- SHAHZAD, F., 2006: Software development for Fault Plane Solution (FPS) and Isosiesmal Map. M.Sc. Thesis, Quaid-i-Azam University. Islamabad, Pakistan: 57.
- SHAHZAD, F.; MAHMOOD, S.A. & GLOAGUEN, R., 2007: Stream profile and neotectonics analysis of Hazara Kashmir Syntaxis using shuttle radar digital elevation data. 3rd IEEE conference on emerging technologies, Pakistan.
- SNYDER, N. P.; WHIPPLE, K.X.; TUCKER, G.E. & MERRITTS, D.J., 2000: Landscape response to tectonic forcing: DEM analysis of stream profiles in the Mendocino triple junction region, northern California. *Geol. Soc. Am. Bull.*
- SNYDER, N. P.; WHIPPLE, K.X.; TUCKER, G.E. & MERRITTS, D.J., 2003: Channel response to tectonic forcing: Field analysis of stream morphology and hydrology in the Mendocino triple junction region, northern California. *Geomorphology*, **53**(1-2): 97-127.
- WAKABAYASHI, J. & SAWYER, T. L., 2001: Stream incision, tectonics, uplift, and evolution of topography of the Sierra Nevada, California. *Journal of Geology*, **109**(5): 539-562.
- WHIPPLE, K. X.; HANCOCK, G. S. & ANDERSON, R. S., 2000: River incision into bedrock: Mechanics and relative efficacy of plucking, abrasion, and cavitation. *Bulletin of the Geological Society of America*, **112**(3): 490-503.
- WIEMER, S., 2001: A software package to analyze seismicity: ZMAP. *Seismological Research Letters*, **72**(3): 373-382.
- WOBUS, C.; WHIPPLE, K.; KIRBY, E.; SNYDER, N.; JOHNSON, J.; SPYROPOLOU, K.; CROSBY, B. T. & SHEEHAN, D., 2006: Tectonics from topography: Procedures, promise and pitfalls. *Tectonics, Climate and Landscape Evolution*, **398**: 55-74.

Objektverfolgung mit Partikel-Filtern

ROBERT SPANGENBERG¹ & RALF REULKE²

Zusammenfassung: Die Analyse des zeitlichen Ablaufs der Bewegung von Objekten im Abbildungsbereich einer Kamera (Objektverfolgung oder engl. object tracking) erlaubt die Ableitung von verkehrlich relevanten Parametern, aber auch Rückschlüsse für eine automatische Beschreibung einer Situation, z.B. für die automatische Erkennung von Gefahrensituationen. Mess- und Auswertefehler führen allerdings zu unvollständigen oder auch fehlerbehafteten Trajektorien der beobachteten Objekte. Die Nutzung von zusätzlichen Modellen oder A-priori-Kenntnissen auf der Basis von Bayes-Ansätzen oder Filtern kann die Fehlerrate verringern.

Die Arbeit befasst sich mit der gleichzeitigen Verfolgung einer unbekanntem Anzahl von Objekten auf der Basis von Partikel-Filtern. Dabei wird ein variabler und hochdimensionaler Zustandsraum vorausgesetzt. Datengrundlage sind Bilder von stationär angebrachten terrestrischen Kameras, deren innere und äußere Orientierung nicht bekannt sind.

1 Einleitung

Obwohl der praktische Einsatz von Videodetektionssystemen (VIDS) für die Verkehrslageerfassung fast schon ein Standard ist, bleibt die automatische flächenhafte Auswertung von Verkehrsszenen und die Ableitung von sinnvollen Verkehrskenngrößen eine Herausforderung. Wesentliche Ursachen dafür sind zum Beispiel drastische Helligkeitsänderungen im Bild bzw. in Bildfolgen, gegenseitige Verdeckungen, bzw. Verdeckungen durch Infrastruktur sowie Bewegungen von nicht überwachten Objekten, z.B. Bäumen, Sträuchern, Fahnen oder Schatten. Dabei zeigt es sich, dass neben der Objekterkennung der Objektverfolgung eine wesentliche Bedeutung zukommt. Einfache Ansätze, basierend z.B. auf Kalmanfiltern stoßen schnell an ihre Grenzen, da das Ensemble der in der Szene beobachteten Verkehrsobjekte vollständig zu betrachten ist.

Ausgehend von aktuellen Lösungsansätzen für die gleichzeitige Verfolgung von mehreren Objekten erweist sich der Reversible Jump MCMC-Filter am erfolgversprechendsten. Der Zustandsraum der verwendeten Bayes-Filter kann dabei eine variable Größe haben. Um die bekannten Probleme hinsichtlich der gegenseitigen Verdeckungen von Objekten auszuschließen, wird ein Interaktionsmodell in das Verfahren integriert. Zudem erlaubt das Bewegungsmodell die Erzeugung und das Löschen von Objekten. Die Wahrscheinlichkeit dafür wurde ortsabhängig gewählt.

Für die Bewertung von Verfolgungsalgorithmen werden eine Übersicht über die Verfahren sowie Parameter für die Bewertung dieser Verfahren gegeben. Darüber hinaus werden unterschiedliche annotierte Testszene verwendet, die einen unterschiedlichen Schwierigkeitsgrad aufweisen.

¹⁾ Robert Spangenberg, Ebelingstrasse 7, 10249 Berlin, E-mail: robert.spangenberg@gmx.de

²⁾ Ralf Reulke, Humboldt-Universität Berlin, Institut für Informatik, Computer Vision, Unter den Linden 6, 10099 Berlin, E-Mail: reulke@informatik.hu-berlin.de

Zum Vergleich werden zudem andere Verfolgungsalgorithmen herangezogen. In der Auswertung zeigen sich die Stärken des implementierten Algorithmus im Vergleich zu einem Standard-Kalmanfilter und zu einem einfachen, auf linearer Prädiktion beruhenden Filter.

Im folgenden Kapitel werden die Grundlagen der Objektverfolgung und -modellierung dargestellt. Dabei wird die Familie der Bayes-Filter vorgestellt, die den Kern vieler Objektverfolgungsalgorithmen bildet. Das dritte Kapitel gibt einen Überblick über aktuelle Lösungsansätze zur Verfolgung mehrerer Objekte mit einem Partikel-Filter. In diesem Zusammenhang werden unterschiedliche Varianten der Modellierung des Problems mit ihren Implikationen dargestellt. Ein Schwerpunkt liegt auf der Identifikation von Algorithmen, die keiner exponentiellen Komplexität in der Anzahl der verfolgten Objekte unterliegen aber dennoch robust sind. Im vierten Kapitel wird der eigene Ansatz und die Implementierung auf Basis eines für variable und hochdimensionale Zustandsräume geeigneten Partikel-Filters vorgestellt. Die durchgeführten Experimente und ihre Ergebnisse sind im fünften Kapitel aufgeführt. Die Arbeit schließt mit einer Zusammenfassung der erzielten Erkenntnisse und der Darstellung möglicher Verbesserungen und Erweiterungen.

2 Grundlagen der Objektmodellierung und Objektverfolgung

Die Objektmodellierung betrifft Modelle der verfolgten Objekte und eventuell Modelle der beobachteten Szene, wie zum Beispiel die Hintergrundmodellierung, bzw. -schätzung. Bedingt durch das Sensorrauschen, Objektverdeckungen und mangelhafte räumliche Auflösung sind die aus den Bildern gewonnenen Informationen potentiell fehlerbehaftet oder ungenau.

Um eine robuste und brauchbare Modellierung der Umwelt zu erreichen werden häufig wahrscheinlichkeitstheoretische Ansätze verwendet. Das hat gegenüber einer deterministischen Darstellung den Vorteil, dass mehrere Hypothesen parallel verfolgt werden können und auch Aussagen über die Unsicherheit des aktuellen Modells möglich sind. Gängige Modelle beruhen auf Markov-Ketten, Markovschen Zufallsfeldern und Bayes-Filtern, die die theoretische Grundlage für eine große Gruppe von wahrscheinlichkeitsbasierten Modellen bilden. Wichtige Unterklassen der Bayes-Filter sind die Partikel- und Markov-Chain-Monte-Carlo-Filter.

Markov-Ketten sind stochastische Prozesse, die der Markov-Eigenschaft genügen. Eine Markov-Kette ist eine Folge von Zufallsvariablen, wobei nur der Wert einer endlichen Menge von Vorgängern die betrachtete Verteilung beeinflusst. Markov-Ketten stellen die Basis für die Funktionsweise des Metropolis-Hastings-Algorithmus und der Markov-Chain-Monte-Carlo-Filter dar.

Mithilfe eines Bayes-Filters kann der Zustand $x_t \in X_t$ eines Prozesses zu einem Zeitpunkt t aus den Beobachtungen $y_{1:t} = (y_1, \dots, y_t)$ mit A-priori-Wissen geschätzt werden. Das entspricht damit der Regularisierung eines inkorrekt gestellten Problems. X_t ist dabei der Zustandsraum zum Zeitpunkt t , in dem der Prozess modelliert wird. Eine Beobachtung ergibt sich formal über die vom Zustand x_t abhängige Beobachtungsfunktion Y und eine äußere Störung oder einen Messfehler N_t :

$$y_t = Y(x_t) + N_t$$

Der interessierende Prozess bezieht sich hier auf die Verkehrsbeobachtung. Mithilfe von Kameraaufnahmen wird der Zustand der beobachteten Fahrzeuge über einen Zeitraum bestimmt. Das A-priori-Wissen ist durch Kenntnisse über zeitlich frühere Zustände des beobachteten Prozesses gegeben. Durch die Markov-Bedingung wird es möglich, die gesuchte Dichte rekursiv darzustellen. Initialisiert wird die Schätzung dabei durch $p(x_0)$, dem Priori-Wissen über den Zustand zum Zeitpunkt 0. Mit der initialen Schätzung wird eine rekursive Darstellung der interessierenden Wahrscheinlichkeitsdichte möglich.

In Abhängigkeit von der Wahl der Prozess- und Beobachtungsmodelle ergeben sich aus dem Bayes-Filter verschiedene Unterklassen, wie Kalman-Filter, Partikel-Filter und Markov-Chain-Monte-Carlo-Filter. Im Falle von Prozess- und Beobachtungsmodellen, die sich als Komposition von linearen Abbildungen und Gauß'schem Rauschen darstellen lassen, existiert mit dem Kalman-Filter eine analytische Darstellung der Bayes-Rekursion (vgl. SHALOM & FORTMANN). Bei nichtlinearen Modellen ist auch die lokale Linearisierung dieser Modelle über Taylor-Reihen möglich, was zu den Erweiterten Kalman-Filtern (Extended Kalman-Filter, EKF) führt.

Nichtparametrische Approximationsmethoden, wie beispielsweise Partikel-Filter, können auch eingesetzt werden, wenn das Problem nicht analytisch lösbar ist. Diese wurden in verschiedenen Bereichen parallel entwickelt und sind auch unter den Namen Sequential Monte-Carlo-Filter (SMC-Filter), Condensation-Algorithmus (vgl. ISARD & BLAKE) bzw. Bootstrap-Filter (vgl. GORDON & SALMOND) bekannt. Ebenfalls zu dieser Klasse gehören die Markov-Chain-Monte-Carlo-Filter (MCMC-Filter), die simulierte Markov-Ketten nutzen. Einen Überblick über Anwendungen von Bayes-Filtern in der Objektverfolgung geben z.B. SÄRKKÄ & TAMMINEN.

Die Grundidee der Partikel-Filter ist, die Wahrscheinlichkeitsdichte $p(x_t|y_{1:t})$ durch eine gewichtete Stichprobe S_t mit N Partikeln zu repräsentieren:

$$S_t = \left\{ \underbrace{\left(x_t^{(i)}, w_t^{(i)} \right)}_{\text{Partikel } i} \right\} \quad i = 1, \dots, N \quad \text{mit} \quad \sum_{i=1}^N w_t^{(i)}$$

Jeder Partikel besteht dabei aus 2 Teilen: einem Punkt im Zustandsraum und einem Gewicht, das diesem Punkt beigemessen wird. Bei einer fair gewichteten Stichprobe approximiert diese die Wahrscheinlichkeitsverteilung hinreichend gut. Die Bayes-Rekursion wird dabei folgendermaßen umgesetzt. Zum Zeitpunkt $t = 0$ wird der Filter mit einer Priori-Verteilung initialisiert. Für jeden weiteren Zeitpunkt gliedert sich der Algorithmus in 3 Teile. Zuerst werden aus der vorherigen Stichprobe S_{t-1} N Partikel entsprechend ihrer Gewichte mit Zurücklegen gezogen. Auf diese Partikel wird jeweils das Prozessmodell angewandt, und man erhält die A-priori-Verteilung. Diese wird anschließend mit der Likelihood gewichtet, und so entsteht die

$$p(x_t | y_{1:t}) = \eta \cdot p(y_t | x_t) \sum_{i=1}^N w_{t-1}^{(i)} \cdot p(x_t | x_{t-1}^{(i)})$$

neue gewichtete Stichprobe S_t . Damit ergibt sich eine Monte-Carlo Approximation.

Die Güte der Approximation hängt dabei unter anderem stark von der Anzahl der genutzten Partikel ab. Aus Effizienzgründen wird man allerdings immer bestrebt sein, deren Anzahl zu minimieren. Bei multimodalen Zielverteilungen kann allerdings eine große Anzahl an Partikeln nötig sein, um eine hinreichend gute Approximation zu erzielen.

3 Aktuelle Lösungsansätze

In Abbildung 1 ist eine Klassifikation von Partikel-Filtern dargestellt, wobei die Art der Darstellung mehrerer Objekte im Zustandsraum als Klassifizierungskriterium dient. Dabei existieren bislang drei Varianten. Die einfachste Möglichkeit ist, jedem Objekt einen Filter zuzuordnen. Zweitens ist es möglich, einen Filter zur Verfolgung der Objekte einzusetzen, der eine stark multimodale Wahrscheinlichkeitsdichte besitzt, wobei jeder Modus ein verfolgtes Objekt darstellt. Darüber hinaus ist auch die Darstellung durch einen Filter mit einem variablen Zustandsraum möglich, der aus der Verkettung der Zustände der verfolgten Objekte entsteht.



(a) ein Filter pro Objekt

- unabhängige Filter
- Joint Probabilistic Data Association Filters (JPDAF)
- Mean-Field-Monte-Carlo und Belief Propagation



(b) eine Gruppe pro Objekt

- Mixture-Partikel-Filter
- Subordinated Condensation



(c) Objekt als Teil des Zustandsraums

- Annealed-Partikel-Filter
- Reversible Jump Markov-Chain-Monte-Carlo-Filter

Abb. 1: Klassifikation von Partikel-Filtern nach der Art der Darstellung mehrerer Objekte

4 Ansatz und Implementation

Zunächst werden die Annahmen definiert, für die der Algorithmus entwickelt wurde. Dann wird die Bildverarbeitung geschildert. Es folgt die Erstellung des Skalierungsmodells und anschließend die Beschreibung des Algorithmus. Diese setzt sich aus der Definition der verwendeten Modelle und der effizienten Schätzung des sich ergebenden Gesamtmodells mit Hilfe eines RJMCMC-Filters zusammen.

Die Szene wird von einer stationären Farbkamera mit unbekannter innerer und äußerer Orientierung beobachtet. Die zu verfolgenden Objekte bewegen sich näherungsweise in einer Ebene. Sie verlassen und betreten die Szene an bestimmten Punkten, wo auch die Initialisierung neuer Objekte erfolgt. Die Verfolgung erfolgt aufgrund der Bewegung der Verkehrsobjekte und wird auch bei eventuellem kurzzeitigem Stillstand des Objekts fortgesetzt.

Die verwendete Bildvorverarbeitung basiert auf Differenzbildern, wobei durch die Anwendung von Schwellwerten auf das Differenzbild eine Binarisierung und Segmentierung erfolgt. Um Lücken innerhalb von Objekten zu füllen und Objekte deutlicher voneinander zu trennen, werden die erhaltenen Regionen mit morphologischen Operatoren bearbeitet. Zudem werden zu kleine Regionen und Regionen außerhalb des interessierenden Bereiches herausgefiltert. Die verbleibenden Hypothesen werden gelabelt. Der Ansatz ist in Abbildung 2 illustriert.

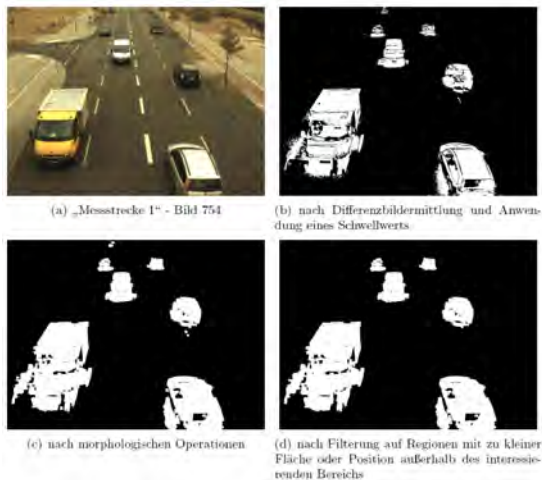


Abb. 2: Bildvorverarbeitung - Ermittlung der Regionen mit vorhandener Bewegung

Aufgrund der Schrägsicht ändert sich der Abstand der verfolgten Objekte zur Kamera während der Beobachtung. Dies äußert sich in einer starken Größenänderung der Bildobjekte im Bildraum und in Pseudobeschleunigungen. Es wurde ein Ansatz verwendet, der nur die Objekthypothesen aus der Bildverarbeitung benötigt, um ein Skalierungsmodell zur Schätzung der Größenänderung der beobachteten Objekte im Bildfeld abzuleiten. Auf Grundlage dieser Darstellung ist die Berechnung der erwarteten mittleren Objektgröße an jedem Punkt des Bildes möglich.

Die Verfolgung mehrerer Objekte wird im Folgenden mit einem Bayes-Filter mit variablem Zustandsraum vorgenommen, der durch Verkettung der Zustände der einzelnen verfolgten Objekte entsteht. Dazu erfolgt zuerst die Definition des Zustandsraums und anschließend des Prozessmodells und der Likelihood. In das Prozessmodell wird dabei ein Interaktionsmodell mit einbezogen. Abschließend wird die entstehende Monte-Carlo Approximation abgeleitet.

4.1 Zustandsmodellierung

Jedes Objekt wird im Bildraum verfolgt. Der Zustand eines Objekts wird als Tupel $(id; u; v; a; b; \phi; g_u; g_v) \in X_{obj}$ modelliert, wobei $u; v; a; b; \phi$ eine Ellipse an Position $u; v$ (in Pixeln) mit den Halbachsen $a; b$ (Längen in Pixeln) und Drehwinkel ϕ darstellt und $g_u; g_v$ die entsprechenden Geschwindigkeiten in Pixeln in $u; v$ -Richtung sind. Weiterhin hat jedes Objekt eine Identifikationsnummer (id). Da eine variable Anzahl von Objekten den Gesamtprozess bildet, dessen Zustand geschätzt werden soll, ergibt sich der Zustandsraum X als

$$X = \bigcup_{n=0}^{\infty} X_{obj}^n$$

d.h. als die Vereinigung der Zustandsräume mit 0; 1; 2; 3; ... Objekten.

4.2 Prozessmodell

Das Prozessmodell entsteht durch die Verknüpfung des Bewegungs- und Interaktionsmodells. Das Bewegungsmodell modelliert die Veränderung jedes der im gesamten Zustand enthaltenen Objekte in seiner Position und Ausrichtung, das Interaktionsmodell die Beziehungen zwischen den enthaltenen Objekten.

Interaktionsmodell: Um Fehler in der Objektverfolgung durch Okklusionen/Interaktionen zu minimieren, wird ein Interaktionsmodell mit in die Modellierung des Prozesses aufgenommen. Die Interaktion zwischen zu verfolgenden Objekten wird dabei, wie bei KHAN et al., unter Nutzung eines Markov'schen Zufallsfeldes modelliert, das für jeden Zeitpunkt ad-hoc konstruiert wird. Die Knoten im Graph stellen dabei einzelne Objekte zum Zeitpunkt t dar. Verbindungen zwischen ihnen existieren, falls ihre Positionen einen geringen Abstand aufweisen. Es wird ein paarweises Markov'sches Zufallsfeld angenommen. Wenn zwei Objekte durch eine Kante im Zufallsfeld verbunden sind, kann durch die Interaktionspotentiale das Wissen über ihr Interaktionsverhalten definiert werden. Existiert dagegen keine Kante zwischen zwei Knoten im Zufallsfeld, beeinflussen sich die Objekte nicht. Je näher sich die Objekte kommen und je stärker sie sich überlappen, umso stärker ist das Potential für eine Interaktion der beiden Objekte und desto unwahrscheinlicher ist dieser Zustand. Zugrunde liegt die Annahme, dass sich die Objekte in der Realität selten an derselben Position befinden und sich total überlappen. Konfigurationen dieser Art werden demnach als unwahrscheinlich angesehen und haben daher eine geringe Wahrscheinlichkeit, durch das Prozessmodell erzeugt zu werden.

Bewegungsmodell: Die Dynamik für die einzelnen Objekte $p(x_{i,t}, x_{i,t-1})$ wird entsprechend der Zustandsmodellierung als gleichförmige Bewegung angenommen. Die Geschwindigkeit wird zusätzlich entsprechend dem Skalierungsmodell angepasst, um die Pseudobeschleunigungen zu berücksichtigen. Die Veränderung der Größe der das Objekt umgebenden Ellipse wird durch das Skalierungsmodell gesteuert. Dies gilt allerdings nur für die Objekte, die weder gelöscht noch erzeugt werden. Für diese sind die Wahrscheinlichkeitsverteilungen $p_e(x_{i,t})$ und $p_l(x_{i,t-1})$ definiert. Es ergibt sich also je nach Art des Objekts:

$$p(x_{i,t} | x_{i,t-1}) = \begin{cases} p_b(x_{i,t} | x_{i,t-1}) & , \text{ wenn } x_{i,t} \neq \emptyset \wedge x_{i,t-1} \neq \emptyset \text{ (normale Bewegung)} \\ p_n(x_{i,t}) & , \text{ wenn } x_{i,t} \neq \emptyset \wedge x_{i,t-1} = \emptyset \text{ (neues Objekt)} \\ p_g(x_{i,t-1}) & , \text{ wenn } x_{i,t} = \emptyset \wedge x_{i,t-1} \neq \emptyset \text{ (neues Objekt)} \end{cases}$$

Diese A-priori-Wahrscheinlichkeiten für das Erzeugen und Löschen von Objekten sind in der Regel im Zentrum der Szene niedrig, während sie am Rand der Szene, an denen die Objekte die Szene verlassen bzw. betreten können, höher sind. Sie sind unter Nutzung von Abstandsmaßen definiert.

4.3 Likelihood

Die Likelihood ergibt sich als das Produkt der Likelihood für den Vordergrund $p(y_i^F | x_i)$ und der Likelihood für den Hintergrund $p(y_i^B | x_i)$

$$p(y_i | x_i) = p(y_i^F | x_i) \cdot p(y_i^B | x_i).$$

Die Likelihood für den Vordergrund ist dabei ein normalisiertes Produkt der Likelihoods der Objekte, die zusammen den Vordergrund bilden. Die Likelihood für den Hintergrund ergibt sich aus den Flächen, in denen Bewegung detektiert wurde, die aber nicht durch Objekte des Vordergrunds abgedeckt sind. Je größer diese Flächen sind, umso niedriger ist die Likelihood. Für ein Objekt ergibt sich die Likelihood aus dem Vergleich seines Farbhistogramms und seiner normierten Größe mit den beobachteten Merkmalen. Das A-priori-Wissen über die Änderung der Objektgrößen im Bild fließt also in die Berechnung der Likelihood ein.

4.4 Gesamtmodell

Im Gegensatz zur klassischen Approximation der Bayes-Filter durch Partikel-Filter erfolgt im Gesamtmodell die Einbeziehung eines Interaktionsmodells. Klassische Partikel-Filter scheitern allerdings an ihrer exponentiellen Komplexität in der Anzahl der verfolgten Objekte. Deswegen wird im Folgenden ein auf der Simulation von Markov-Ketten basierendes Verfahren zur Erzeugung der Stichproben eingesetzt, das auch in hochdimensionalen Zustandsräumen effektiv Stichproben zieht und in variablen Zustandsräumen durchführbar ist.

4.5 Interferenz mit Reversible-Jump-MCMC

Ziel der Inferenz mit Reversible Jump Markov-Chain-Monte-Carlo ist es, eine ergodische Markov-Kette im interessierenden variablen Zustandsraum zu simulieren, deren stationäre Verteilung gleich der gesuchten Zielverteilung ist. Dazu werden das Konzept der reversiblen Sprünge und der Metropolis-Hastings-Algorithmus eingesetzt, da diese Kombination die Anforderungen an die Simulation erfüllt.

Die Vorschlagsverteilung wird als Mischung verschiedener einfacher Vorschlagsverteilungen, die verschiedene Schrittartern charakterisieren, dargestellt (vgl. SMITH et. al. und ZHAO & NEVATIA). Die Kette startet dabei mit einer beliebigen Konfiguration und der Algorithmus wählt in jedem Schritt eine Schrittartern s aus der Menge der möglichen Schrittartern S mit der A-priori Wahrscheinlichkeit p_s aus und generiert mit Hilfe einer für diese Schrittartern spezifischen

Vorschlagsverteilung $q_s(x^*|x)$ einen potentiell neuen Zustand x^* aus dem aktuellen Zustand x der Kette. Die Menge der möglichen Schrittartern S besteht in der konkreten Implementation aus sechs Elementen:

- Hinzufügen eines Objekts,
- Löschen eines Objekts,
- Bewegen eines Objekts im Zustandsraum,
- Tausch der Positionen zweier Objekte und die
- Erstellung/Zerstörung von Korrespondenzen zwischen Objekten,

kurz $S = \{h; l; t; b; e; z\}$.

Hinzufügen und Löschen verändern dabei die Dimension des Zustands. Sie „springen“ zwischen den unterschiedlichen Dimensionen des Zustandsraums. Das Bewegen, der Tausch und die Korrespondenzänderungen lassen ihn konstant. Jeder Schritt s ist dabei reversibel, d.h. es existiert immer ein Schritt, der genau entgegengesetzt zu s wirken kann. Das Hinzufügen eines Objektes kann entgegengesetzt zum Löschen eines Objektes wirken, die Zerstörung entgegengesetzt zur Erstellung von Korrespondenzen und das Bewegen und der Tausch von Objekten sind zu sich selbst potentiell entgegengesetzt. Der Zustand x^* wird entsprechend der Metropolis-Hastings-Regel mit Wahrscheinlichkeit

$$\alpha_s = \min \left(1, \frac{P(\underline{x}^*) P_{\bar{s}} \cdot P_{\bar{s}}(\underline{x}^*, \underline{x})}{P(\underline{x}) P_s \cdot P_s(\underline{x}^*, \underline{x})} \right)$$

als neuer Zustand akzeptiert und zu S_t hinzugefügt. Ziel bei der Definition der Vorschlagsverteilungen ist es auch, aus der obigen Gleichung viel kürzen zu können, um die Berechnung effizient zu gestalten.

Vorschlagsverteilungen: Es wird nun beispielhaft die Vorschlagsverteilung für die Bewegung eines Objektes dargestellt. Das Bewegen eines Objektes ändert dessen Position im Zustandsraum, die Dimension des Gesamtzustandes und alle anderen Objekte im Zustand bleiben unverändert. Um den neuen Zustand x^* zu erzeugen, wird zuerst ein Objekt i unter den Objekten im Ausgangszustand x ausgewählt, das bewegt werden soll (jedes mit gleich hoher Wahrscheinlichkeit). Es werden 3 Verfahren eingesetzt, um die neue Position dieses Objekts zu bestimmen: Prädiktion mithilfe des Bewegungsmodells, Prädiktion mit anschließender Mean-Shift-Optimierung (vgl. MAGGIO & CAVALLARO) und Prädiktion unter Nutzung des besten Hypothese. Aus diesen wird jeweils ein Zustand zufällig gewählt.

Da die Vorschlagsverteilung reversibel zu sich selbst und symmetrisch ist, ergibt sich für die Akzeptanzwahrscheinlichkeit eines Objekts:

$$\alpha_b = \min \left(1, \frac{P(\underline{y}_i | \underline{x}^*) \prod_{i,j \in E} \Psi(\underline{x}_i^*, \underline{x}_j^*) P_b(\underline{x}_j^* | \underline{x}_{j,t-1}^{MAP})}{P(\underline{y}_i | \underline{x}) \prod_{i,j \in E} \Psi(\underline{x}_i, \underline{x}_j) P_b(\underline{x}_j | \underline{x}_{j,t-1}^{MAP})} \right).$$

Es müssen also nur die Likelihood und die betroffenen Teile der Interaktion und des Bewegungsmodells berechnet werden.

4.6 Berechnung des MAP-Zustands

Um den Maximum-A-posteriori-Zustand zu ermitteln, wird zuerst die Menge von Identifikationsnummern I^* ermittelt, die am häufigsten in der gelieferten Zustandsmenge S_t enthalten ist. Über alle Zustände $x \in S_t$ mit $I(x) = I^*$ wird ein Mittelwert für die einzelnen Objekte gebildet. Dieser Mittelwert muss nicht gewichtet werden, da die von der Markov-Kette generierten Zustände eine echte Stichprobe aus der gesuchten Verteilung bilden und so jeder Zustand das gleiche Gewicht besitzt. Der sich so ergebende Zustand ist der Maximum-A-Posteriori-Zustand x^{MAP}_t . Mit Hilfe dieses Zustands werden abschließend die Darstellungsmodelle der verfolgten Objekte angepasst, das Farbhistogramm und die geschätzte normalisierte Größe.

5 Experimente

Im folgenden Kapitel werden der entwickelte Algorithmus und Vergleichsalgorithmen anhand ihrer Leistung in bestimmten Szenarien bewertet. Die Bewertung wird so gestaltet, dass möglichst viele Anforderungen quantitativ beschrieben werden können. Kernanforderungen an einen Objektverfolgungsalgorithmus sind (in Anlehnung an CAVALLARO & ZILIANI und SMITH et al.):

1. Gute Verfolgung von Objekten, d.h. die korrekte Anzahl an verfolgten Objekten an den korrekten Positionen in jedem Zeitpunkt.
2. Geringe Verzögerung bei neu auftauchenden Objekten.
3. Konsistente Verfolgung von Objekten.
4. Immunität gegenüber Störungen, wie z.B. Okklusionen (Verdeckungen) oder Beleuchtungsänderungen, die z.B. zu Objektclustern oder Segmentierungen führen können (Robustheit).
5. Genaue Schätzung anwendungsabhängiger Parameter, wie z.B. Objektgeschwindigkeiten.
6. Echtzeitfähigkeit auch bei vielen verfolgten Objekten.

Da für die Mehrzahl der Sequenzen keine Referenzdaten vorlagen und eine klassische manuelle Annotation sehr aufwendig ist, wurde die Leistung mit dem in PINGALI & SEGEN vorgeschlagenen Verfahren ermittelt, welches deutlich weniger Referenzdaten erfordert. Der klassische Ansatz zur Evaluation von Objektverfolgungsalgorithmen mit Testsequenzen besteht in der Akquisition von Referenzpositionen (und evtl. auch Umrissen) für jedes Objekt in jedem Bild dieser Sequenz (vgl. SMITH et al.). Trajektorien werden demnach als Folge von Positionen dargestellt. Demgegenüber stellt sich die ereignisbasierte Evaluation von Trajektorien als Folge von Ereignissen dar. Ereignisse können dabei das Überschreiten bestimmter Linien (optischer Schleifen) oder auch das Betreten oder Verlassen von Regionen sein und werden je nach Anwendungsfall definiert. Ein Ereignis $\varepsilon = (e; p; t)$ besteht dabei aus einer Id e für das ausgelöste Ereignis, sowie einer Position p und einem Zeitpunkt t , an dem es ausgelöst wurde. Eine Trajektorie τ_i wird als Folge von Ereignissen dargestellt

$$\tau_i = \left((e_1^i, p_1^i, t_1^i), \dots, (e_k^i, p_k^i, t_k^i) \right)$$

Die Länge der Trajektorie/Ereignisfolge wird dabei als Ordnung bezeichnet. Damit sind trotz einer deutlich geringeren Menge an Annotationsdaten Aussagen über die Positionsfehler, Fehler bei der erkannten Anzahl von Objekten in der Szene an einem Zeitpunkt (Kardinalitätsfehler) möglich. Ebenso kann die Kontinuität der Verfolgung über die Detektion von Ereignisfolgen bewertet werden. Je besser Ereignisfolgen hoher Ordnung detektiert werden, desto besser ist die Kontinuität. Teilereignisfolgen, die im Verhältnis zum Durchschnitt der Teilereignisfolgen gleicher Ordnung hohe Fehler aufweisen, können leicht ermittelt werden. So können Problemfälle leicht identifiziert werden.

Es wurde eine Vielzahl von Untersuchungen in realen und simulierten Szenen durchgeführt. Im Folgenden sollen die Ergebnisse der Untersuchungen an der Messstrecke des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) in Berlin-Adlershof vorgestellt werden. Die Szene wurde von einer Messbrücke, relativ flach über der Straße aufgenommen. Dementsprechend kommt es zu starken dynamischen Okklusionen zwischen den Fahrzeugen. Weiterhin bewirkt der deutlich sichtbare Schatten eine Verschmelzung von Fahrzeugen im Rahmen der Bildverarbeitung. Durch den flachen Aufnahmewinkel unterliegen die Fahrzeuge einer starken Skalierung. Der Algorithmus wird mit einem einfachen linearen Tracking und einem auf unabhängigen Kalman-Filtern basierendem Ansatz verglichen.

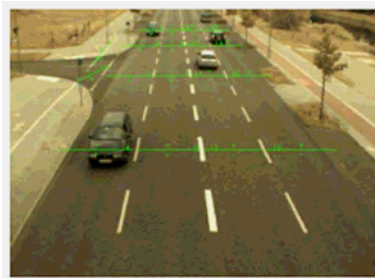


Abb. 3: Beispielbild aus den Testszenen mit Ereignisdetektoren

Visueller Eindruck: Der Algorithmus zeigt insgesamt eine sehr gute Verfolgung. Probleme entstehen vor allem durch dynamische Okklusionen. Auch die Auflösung von Gruppierungen ist problematisch, während die Gruppierung von Objekten, die getrennt initialisiert wurden wenig Fehler verursacht. Die anderen Algorithmen zeigen eine durchschnittliche Leistung. Sie werden durch alle Arten von Gruppierung negativ beeinflusst und neigen zum Teil zur Fusion der Trajektorien von verschiedenen Objekten. Dies tritt beispielsweise auf, wenn ein Objekt gerade die Szene verlässt und ein anderes sie betritt.

Metriken: Die Kardinalitätsfehler des Partikel-Filters sind leicht höher als die des einfachen linearen Trackings (als X_{yab} bezeichnet, $\approx 0,180$ vs. $\approx 0,166$) und beide kommen der Referenzanzahl schon sehr nahe. Der Kalman-Filter hat sehr viel höhere Fehlerraten ($\approx 0,687$), da er einige Objekte nicht initialisieren kann. Die Positionsfehler sind für den Partikel-Filter etwas höher, als das einfache lineare Tracking, der Kalman-Filter folgt mit demselben Abstand

(Abbildung 4, in Zahlen $\approx 12.4\text{px}$, Kalman $\approx 14.6\text{px}$, Xyab $\approx 10.8\text{px}$). Bei der Detektion von Ereignisfolgen ergeben sich deutlich bessere Werte für den Partikel-Filter (Abbildung 4).

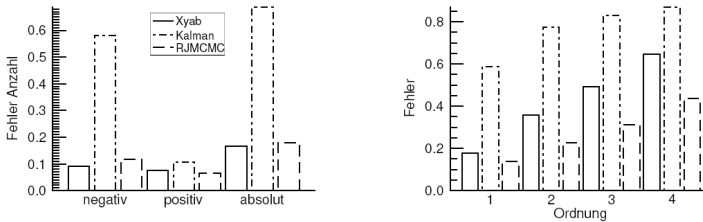


Abb. 4: Positions- und Ereignisfehler bei Szene Messstrecke

Die Fehlerraten sind bei allen Ordnungen geringer und steigen im Gegensatz zu den beiden anderen Algorithmen nicht so stark an. Von diesen ist dabei der einfachere Algorithmus besser in der Lage, die Objekte länger zu verfolgen. Damit wird auch bei dieser längsten Szene der deutliche Vorteil in der kontinuierlichen Verfolgung der Objekte sichtbar, den der Partikel-Filter gegenüber den beiden anderen Verfahren besitzt.

6 Auswertung und Ausblick

6.1 Auswertung

Für einen einsatzfähigen Algorithmus zur Verfolgung einer unbekannt Anzahl von Objekten gibt es zwei grundlegende und eventuell gegensätzliche Anforderungen: Robustheit und Effizienz. Diese Arbeit beschäftigte sich mit der Identifikation und Implementation von einem Ansatz, der die nötige Robustheit zeigt und auch bei vielen verfolgten Objekten das Potential besitzt, in einer effizienten Implementation echtzeitfähig zu sein. Insbesondere sollte die Laufzeit des Algorithmus nicht exponentiell von der Anzahl der verfolgten Objekte abhängen. Der im Rahmen dieser Arbeit gewählte Ansatz eines Reversible Jump Markov-Chain-Monte-Carlo-Filters zeigte dabei in den meisten Fällen sehr gute Ergebnisse in der Objektverfolgung. Die Verschmelzung von zuvor getrennten Objekten durch die Bildverarbeitung stellt den Algorithmus vor nur geringe Probleme und die Kontinuität der Objektverfolgung ist sehr gut. Dies ist unter anderem auch der Einbeziehung des Mean-Shift-Algorithmus zur lokalen Optimierung der Objektpositionen zu verdanken. Im Ergebnis wird in den Testszenen aus dem Bereich der Fahrzeugbeobachtung die deutliche Mehrheit aller Objekte durchgängig verfolgt.

6.2 Ausblick

Im Folgenden sollen Verbesserungsvorschläge und Erweiterungsmöglichkeiten zur Milderung der geschilderten Probleme bei der Robustheit und zur Effizienzsteigerung mit dem Ziel der Echtzeitfähigkeit dargestellt werden.

Die Einbeziehung weiterer Merkmale wie Gradientenhistogramme oder charakteristische Punkte und eine objektspezifische Wichtung aller Merkmale könnten Probleme, die sich aus der zu

großen Ähnlichkeit von verfolgten Objekten im Merkmalsraum ergeben, abschwächen. Ebenso ist eine Erweiterung des Mean-Shift-Algorithmus denkbar, die nicht nur die Ähnlichkeit zu einem Objekthistogramm maximiert, sondern gleichzeitig auch die Verschiedenheit zu dem Histogramm eines geschätzten Hintergrunds. Eine modellbasierte Hypothesengenerierung ist in Szenen mit gleichartigen Objekten (z.B. Fußgänger) denkbar. Dies stellt eine Abkehr vom traditionellen Ansatz der Hypothesengenerierung mit Hilfe von Hintergrundsabstraktion dar. Die modellbasierte Hypothesengenerierung sollte jedoch gerade in schwierigen Situationen deutlich überlegen sein. In Szenen mit einer zu großen Diversität der beobachteten Objekte haben modellbasierte Verfahren höchstwahrscheinlich große Probleme.

Für eine perfekte Objektverfolgung wird man jedoch auch ein deutlich vollständigeres Modell der betrachteten Szene benötigen. Dies schließt eine bessere Modellierung der räumlichen Gegebenheiten der Szene und eine größere Informationsdichte über die Geschehnisse in ihr ein. Das kann durch die Einbeziehung weiterer Sensoren oder durch die Fusion der Objektverfolgungsergebnisse mehrerer Kameras möglich werden.

7 Literaturverzeichnis

- BAR-SHALOM, Y. & FORTMANN, T.E., 1987: Tracking and Data Association. Academic Press, Boston.
- CAVALLARO, A. & ZILIANI, F., 2005: Characterisation of tracking performance. In Proc. of Workshop on Image Analysis For Multimedia Interactive Services (WIAMIS), Montreux, Switzerland, 13-15 April 2005.
- ISARD, M. & BLAKE, A., 1998: Condensation - conditional density propagation for visual tracking. *International Journal of Computer Vision*, 29(1):5-28, 1998.
- GORDON, N.J.; SALMOND, D.J. & SMITH, A.F.M., 1993: Novel approach to nonlinear/non-gaussian bayesian state estimation. *Radar and Signal Processing, IEE Proceedings F*, 140(2):107-113, Apr 1993.
- SMITH, K.; GATICA-PEREZ, D.; ODOBEZ, J.-M. & BA, S., 2005: Evaluating multi-object tracking. In Proc. IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition, Workshop on Empirical Evaluation Methods in Computer Vision (CVPREEMCV), San Diego, Jun. 2005.
- SMITH, K.; GATICA-PEREZ, D.; ODOBEZ, J.-M. & BA, S., 2005: Using particles to track varying numbers of interacting people. In: CVPR 2005 [10], 962-969.
- SÄRKKÄ, S.; TAMMINEN, T.; VEHTARI, A. & LAMPINEN, J., 2004: Probabilistic methods in multiple target tracking - review and bibliography. Technical Report Published as technical report B36, Helsinki University of Technology. Laboratory of Computational Engineering.
- KHAN, Z.; BALCH, T. & DELLAERT, F., 2003: An MCMC-based particle filter for tracking multiple interacting targets, URL citeseer.ist.psu.edu/khan03mcmcbased.html.
- PINGALI, S. & SEGEN, J., 1996: Performance evaluation of people tracking systems. In 3rd Workshop on Applications of Computer Vision (WACV'96), 1996.
- ZHAO, T. & NEVATIA, R., 2004: Tracking multiple humans in crowded environment. In CVPR (2), 406-413.
- E. MAGGIO, E. & CAVALLARO, A., 2005: Hybrid particle filter and mean shift tracker with adaptive transition model. In Proc. of IEEE Signal Processing Society International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP), Philadelphia, PA, USA, 19-23 March 2005.

Landschaftsökologische Modellierung und automatisierte Erfassung von Landschaftselementen für das Monitoring und die Bewertung einer nachhaltigen Kulturlandschaft

ANDREAS VÖLKER¹ & ANDREAS MÜTERTHIES²

Zusammenfassung: Der vorliegende Artikel versteht sich als operationeller Impuls für das Kulturlandschaftsmonitoring. Es werden bestehende Modelle der automatisierten Bildverarbeitung um landschaftsökologische Parameter erweitert, die eine detaillierte Definition, Abgrenzung und Bewertung von Landschaftselementen ermöglichen. Die Umsetzung der Modellierung erfolgt in einer Prozesskette am Beispiel von Hecken, die objektbasiert extrahiert werden. Die Klassifikation wird in einem unabhängigen Prozessschritt anhand einer texturbasierten Plausibilitätsprüfung verifiziert. Die Verknüpfung von Fernerkundung und Geoinformatik mit einem landschaftsökologischen Definitions- und Bewertungsmodell bietet eine effiziente und reproduzierbare Methode zur bildanalytischen Automatisierung der Landschaftsinventar-Erfassung und unterstützt somit Schutz, Erhaltung, Monitoring und nachhaltige Entwicklung strukturreicher Kulturlandschaften.

1 Einführung

Der Mensch hat in Europa flächendeckend Natur und Wildnis kulturell überprägt und das Gesicht der Landschaft grundlegend verändert. Neben ausgeräumten Landschaften mit hochintensiver Agrarnutzung hat sich über Jahrtausende in einem komplexen Wechselspiel zwischen anthropogenen und natürlichen Einflüssen auch ein in seiner Eigenart charakteristisches und einzigartiges Kulturlandschaftsbild mit z. T. hoher Biodiversität ausgebildet. Heute stellen der Schutz naturnaher Landschaften und vor allem auch die Bewahrung kulturell geformter Landschaften für künftige Generationen im Rahmen einer nachhaltigen Entwicklung eine zentrale Zukunftsaufgabe dar, die eine gezielte Erforschung und Definition der Ziele und Rahmenbedingungen einer ökologischen, ökonomischen und sozialverträglichen Nutzung der Kulturlandschaft erfordern. Das hier beschriebene Kooperationsprojekt zwischen dem Institut für Landschaftsökologie (Universität Münster) und der Firma EFTAS Fernerkundung Technologietransfer GmbH (Münster), das an der Schnittstelle von Landschaftsökologie, Fernerkundung und Geoinformatik angesiedelt ist, kann einen entscheidenden Beitrag zur Gestaltung dieser Zukunftsaufgabe leisten, in dem es operationelle Methoden für Erfassung, Analyse, Monitoring und Management der Kulturlandschaft in den Dienst einer nachhaltigen Entwicklung stellt. Eingebunden in ein Monitoringsystem ermöglicht ein automatisiertes Bildanalyseverfahren eine weitestgehend standardisierte, objektive Methode zur Fortführung naturschutzfachlicher Kataster.

¹ Institut für Landschaftsökologie (ILÖK), Universität Münster, Robert-Koch-Str. 26, 48149 Münster, avoelker@uni-muenster.de

² EFTAS Fernerkundung Technologietransfer GmbH, Oststraße 2-18, 48145 Münster, andreas.muetherthies@eftas.com

2 Anwendungsfelder

2.1 Europäisches Umweltmonitoring

Mit dem aus der FFH-Richtlinie und der Vogelschutzrichtlinie erwachsenen Schutzgebiets-Netzwerk Natura 2000 sind erstmals Monitoring, Berichtspflicht und Erfolgskontrolle einer nachhaltigen Landschaftsentwicklung rechtlich fixiert. Dieses gibt den Akteuren des Kulturlandschaftsmonitorings den Auftrag, Landschaften objektiv, transparent und standardisiert zu erfassen, zu bewerten und zu analysieren, um die Vorgabe eines großflächigen Lebensraum- und Artenschutzes und des Aufbaus eines grenzüberschreitenden Schutzgebietssystems umzusetzen (LANG 2002). Aus diesem allgemeinen Auftrag leiten sich für das hier beschriebene Projekt die folgenden Fragestellungen ab:

- Wie können Methoden aus Fernerkundung und Bildanalyse zu einem objektiven, transparenten und standardisierten Monitoring einer nachhaltigen Kulturlandschaftsentwicklung beitragen?
- Wie ist dieses Monitoringverfahren operationell einsetzbar, d. h. wie können Landschaftscharakteristika großflächig anhand übertragbarer (teil-) automatisierter Verfahren erfasst, bewertet und analysiert werden?

2.2 EU-Agrarsubventions-Kontrollen

Ein Anwendungsfeld aus der Agrarverwaltung für die hier zu entwickelnde Methode stellen die EU-Agrar-Subventionskontrollen im Rahmen des sog. Integrierten Verwaltungs- und Kontrollsystems (InVeKoS) dar: Auf Basis der Verordnung (EG) Nr. 1782/2003 wurden ab dem 01.01.2005 die flächenbezogenen Beihilfen für die Landwirte in Direktzahlungen im Rahmen von Betriebsprämien umgewandelt. Die Verordnung schreibt den Betrieben als Grundlage für die Gewährung von Subventionen sog. anderweitige Verpflichtungen (Cross Compliances) vor, die u. a. Regelungen zur Erhaltung von Agrarflächen in einem guten landwirtschaftlichen und ökologischen Zustand inkl. Bodenschutzbestimmungen und einem Beseitigungsverbot für bestimmte Landschaftselemente beinhalten. Das Antragsverfahren ist an eine jährlich aktuelle Verstandortung gebunden, so dass im Rahmen von InVeKoS die Agrarverwaltungen vor der Aufgabe stehen, Geodaten über das Landschaftsinventar ständig aktualisieren und in weiten Teilen die Neuerfassung organisieren zu müssen (NÖLLE & STREIT 2002). Die Verstandortung von landwirtschaftlichen Schlagflächen ist laut EG-Verordnung Nr. 1593/2000 mit Geoinformationssystemen (GIS) zu realisieren und vorzugsweise mit Luft- und Satellitenbildern zu ergänzen. Die Koppelung der Subventionszahlungen an die Nichtbeseitigung von Landschaftselementen, die neben Grundelementen (u. a. Hecken, Baumreihen, Einzelbäume) um Objekte mit besonderer regionaler Bedeutung ergänzt werden können (z. B. Lesesteinwälle), lässt auf einen positiven Einfluss im Sinne des Landschaftsschutzes hoffen.

3 Methoden für die Modellierung und Erfassung charakteristischer Kulturlandschaftselemente

3.1 Untersuchungsgebiet & Datengrundlage

Für das Kooperationsprojekt wurden CIR-Orthophotos aus dem Jahr 2005 mit einer geometrischen Auflösung von 1 m/Pixel sowie zum Zeitpunkt der Aufnahme aktuellen Feldblockdaten (siehe Kap. 3.5) als Vektordaten vom Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt- und Verbraucherschutz Mecklenburg Vorpommern bereitgestellt. Das derzeitige Testgebiet mit einer Fläche von 16 km² und einer Kantenlänge von 4 km liegt im Nordostmecklenburgischen Flachland zwischen den Ortschaften Marlow und Semlow in der Niederung der Recknitz.

3.2 Wissensmodellierung in der automatisierten Bildanalyse

GUINDON (1997) charakterisiert Systeme zum Bildverstehen und zur Objekterkennung neben weiteren Merkmalen (Objektbasierung, Segmentierung, Multiskalarität, Teilmengenklassifikation, Mehrkanaligkeit) vor allem durch wissensbasiertes Vorgehen und Einbeziehen von Vorwissen. Ziele des automatisierten Bildverstehens sind demnach u. a. die Entwicklung neuer Modellierungsansätze und die Unterstützung bei der manuellen Interpretation. SESTER (1995) definiert Objekterkennung als die Suche nach einer Zuordnung zwischen Bilddaten und einem zugehörigen Modell und zählt strukturelles Wissen über das Objekt und kontextuelles Wissen über die jeweilige Bildszene als bedeutend für die automatische Bildanalyse auf. Als Ideal für die Modellierung von Geoobjekten formuliert HEIPKE (2004) eine objektorientierte Modellierung, topologische Datenstrukturen und die Verwaltung von 3D-Objekten, die sich durch mehrfache Repräsentationen in der Zeit- und Skalenebenen verändern können. BALSAVIAS (2004) beschreibt für eine präzise Modellierung das Einbeziehen von bisher kaum genutzten Zusatzinformationen (z. B. Vorwissen, Modelle und Regelwerke) als essentiell für eine erfolgreiche Objektextraktion.

TÖNJES (1999) unterteilt sein Modell für die wissensbasierte Analyse von Landschaftsszenen in eine Real-Ebene, die eine allgemeingültige Beschreibung der Objekte enthält, eine Bild-Ebene, in der die Eigenschaften der Sensoren und des Bildmaterials in Bezug auf die Zielobjekte definiert werden, eine Geometrie-/Material-Ebene, die Form- und Oberflächeneigenschaften der Geoobjekte beschreibt, und eine GIS-Ebene für die Integration von Vorwissen (TÖNJES 1999). Die Ebenenmodellierung von TÖNJES greifen BAUMGARTNER (2003) für die Extraktion von Straßen und BUTENUTH (2004) für die Detektion von Schlaggrenzen auf.

3.3 Kulturlandschaftsmodellierung mit landschaftsökologischen Parametern

Das vorliegende Konzept für die Modellierung der Kulturlandschaft als Basis für eine automatisierte Erfassung von Landschaftselementen erweitert das Modell von TÖNJES (1999) um die Ebene ‚Landschaftsökologie‘ (LÖK) als fachspezifische Wissensbasis, für die eine Untergliederung in zwei thematische Unterebenen durchgeführt wird, sowie um die Ebene ‚Cross Compliance‘ (CC) (siehe Abb. 1). Die Aufnahme landschaftsökologischer Parameter in Form einer Modellierungsebene begründet sich in der fachspezifischen Aufgabe, Definitionen als Bildanalysewissen bereit zu stellen. Die Ebene Geometrie und Material leitet sich direkt aus der LÖK-Ebene I unter dem Aspekt des Umweltmonitorings ab, da erst anhand der ökologischen

Abgrenzung die Objekte (und somit die Materialien und Geometrien) festgelegt werden, die als Ziel einer Objekterkennung und Bildanalyse gelten. Besonders deutlich wird dies, wenn für die Bildanalyse nicht nur einheitliche Objekte als Ziel beschrieben werden, sondern Objekte, die ihre Identität in der realen Ebene erst aus der Zusammensetzung mehrerer Oberflächen gewinnen. Ein

gutes Beispiel hierfür sind Sölle (Toteislöcher), die für Mecklenburg-Vorpommern als Landschaftselemente von hoher ökologischer Bedeutung sind (siehe Kap. 6) und geomorphologisch runde oder ovale Senken darstellen, die häufig wassergefüllt (ggf. nur saisonal) und z. T. von Gebüsch umstanden sind. Erst die ökologische Abgrenzung von der restlichen Agrarlandschaft legt hier die Grundlage für die zielführende Definition der weiteren Ebenen.

Nachfolgend erfolgt exemplarisch die Definition der Ebenen LÖK und CC am Beispiel der „Hecke“ aufgrund ihrer anthropogenen Entstehung und ihrer Bedeutung als hochwertige, vernetzende ökologische Insel im Biotopverbund (MÜLLER 1990).

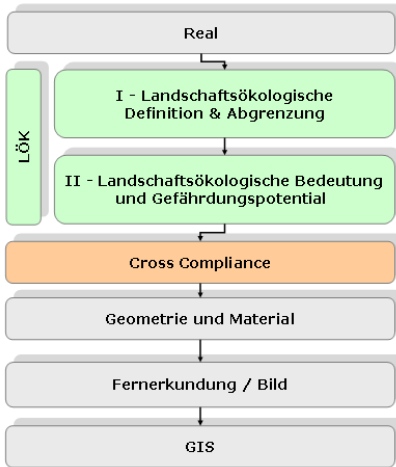


Abbildung 1: Definitionsebenen für die Modellierung von Kulturlandschaftselementen

In der Modellebene LÖK I, 'Landschaftsökologische Definition und Abgrenzung' (siehe Abb. 1) werden die naturschutzfachlichen und ökologischen Begrenzungen der Objekte definiert sowie ihre Diskriminierungskriterien zu Nachbarklassen festgelegt. Die ökologische Definition bildet die Grundlage für die Definitionen der weiteren Ebenen. Für die Hecke bedeutet dies eine Gliederung in Zentrum, Mantel und Saum. Das Zentrum besteht aus landschaftsprägenden Baum- und Straucharten (RÖSER 1988). Für die Unterscheidung von Windschutzpflanzungen, Alleen, Baumreihen etc. sind Artenzusammensetzung und Aufbau der Hecke von großer Bedeutung (LENSCHOW 2001).

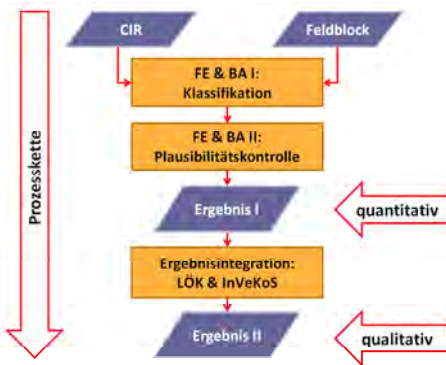
Die Modellebene LÖK II, 'Landschaftsökologische Bedeutung und Gefährdungspotential' (siehe Abb. 1) stellt den Bezug der zu extrahierenden Objekte zu ihrer ökologischen Wertigkeit, mit dem folgenden Zusammenhang für die Hecke, her: Erhöhung der Geländestrukturvielfalt, strukturelle Ähnlichkeit zu Waldrändern sowie Funktion als Ganz- und Teillebensraum (SCHWERTNER 1991). Des Weiteren wird naturschutzfachliches Wissen über die konkrete Gefährdung in regionaler und überregionaler Skalierung zusammengeführt. Hecken sind u. a. durch Rodungen, Flurbereinigungen und Trockenlegungen bedroht. Sie zählen zu den gefährdeten Biotopen und werden ganz bzw. teilweise nach BNatSchG (u. a. § 29 I) geschützt (POTT 1996)). Die Ebene LÖK II dient als externe, fachspezifische Wissensbasis über die Kulturlandschaftsobjekte. Eine direkte Auswirkung auf die Bildanalyse ist nicht vorhanden,

jedoch ist die Ebene als wichtige inhaltliche Schnittstelle zum Fachanwender und zu landschaftsplanerischen Analyse- und Bewertungsinstrumenten konzipiert.

Das Modell wird schließlich um die Ebene ‚Cross Compliance‘ (CC) erweitert (siehe Abb. 1), um eine inhaltliche Fokussierung der Arbeiten auf die CC-relevanten Objekte (siehe Kap. 2.2) zu ermöglichen und das Projekt für eine fach- und themenbezogene Modellierung zu präzisieren. Diese Ebene stützt sich direkt auf die europäische Gesetzgebung zu den erweiterten Verpflichtungen im Rahmen der Gemeinsamen Agrarpolitik sowie ihren Umsetzungen auf Bundes- und Länderebene. Nach § 5, Abs. 1, Nr. 1 der DirektzahlVerpflV als nationale Umsetzung der CC-Regelungen sind Hecken als lineare, überwiegend mit Gehölzen bewachsene Strukturelemente definiert, die eine Mindestlänge von 20 Metern aufweisen.

3.4 Prozesskette

Die in den Modellebenen beschriebenen Landschaftselemente werden in einer mehrstufigen Prozesskette extrahiert (siehe Abb. 2), die im Folgenden exemplarisch anhand des Landschaftselements „Hecke“ durchlaufen wird. Mit Hilfe der Eingangsdaten (CIR-Bild und Feldblock-Vektoren) wird eine automatisierte Klassifikation der Hecken per



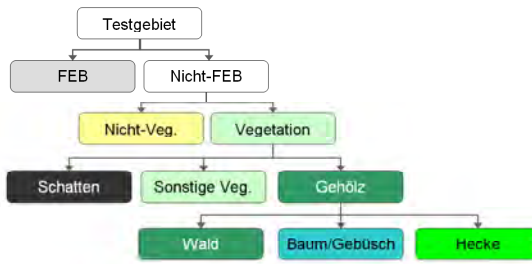
Fernerkundungsmethodik (FE) und Bildanalyse (BA) durchgeführt (siehe Kap. 3.5). Diese Klassifikationsergebnisse durchlaufen als fester Bestandteil der Prozesskette eine automatisierte Plausibilitätskontrolle (siehe Kap. 3.6). Das Ergebnis I stellt eine erste quantitative Bilanz des Landschaftsinventars dar. Durch die Integration der Ergebnisse in landschaftsökologische und agrarpolitische Monitoringstrukturen wird eine tiefere, qualitative Analyse ermöglicht (siehe Kap. 6).

Abbildung 2: Mehrstufige Prozesskette mit Methoden aus Fernerkundung (FE) und Bildanalyse (BA) für die Extraktion von Hecken

3.5 Objektbasierte, hierarchische Klassifikation

Die Segmentierung und objektbasierte Klassifikation der Hecken wird mit der Software Definiens Developer 7.0 (ehemals eCognition) implementiert (BAATZ & SCHÄPE 1999). Die CIR-Bilddaten werden sehr feinstrukturiert segmentiert, um die eher schmalen und linienförmigen Heckenobjekte ausreichend präzise zu repräsentieren. Bereits hier werden die Feldblockdaten (FEB), die die tatsächlich landwirtschaftlich genutzte Fläche ausweisen, bei der Segmentierung als Vorwissen über feststehende Grenzen berücksichtigt. Die Klassifikation der Hecken erfolgt hierarchisch (siehe Abb. 3). Anhand der Feldblockdaten lassen sich die Bereiche außerhalb der Agrarflächen als Zielgebiete für die Extraktion ausweisen. In diesen Zielgebieten werden zunächst über den NDVI Vegetationsflächen ausgewiesen. Anschließend werden alle

Gehölze über Texturmerkmale des Infrarotkanals detektiert. Sehr dunkle Vegetationsflächen werden als Schatten klassifiziert. Es folgt ein geometrisches Splitting der Gehölzobjekte, um Wald (Gehölz mit einer Fläche > 10.000 m²) von den übrigen Gehölzen zu differenzieren. Um die geometrischen Vorgaben der Cross Compliance Regelungen zu erfüllen (siehe Kap. 2.2), werden Gehölze mit einer Länge < 20 m in die Klasse Baum/Gebüsch umgewandelt. Um nicht

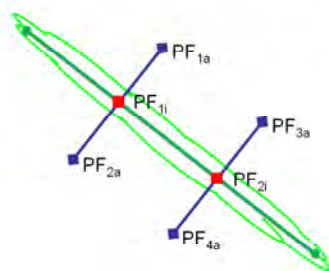


auch urbane Hecken in Gärten oder Parks zu übernehmen, werden abschließend nur die Gehölze in Hecken umklassifiziert, die als nutzungsbegleitende Hecken in der Nähe einer Feldblockfläche liegen (Abstand ≤ 25 m).

Abbildung 3: Klassifikationshierarchie für die Heckenextraktion

3.6 Texturbasierte Plausibilitätsprüfung

Um die objektbasierte Klassifikation einer Plausibilitätsprüfung mit einer unabhängigen Software zu unterziehen, die die Texturwerte der Nachbarflächen durch die explizite geometrische Definition von Kontrollflächen überprüft, wird mit Hilfe der Bildanalyse-Operatorenbibliothek Halcon 7.1 ein Software-Prototyp implementiert. Dieser extrahiert zunächst das Skelett (ECKARDT 1988) und anschließend die Mittellinien aller potentiellen Heckenobjekte des Klassifikationsergebnisses. Die Strecke der Mittellinie wird in drei gleiche Abschnitte geteilt, an deren mittleren beiden Enden je eine 9x9-Pixel große, innerhalb der zu prüfenden Heckenengeometrie liegende Prüffläche (PF_{1,1} und PF_{2,2}) aufgespannt wird (siehe Abb. 4).



Orthogonal zum Mittelpunkt dieser Flächen werden im Abstand von je 25 m rechts und links der Mittellinie insgesamt vier weitere 9x9-Pixel große Prüfflächen (PF_{a1}, PF_{a2}, PF_{a3}, PF_{a4}) erzeugt, die außerhalb der potentiellen Heckenengeometrie liegen. Anschließend wird für jede der Prüfflächen der Mittelwert der lokal vorliegenden Entropie des Infrarotkanals berechnet, um ein Maß für die lokale Textur der potentiellen Hecke und der sie umgebenden Flächen zu erhalten.

Abbildung 4: Schematische Darstellung der Plausibilitätsprüfung mit inneren Prüfflächen (rot, PF_{1,1} und _{2,2}) auf der Mittellinie (dunkelgrün) der Hecke (hellgrün) und den zugehörigen äußeren Prüfflächen (blau, PF_{a1} bis 4)

Es werden die außen liegenden Prüfflächen PF_{a1} und PF_{a2} mit der innen liegenden Fläche PF_{i1} sowie die Flächen PF_{a3} und PF_{a4} mit PF_{i2} verglichen und bewertet.

Vier Kategorien repräsentieren die Plausibilität der Klassifikationsergebnisse: Liegt der Mittelwert der äußeren Prüfflächen PF_{a1} bis 4 viermal unter dem der inneren Messungen an PF_{i1} und 2, so wird die Annahme getroffen, dass es sich „sicher“ um eine Hecke handelt (siehe Tab. 1), da die Nachbarflächen (z.B. Acker oder Grünland) von nutzungsbegleitenden Hecken in aller Regel eine geringere spektrale Heterogenität und damit eine geringere Entropie als die Hecke selbst aufweisen. Die niedrigste Stufe „sicher keine Hecke“ wird vergeben, wenn alle außen liegenden Prüfflächen eine höhere Entropie als die vermeintliche Hecke aufweisen.

Tabelle 1: Einordnung in Plausibilitätskategorien

Plausibilitätskategorie	Entropie innen > Entropie außen
Sichere Hecke	4x
Fast sichere Hecke	3x
Fast sicher keine Hecke	1-2x
Sicher keine Hecke	0x

Die mittleren Kategorien „fast sichere Hecke“ und „fast sicher keine Hecke“ weisen auf nicht eindeutige Zuordnungen und somit ggf. auf Fehlklassifikationen hin. Sie dienen als „Hot Spots“ für die manuelle Nachkontrolle, durch deren gezielte Korrektur der manuelle Nachbereitungsaufwand deutlich verringert werden kann.

4 Erste Klassifikationsergebnisse

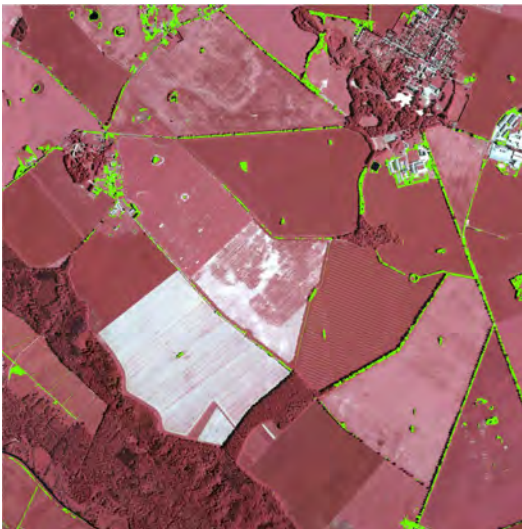


Abbildung 5: CIR-Orthophoto mit überlagertem Ergebnis der Heckenklassifikation (grün)

In dem 16 km² großen Testgebiet wurde insgesamt eine Fläche von 0,42 km² als Hecke klassifiziert (siehe Abb. 5). Um in einer ersten Einschätzung die Klassifikationsgenauigkeit für das Zielobjekt „Hecke“ zu bewerten, wurde ein Accuracy Assessment mit Erdas Imagine anhand von je 50 zufallsverteilten Punkten für die Klasse „Hecke“ und die Klasse „Hintergrund“ (= „Nicht-Hecke“, ein Merge aller übrigen in Kapitel 3.5 beschriebenen Klassen) durchgeführt. Als Referenz dient eine visuelle Onscreen-Klassifikation der Zufallspunkte durch Experten. Das Accuracy Assessment liefert die folgenden Ergebnisse (siehe Tab. 2): Die User Accuracy weist darauf hin, dass nur 70 % der klassifizierten Heckenbereiche in der Referenz auch tatsächlich eine Hecke sind, was zeigt, dass zu viele Hecken klassifiziert wurden.

Allerdings wurden alle in der Referenz als Hecke klassifizierten Objekte von der automatisierten Klassifikation auch erfasst, so dass die Producer Accuracy bei 100 % liegt. Die Genauigkeit der Gesamtklassifikation liegt bei 85 %. Die „Overall Kappa“-Statistik liegt bei 0,7. Sie ermöglicht nur eine ungefähre Einordnung, weil das Maß 0,7 in der Literatur unterschiedlich bewertet wird: Einige halten 0,7 für ein signifikantes Abweichen von einem zufälligen Ereignis, andere sehen hier bereits eine weniger sichere Zuordnung (GREWE 1997).

Tabelle 2: Ergebnisse des Accuracy Assessment für die Heckenklassifikation

Class	Reference Totals	Classified Totals	Number Correct	Producer Accuracy	User Accuracy
Hecke	35	50	35	100 %	70 %
Hintergrund	65	50	50	76,9 %	100 %

5 Auswertung der Plausibilitätskontrolle

Die automatisierte, texturbasierte Plausibilitätskontrolle (vgl. Kap.3.6) wurde für die Ergebnisse der Klassifikation durchgeführt. Jedoch konnte für die Wirksamkeit der Plausibilitätsprüfung noch keine Genauigkeitsanalyse durchgeführt werden, so dass die vorliegenden Zahlen unter Vorbehalt zu betrachten sind:

Tabelle 3.: Anteil der jeweiligen Plausibilitätskategorie an der Gesamtzahl der geprüften Hecken

Plausibilitätskategorie	Anteil an den geprüften Hecken
Sichere Hecke	63,3 %
Fast sichere Hecke	12,3 %
Fast sicher keine Hecke	15,7 %
Sicher keine Hecke	8,7 %

Von den anhand der objektbasierten Klassifikation extrahierten, potentiellen Hecken stuft die Plausibilitätskontrolle fast zwei Drittel (63,3%) als „sicher“ erkannte Hecke ein (vier Außen-Kontrollflächen mit geringerer Entropie als die inneren Kontrollflächen, siehe Tab. 3). Ergänzt man die Häufigkeit der als „sicher“ eingestuft Hecken mit der als „fast sicher“ kategorisierten Hecken (12,3 %), so ergibt sich mit 75,6 % „fast

sicher“ bis „sicher“ eingestufte Hecken eine Größenordnung, die auf den ersten Blick mit den Ergebnissen des Accuracy Assessment der Heckenklassifikation verglichen werden kann (70 %, 75,6 %).

siehe Tab 2). Ob zwischen diesen beiden Maßzahlen ein tatsächlicher Zusammenhang besteht, muss im weiteren Projektverlauf anhand der noch ausstehenden Genauigkeitsanalyse geprüft werden, indem zum einen die gegenwärtige Zuverlässigkeit der Plausibilitätskontrolle, und zum anderen deren Verhalten bei einer steigenden Klassifikationsgenauigkeit untersucht wird. Des Weiteren lässt sich die Plausibilitätskontrolle methodisch optimieren, indem die Größe und die Anzahl der Prüfflächen sowie deren Abstände von der Mittellinie der Hecke variiert werden.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Die in Kapitel 3.2 beschriebene ökologische Modellierung von bildanalyse relevanten und fachspezifischen Parametern für Kulturlandschaftselemente stellt wichtige Definitionen für ein durch automatisierte Klassifikationen unterstütztes Landschaftsmonitoring zur Verfügung. Um eine Charakterisierung der Kulturlandschaft sowie eine quantitative Beschreibung ihrer Eigenart möglich zu machen, muss das hier dargestellte Modell anhand einer Inventarliste um zusätzliche landschaftsprägende Elemente erweitert werden. Hierbei kann ein Abgleich mit der Biotopkartierung Mecklenburg-Vorpommerns hilfreich sein. Für Mecklenburg-Vorpommern sind hierfür aus landschaftsökologischer Sicht insbesondere die Sölle (Toteislöcher), aber auch Gräben, Kleingewässer und Saumstrukturen von hoher Bedeutung für eine strukturreiche Landschaft.

Einen weiteren Schwerpunkt für die zukünftigen Arbeiten stellt die Operationalisierung des beschriebenen Monitoringverfahrens dar, um Landschaftscharakteristika großflächig anhand übertragbarer (teil-) automatisierter Verfahren zu erfassen, zu bewerten und zu analysieren. Um die Übertragbarkeit der entwickelten Methoden zu prüfen, ist sowohl eine Ausweitung des Testgebietes in Mecklenburg-Vorpommern als auch die Erprobung des Verfahrens in einem von Landschaftselementen deutlich kleinräumiger strukturierten Mittelgebirgsraum geplant. Eine Erhöhung der Klassifikationsgenauigkeit im weiteren Projektverlauf wird angestrebt.

Im Kontext europäischer Umwelt-Richtlinien und der Einbindung von GIS- und Fernerkundungstechnologien in die InVeKoS-Kontrollen kann das im vorgestellten Projekt entwickelte Verfahren die vielfältigen Berichtspflichten mit Hilfe modellbasierter Bildanalysealgorithmen unterstützen und damit zu einem objektiven, transparenten und standardisierten Monitoring einer nachhaltigen Kulturlandschaftsentwicklung beitragen. Eine weitere Einbindung der Ergebnisse in digitale Kulturlandschaftskataster (wie z.B. das KLEKs in Mecklenburg-Vorpommern oder das KuLaDigiNW in Nordrhein-Westfalen) ist neben der Bearbeitung von Zeitreihenanalysen (Change Detection) für Monitoringaufgaben denkbar.

7 Literaturverzeichnis

- BAATZ, M. & SCHÄPE, A., 1999: Object-Oriented and Multi-Scale Image Analysis in Semantic Networks. – Proceedings of the 2nd International Symposium on Operationalization of Remote Sensing, Enschede, ITC, August 16–20, 1999.
- BALTSAVIAS, E. P., 2004: Object extraction and revision by image analysis using existing geodata and knowledge. – ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing **2004/58** (3-4): 129 - 151.

- BAUMGARTNER, A., 2003: Automatische Extraktion von Straßen aus digitalen Luftbildern. Dissertation, Institut für Photogrammetrie und Kartographie. – 89 S., TU München, München.
- BUNDESNATURSCHUTZGESETZ (BNatSchG) i.d.F.d.B.v. (BGBl. I S. 1193), geändert durch Artikel 8 d. Gesetzes v. 9.12.2006 (BGBl. I S. 2833).
- BUTENUTH, M., 2004: Modelling the extraction of field boundaries and wind erosion obstacles from aerial imagery. In: ISPRS, Hrsg.: International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing and Spatial Information Sciences. XX. ISPRS Congress. 12-23 July, Istanbul, Turkey. (35): 1065 - 1070.
- DIREKTZAHLUNGEN-VERPFLICHTUNGENVERORDNUNG (DirektzahlVerpflV) i.d.F.d.B.v. 4. 11. 2004 (BGBl. I, 2778 ff.) geändert durch Verordnung v. 26.05.2006 (BGBl. I, S. 1252).
- ECKARDT, U. 1988: Verdünnung mit Perfekten Punkten. In: Mustererkennung 1988. 10. DAGM-Symposium, Zürich. 204-210.
- GREVE, W.; WENTURA, D.; GRÄSER, H. & SCHMITZ, U., 1997: Wissenschaftliche Beobachtung. Eine Einführung. – [2. Aufl.], Weinheim.
- GUINDON, B., 1997: Computer-based aerial image understanding. A review and assessment of its application to planimetric information extraction from very high resolution satellite images. - Canadian Journal of Remote Sensing **1997/23**: S. 38-47.
- HEIPKE, C., 2004: Some requirements for geographic information systems: A photogrammetric point of view. - PE&RS **2004/70** (2): S. 185-195.
- LANG, S. & BLASCHKE, T., 2007: Landschaftsanalyse mit GIS. – 404 S., Ulmer-Verlag, Stuttgart.
- LENSCHOW, U., 2001: Landschaftsökologische Grundlagen zum Schutz, zur Pflege und zur Neuanlage von Feldhecken in Mecklenburg-Vorpommern. In: Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie Mecklenburg-Vorpommern, Hrsg.: Materialien zur Umwelt (1).
- MÜLLER, J., 1990: Bericht über Funktionen von Hecken als Beispiel einer ganzheitlichen Ökosystembetrachtung. In: AKADEMIE DER WISSENSCHAFTEN ZU BERLIN, Hrsg.: Jahrbuch 1989 –De Gruyter-Verlag, Berlin: 44 - 53.
- NÖLLE, O. & STREIT, U., 2002: InVeKoS 2005. Integration von GI-Technologien in das Integrierte Verwaltungs- und Kontrollsystem der EU-Agrarsubventionen. In: SEYFERT, E., Hrsg.: 22. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF. 24. - 26. September 2002 in Neubrandenburg. – Publikationen der DGPF (11). Potsdam: 151 - 158.
- POTT, R., 1996: Biotoptypen. Schützenswerte Lebensräume Deutschlands und angrenzender Regionen. – 448 S., Ulmer-Verlag, Stuttgart.
- RÖSER, B., 1988: Saum- und Kleinbiotope. Ökologische Funktion, wirtschaftliche Bedeutung und Schutzwürdigkeit in Agrarlandschaften. – 258 S., Verlagsgruppe Hüthig Jehle Rehm, Landsberg a. L.
- SCHWERTNER, P., 1991: Heimische Biotope. – 112 S., Natur Verlag, Augsburg.
- SESTER, M., 1995: Lernen struktureller Modelle für die Bildanalyse. – 116 S., Dissertation., Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen, Universität Stuttgart, Stuttgart.
- TÖNIES, R., 1999: Wissensbasierte Interpretation und 3D-Rekonstruktion von Landschaftsszenen aus Luftbildern. - Fortschritt-Berichte VDI **1999** (10), 117 S., VDI-Verlag, Düsseldorf.
- VERORDNUNG (EG) Nr. 1593/2000 i.d.F.d.B.v. 21.07.2000 (Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften, Nr. L182).
- VERORDNUNG (EG) Nr. 1782/2003 i.d.F.d.B.v. 29.09.2003 (Amtsblatt der EU, Nr. L270/2003, 1 - 69).

Ein stereoskopisches Nahbereichssystem auf Basis von adaptiver Musterprojektion

WANJING LI^{A,B}, MARTIN BÖHLER^B, RAINER SCHÜTZE^B,
FRANCK. S. MARZANI^A, FRANK BOOCHS^B, YVON VOISIN^A

Zusammenfassung: Beschrieben wird ein aktives stereoskopisches Messkonzept zur Rekonstruktion von 3D-Objektgeometrien. Durch automatische Adaption des projizierten Musters erfolgt dabei eine Anpassung der Punktdichte an die Objektgeometrie bereits während der Erfassung. Das Resultat des Prozesses ist ein optimiertes 3D-Modell, welches das vermessene Objekt mit einem Minimum an Punkten beschreibt. Es wird gezeigt, dass mit der von uns entwickelten Methode ein derart optimiertes Modell ohne Genauigkeitseinbußen gewonnen werden kann.

1 Einleitung

Verfahren zur Erfassung von 3D-Geometrien arbeiten in der Regel mit einer festen Auflösung ohne Berücksichtigung der tatsächlichen Objektgeometrie. Dies führt oftmals zu 3D-Modellen mit starker Redundanz, bei der auch ebene Flächen mit einer hohen Anzahl an Punkten beschrieben werden. Auf diese Weise entstehen sehr große Datensätze, die erst ausgedünnt werden müssen, um sie handhabbar zu machen. Der nichttriviale Vorgang der Reduktion ist zeitintensiv und führt nicht immer zu optimalen Ergebnissen.

Das hier beschriebene System dagegen adaptiert die Punktdichte bereits während des Erfassungsvorgangs entsprechend der Objektgeometrie. Das System arbeitet mit zwei frei positionierbaren Kameras in Stereoanordnung und einer Projektionseinheit. Letztere erzeugt dynamische Muster auf der Objektoberfläche. Nach der Kalibrierung des Systems erfolgt die Rekonstruktion der 3D-Geometrie in einem iterativen Prozess. Zunächst wird ein regelmäßiges Punktmuster auf das Objekt projiziert. Die Punkte werden in den Messbildern beider Kameras detektiert und durch einen Schwerpunktoperator mit Subpixelgenauigkeit bestimmt. Anschließend wird die Korrespondenz zwischen den Punkten in beiden Bildern ermittelt und die entsprechenden 3D-Koordinaten berechnet.

Die nun vorliegende 3D-Punktwolke wird einer Dreiecksvermaschung unterzogen. Das entstehende Gitternetz wird analysiert, um Bereiche mit starker Krümmung zu identifizieren. Es wird ein neues Punktmuster erzeugt, in dem die Punktdichte in den so ermittelten Bereichen gezielt erhöht wird.

Mit der Projektion dieses Musters beginnt die nächste Iteration. Der Prozess wird wiederholt, bis die geforderte Genauigkeit erreicht ist und alle geometrischen Details mit der gewünschten Präzision erfasst sind.

^{A)} Laboratory LE2i, Building Mirande, UFR Sc. & Tech., BP 47870, 21078 Dijon Cedex, FRANCE, {wanjing.li, franck.marzani,yvon.voisin}@u-bourgogne.fr

^{B)} i3mainz, Fachhochschule Mainz, {mboehler, schuetze, boochs}@geoinform.fh-mainz.de

2 Systemkalibrierung

Das System ist so konzipiert, dass es nicht von spezifischen Hardwarekomponenten abhängig ist, sondern mit jeder CCD-Kamera und jeder Projektionseinheit (LCD Projektor, Lichtmodulator, o.ä.) kompatibel ist. In der vorgestellten Testinstallation wurden zwei CCD Kameras (AVT Oscar F-510C, Auflösung: 2588x1958) und ein LCD Projektor (Canon LV-7350, Auflösung: 1024x768) eingesetzt.

Durch die freie Konfiguration des Systemaufbaus sind nach evtl. Änderungen Kalibriermaßnahmen erforderlich. Die notwendigen Schritte können von der Bestimmung der Kamera- und Projektorposition, bezogen auf einen Referenzrahmen, bis zur Kontrolle der inneren Kamerageometrie (Kalibrierung) bzw. der Bestimmung der Projektorgeometrie reichen.

2.1 Kamera-Kalibrierung

Die Bestimmung der Parameter der inneren Orientierung (IO) (F. REMONDINO; C. FRASER) für jede Kamera ist in einen automatischen Kalibrierablauf integriert.

Als Kalibrierpunktfeld dient ein ebenes Punktfeld (30 x 40 cm) mit rund 200 kodierten Punkten (siehe Abb. 1). Zur Erzeugung der nötigen geometrischen Informationen wird dieses aus verschiedenen Richtungen, Neigungen und Rotationen um die optische Achse der Kamera aufgenommen. In jedem Bild wird der Mittelpunkt aller Zielmarke automatisch gemessen, wobei die Mitte einer Zielmarke über einen Schwerpunktoperator (Center Of Gravity, kurz COG) berechnet und die Punktnummer durch Analyse des Ringcodes (M. NIEDERÖST; H.-G. MAAS) bestimmt wird.

Die Bestimmung der inneren Orientierung wird mittels der Selbstkalibrierung (T. LUHMANN) mit der Ausgleichungs-Software AxOri berechnet. Die Eingangsgrößen für die Bündelausgleichung sind hier die mittels COG berechneten Bildkoordinaten, die näherungsweise bekannten Objektkoordinaten und die geschätzten äußeren Orientierungen.

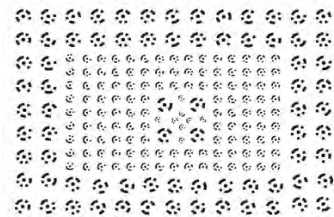


Abb. 1: Kalibrierfeld

2.2 Orientierung der Kameras

Zur Bestimmung der äußeren Orientierung des Kamerapaares wird die klassische „zwei Schritt“ Lösung angewandt: Relative und absolute Orientierung. Auch hierfür wird das bereits zur Kamerakalibrierung verwendete Punktfeld genutzt. Die für die Berechnung der relativen Orientierung benötigten Bildstrahlen wurden mittels COG und Analyse des Ringcodes bestimmt (siehe 2.1).

2.3 Projektor Kalibrierung

Die Projektionseinheit wird ebenfalls kalibriert, wobei die Kenntnis der Projektionsstrahlen nicht in die Punktbestimmung einfließt aber zur Vereinfachung des Korrespondenzproblems (siehe 3.1) hilfreich ist.

In diesem mathematischen Modell wird der LCD Projektor gleichbehandelt wie ein Kamerasystem (V.A. KNYAZ; A. LATHUILLÈRE et.al.). Die geometrische Beziehung zwischen Objektraum und Projektorbildebene wird durch die Verwendung eines eindeutigen Musters hergestellt, welches in den Objektraum projiziert und von den beiden Kameras beobachtet wird.

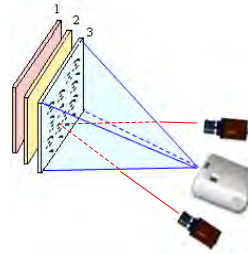


Abb. 2: Projektor-Kalibrierung

Die M-Matrix des Projektors wird mit dem einfachen Ansatz nach ‘Faugeras-Toscani’ bestimmt (O.D. FAUGERAS; G. TOSCANI; R. HORAUD; O. MONGA). Zur Bestimmung der Matrix M werden rund 350 projizierte Punkte in verschiedenen Ebenen im Objektraum beobachtet. Die erreichte Genauigkeit der 2D Punkte liegt im Mittel bei 0,19 Pixel.

3 Rekonstruktion der 3D-Geometrie

Zur Rekonstruktion der 3D-Punktkoordinaten aus dem Stereobildpaar kommen zunächst Methoden der Bildverarbeitung zum Einsatz: Die projizierten Punkte werden in den Bildern detektiert, ihr Zentrum mittels eines Schwerpunktoperators (COG) mit Subpixelgenauigkeit bestimmt und über die bekannten Orientierungsparameter im Raum koordiniert.

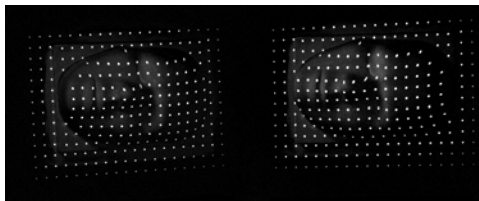


Abb. 3: Stereobildpaar mit initialem Punktmuster

3.1 Das Korrespondenzproblem

Ein nichttriviales Teilproblem des Rekonstruktionsprozesses ist die Korrespondenzfindung zwischen den Punkten in beiden Bildern. Da die projizierten Punkte – im Gegensatz zu den Punkten auf der zur Kalibrierung verwendeten Tafel – über keinerlei Kodierung verfügen und eine solche auch nicht praktikabel wäre, muss die Korrespondenz zwischen den beiden Bildern auf anderem Wege hergestellt werden.

Der von uns entwickelte und in dem Softwaremodul ‚CloudPro‘ implementierte Algorithmus (M. BÖHLER; F. BOOCHS) verwendet hierzu eine Reihe von unterschiedlichen Kriterien, um für ein potentielles Punktpaar zu prüfen, ob es sich tatsächlich um einen homologen Punkt handelt. Jedes Kriterium liefert eine Wahrscheinlichkeit P_i für eine Korrespondenz der beiden Punkte. Eine gewichtete Kombination aller Teilwahrscheinlichkeiten führt zur endgültigen Zuordnungswahrscheinlichkeit P_{fin} . Liegt diese über einem Schwellwert P_{min} , so gelten die Punkte als homolog. Die Kombination verschiedener Kriterien in Verbindung mit einer iterativen Herangehensweise hat sich als sehr robust erwiesen.

3.1.1 Kriterien

Zur Ermittlung der Zuordnungswahrscheinlichkeit werden folgende Kriterien geprüft:

- Epipolarer Abstand der Punkt - je genauer die Punkte auf einer Epipolarebene liegen, desto wahrscheinlicher ist eine Korrespondenz.
- Nachbarschaftsverhältnisse - wenn die Korrespondenz einiger initialer Punkte ermittelt wurde, können Betrachtungen über benachbarte Punkte angestellt werden, um wahrscheinliche Punktpaare zu finden.
- Relative Position entlang einer Epipolarlinie – da die Ausrichtung der Kameras im Stereobildfall ähnlich ist, ist die relative Position eines Punktes entlang der Epipolarlinie meist vergleichbar.
- Projektor - durch die Kalibrierung des Projektors ist es möglich, einen rekonstruierten Punkt zurück in das projizierte Bild zu rechnen und somit zu prüfen, ob an der ermittelten Position tatsächlich ein Punkt projiziert wurde.
- Farbkodierung (optional) - Wenn Projektor, Kamera und Material des Objektes es erlauben, können auch farbkodierte Punkte projiziert werden, was die Zuordnung massiv vereinfacht.

Des Weiteren findet ab der zweiten Iteration das aus vorherigen Iterationen vorhandene Wissen um die nun näherungsweise bekannte Objektgeometrie Eingang in die Korrespondenzfindung.

3.1.2 Segmentierung des Punktraumes

Bei n Punkten pro Bild sind n^2 einzelne Punktombinationen zwischen je einem Punkt des rechten und des linken Bildes möglich. Insgesamt existieren $n!$ mögliche Zuordnung aller Punkte. Eine Prüfung sämtlicher Kombinationen wäre bei großen Punktmengen extrem laufzeitintensiv. Es ist daher sinnvoll, mit Hilfe eines einfachen Kriteriums die Menge der zu prüfenden Kombinationen zu reduzieren.

Als geeignetes Kriterium bietet sich hierbei die Epipolargeometrie an. Da homologe Punkte immer auf einer Epipolarebene liegen, reduziert sich die Anzahl der möglichen Kandidaten für jeden Punkt auf wenige mögliche Kandidaten im anderen Bild. Nur diese werden einer eingehenden Prüfung unterzogen. Durch diese Segmentierung des Punktraumes wird die Anzahl der benötigten Operationen beträchtliche reduziert und steigt bei wachsender Punktmenge nur noch linear an.

3.1.3 Iteration in der Korrespondenzfindung

Der Algorithmus zur Korrespondenzfindung arbeitet ebenfalls iterativ: Nach dem ersten Durchlauf werden diejenigen Punkte, die nicht eindeutig zugeordnet werden konnten, erneut bearbeitet. Durch die erfolgte Zuordnung einiger Punktpaare in der ersten Iteration hat sich zum einen die Anzahl der Mehrdeutigkeiten reduziert, zum anderen stehen mehr Informationen über Nachbarschaftsbeziehungen zur Verfügung, was die Zuordnung nochmals vereinfacht.

Nach der Lösung des Korrespondenzproblems werden mittels räumlichen Vorwärtsschnittes die 3D-Koordinaten für alle bekannten Punkte berechnet. Die erzeugte Punktwolke wird anschließend mittels einer Delaunay-Triangulation (S. KANAGANATHAN; N.B. GOLDSTEIN) vermascht. Das so entstehende Gittermodell wird zur folgenden Analyse der Krümmungseigenschaften des Objektes verwendet.

4 Krümmungsanalyse und Generation des neuen Punktmusters

4.1 Krümmungsanalyse

Durch Interpretation eines Dreiecksnetzes als lineare Approximation einer gekrümmten Oberfläche lassen sich genäherte lokale Krümmungen (LSC, local surface curvature) für einzelne Punkte des Netzes bestimmen. Hierzu existieren verschiedene Ansätze und Nähungsverfahren, die zumeist auf Betrachtungen an den Vertices des Netzes basieren. Neben diesen Verfahren wurde von uns ein eigenes Verfahren entwickelt, welches auf den Normalenvektoren der Flächen basiert.

4.1.1 Gauß'sche Krümmung

Jeder Punkt auf einer dreidimensionalen Fläche besitzt zwei Hauptkrümmungen k_1 (minimale Krümmung) und k_2 (maximale Krümmung). Aus diesen Werten lassen sich die Gauß'sche Krümmung $K = k_1 \times k_2$ und die mittlere Krümmung $H = (k_1 + k_2) / 2$ ableiten.

Wir wählen die Gauß'sche Krümmung zur Bestimmung des LSC-Wertes, da sie im Gegensatz zur mittleren Krümmung bei sehr kleinen Flächen nicht 0 wird.

Sowohl Gauß'sche als auch Mittlere Krümmung sind nur für zweifach differenzierbare Oberflächen definiert. Um 3D-Krümmungsinformationen zu erhalten, wurden durch die Autoren L. ALBOUL, et al.; T. SURAZHSKY, et al. verschiedene Verfahren zur Approximation der Gauß'schen und Mittleren Krümmung vorgestellt.

Surazhsky verglich fünf Algorithmen und kam zu dem Schluss, dass das Gauß-Bonnet-Verfahren den besten Algorithmus zu Näherung der Gauß'schen Krümmung darstellt (T. SURAZHSKY, et al.). In unserer Software wurden drei auf dem Gauß-Bonnet-Verfahren basierende Lösungen implementiert.

Der Vertex V_i ist dabei ein Nachbar des Vertex V , wenn die Kante VV_i Teil des Gitternetzes ist. Die Menge der Nachbarn von V sei dann $\{V_i \mid i = 1, 2, \dots, n\}$ und die Menge alle Dreiecke, die V enthalten, $\{T_i = \Delta(V_i, V, V_{(i+1) \bmod n}) \mid i = 1, 2, \dots, n\}$. Schließlich sei die Menge aller Winkel in V zwischen je zwei seiner aufeinander folgenden Nachbarn von $V \{ \alpha_i = \angle(V_i, V, V_{(i+1) \bmod n}) \mid i = 1, 2, \dots, n \}$. Ferner sei A_i die Fläche des Dreiecks $\Delta(V_i, V, V_{(i+1) \bmod n})$, siehe Abb. .

Die gängigste Formel (N. DYN, et al.; J.-L. MALTRET & M. DANIEL) zur Berechnung der Gauß'schen Krümmung K in V lautet:

$$(1) \quad K = \frac{2\pi - \sum_{i=1}^n \alpha_i}{\frac{1}{3} \sum_{i=1}^n A_i}$$

Meyer (M. MEYER, et al.) hingegen schlägt die Verwendung von Voronoi-Dreiecken anstelle der originalen Dreiecksflächen vor, hier A^{Mixed} genannt.

$$(2) \quad K = \frac{2\pi - \sum_{i=1}^n \alpha_i}{\sum_{i=1}^n A_i^{\text{Mixed}}}$$

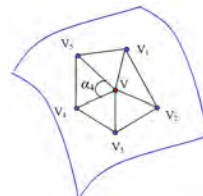


Abb. 4: Oberfläche approximiert durch kleine Dreiecke

Ein dritter, einfacherer Ansatz kann durch das Ignorieren der Dreiecksflächen erzielt werden (L. ALBOUL, G. ECHEVERRIA, M. RODRIGUES):

$$(3) \quad K = 2\pi - \sum_{i=1}^n \alpha_i$$

4.1.2 Unser Ansatz

Für stetig gekrümmte Flächen liefert die Gauß'sche Krümmung verlässliche Informationen, um zur LSC-Bestimmung in unserem Verfahren zu dienen. Wenn jedoch ein Vertex zwei Nachbarn auf der gleichen Kante besitzt und weitere Nachbarn auf zwei angrenzenden Flächen, beträgt seine Gauß'sche Krümmung 0 (siehe Abb. 5). An diesem Punkt versagt die Gauß'sche Krümmung für unsere Zwecke: Die Kante wird nicht als solche erkannt.

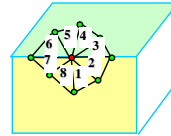


Abb. 5: Ungünstige Flächenkonfiguration für Gauß'sche Krümmung

Aus diesem Grund wurde ein neuer Ansatz entwickelt. Dieser basiert im Gegensatz zu dem Verfahren nach Gauß nicht auf der Betrachtung der Vertices des Gitternetzes, sondern auf der Betrachtung der Normalenvektoren der Flächen.

Nachdem für jede Fläche der Normalenvektor berechnet wurde, kann der Torsionswinkel θ zwischen zwei Flächen als Produkt der Normalenvektoren berechnet werden. Um die LSC eines Punktes im Netz zu erlangen, werden alle angrenzenden θ des Punktes evaluiert. Dabei ist vor allem der höchste Wert θ_{max} relevant, denn nur wenn alle Winkel gering sind, liegt eine niedriger LSC vor. Auf diese Weise können auch für die beschriebenen Konfigurationen, bei denen das Gauß-Bonnet-Verfahren versagt, für unsere Zwecke nutzbare LSC-Werte berechnet werden.

4.2 Generierung des neuen Punktmusters

Punkte des Netzes, deren LSC unterhalb eines unteren Schwellwerts τ_1 liegen, sind redundante Punkte, die zur Optimierung des Modells gelöscht werden können: Da sie in einer Ebene liegen, führt ihre Löschung nicht zu einem Verlust an morphologischen Informationen.

Bei einem LSC größer als ein oberer Schwellwert τ_2 liegt eine Region mit komplexer Morphologie vor, die einer Erhöhung der Punktdichte ratsam erscheinen lässt. Um diese Punkte herum werden daher zusätzliche Punkte erzeugt, insofern die Punktdichte hier noch nicht das im Rahmen des Verfahrens mögliche Maximum erreicht hat.

Bei einem LSC zwischen τ_1 und τ_2 ist keine Änderung notwendig.

Mit der Projektion des so generierten Musters beginnt die nächste Iteration. So lange noch Änderungen am Punktmuster erfolgen, wird die Iteration fortgesetzt, bis schließlich ein optimales Muster und somit das endgültige 3D-Modell erreicht ist.

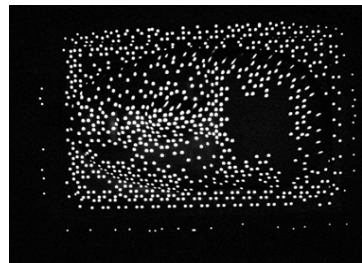


Abb. 6: Adaptiertes Punktmuster der 3. Iteration bei der Rekonstruktion einer Maske

5 Ergebnisse

In diesem Abschnitt zeigen wir Ergebnisse des Rekonstruktionsprozess für zwei Objekte, ein blaues kreuzförmiges Metallstück und eine graue Plastikmaske (siehe Abb. 7).



Abb. 7: Zwei Objekte zur Rekonstruktion: ein blaues Kreuz und graue Maske.

Für jedes Objekt wurden die vier in 4.1 genannten Nähungsansätze zur Bestimmung des LSC-Wertes angewendet. Die Rekonstruktionsergebnisse wurden mit einem gesannten Referenzmodell M_{ref} verglichen. Die Ergebnisse sind in der Tabelle 1 zusammengefasst und in der Abb. 8 visualisiert. Das Referenzmodell M_{ref} wurde mit einem GOM Atos II aufgenommen. Das M_{ref_simp} ist ein vereinfachtes Modell des M_{ref} , bei dem die Energiefunktion minimiert und die so bestimmten Punkte aus dem Original herausgenommen wurden. Die verschiedenen LSC Schätzungsansätze, beschrieben in Abschnitt 4.1.1, werden hier M_{GC1} , M_{GC2} , M_{GC3} genannt. Das mittels des eigenen Ansatzes (siehe 4.1.2) erzeugte Model heißt M_{LI} .

Tabelle 1 Vergleich der Rekonstruktion des blauen Kreuzes

	M_{ref}	M_{ref_simp}	M_{GC1}	M_{GC2}	M_{GC3}	M_{LI}
Anzahl der Punkte	96,194	4,817	1,494	1,814	1,823	2,031
Standartabweichung vs. M_{ref} (mm)	-	0,34	0,68	0,36	0,61	0,08

In Tabelle 1 ist zu erkennen, dass M_{LI} verglichen zu M_{ref} mit 0,08 mm die kleinste Standardabweichung aufweist. Im Vergleich zu M_{ref_simp} ist dieser Wert dreimal besser. Darüber hinaus wurden für die Bestimmung von M_{LI} nur 2.031 Punkte benötigt. Das bedeutet gegenüber M_{ref} eine Einsparung von 98%.

In Abb. 88 (b) ist zu erkennen, dass das vereinfachte Model M_{ref_simp} durch eine größtenteils gleichmäßig über die Oberfläche verteilte Punktwolke beschrieben wird, die auch in den ebenen Bereichen Punkte enthält. Vergleicht man das Ergebnis aus M_{LI} , ist zu erkennen, dass nur an den Kanten die Punktdichte hoch ist und die ebenen Bereiche mit wenigen Punkten bestückt sind.

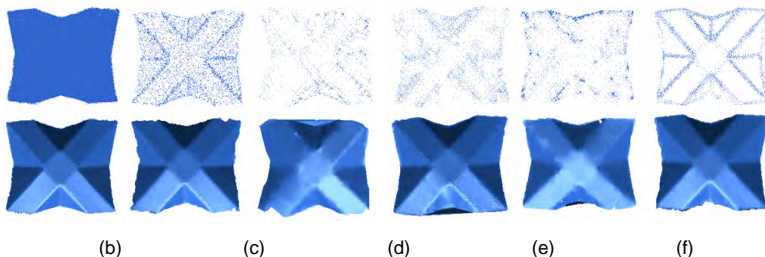
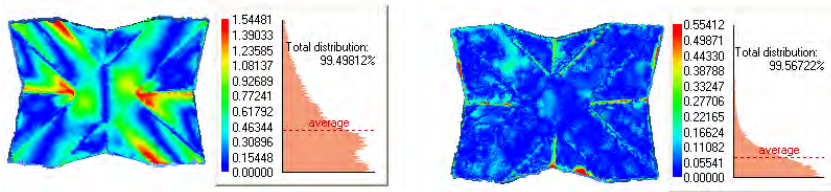


Abb. 8: Vergleich der Rekonstruktion des blauen Kreuzes, jeweils beschrieben durch die 3D Punktwolke und der Maschenoberfläche; (a) M_{ref} ; (b) M_{ref_simp} ; (c) M_{GC1} ; (d) M_{GC2} ; (e) M_{GC3} ; (f) M_{LI} .

Abb. 9 zeigt zwei Differenzbilder von M_{ref_simp} und M_{LI} bezogen auf M_{ref} . Die Qualität des Modells ist sehr gut, zu erkennen an der geringen Abweichung (durch den blauen Bereich dargestellt), wohingegen das vereinfachte Modell höhere Abweichungen, insbesondere an den Kanten und in den Ecken, aufweist.



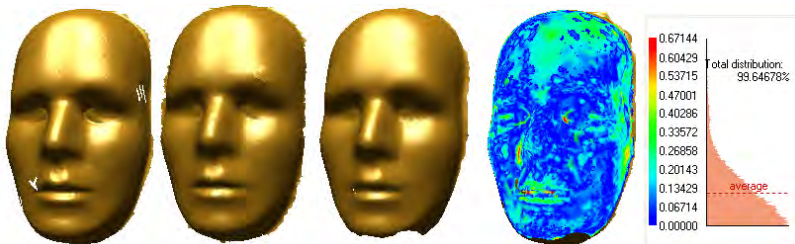
(a)

(b)

Abb. 9: Vergleich der Abweichungen: (a) Abweichung zwischen M_{ref} und M_{ref_simp} (STABW 0,34 mm) und (b) Abweichung zwischen M_{ref} und M_{LI} (STABW 0,08 mm)

Abb. 10 zeigt das Rekonstruktionsergebnis einer mehr ungleichmäßig geformten Oberfläche (Maske). Das Referenzmodell wurde auch hier mit dem GOM Atos II erfasst. Das vereinfachte Referenzmodell besitzt eine Standardabweichung von 0,18 mm und enthält große Fehler im Bereich der Augenbrauen, dem Nasenrücken und den Lippen.

Das mit unserem LSC-Ansatz erfasste Modell beinhaltet nur 3.211 Punkte und ist mit einer Standardabweichung von 0,11 mm zum Referenzmodell bestimmt worden. Das Differenzbild zeigt, dass viele Bereiche der Maske, inklusive der signifikanten Stellen, eine sehr kleine Abweichung zum Referenzmodell besitzen, erkennbar an den blauen Stellen mit einem Wert von rund 0,06 mm.



(a)

(b)

(c)

(d)

(e)

Abb. 10: Verschiedene Modelle der Maske: (a) M_{ref} Referenz Modell (107.573 Punkte); (b) M_{ref_simp} vereinfachtes Referenz Modell (5.344 Punkte); (c) M_{LI} Modell (3.211 Punkte); (d) Abweichung zwischen M_{ref} und M_{LI} (STABW 0,11 mm)

6 Zusammenfassung

Wir zeigten ein neues System für die Nahbereichsphotogrammetrie auf Basis von iterativer und adaptiver Musterprojektion. Der Schwerpunkt liegt hierbei hauptsächlich auf der gezielten Datenerfassung der charakteristischen Bereiche während der Bildaufnahme. Das System projiziert in einem iterativen Erfassungsprozess Punktmuster passend zur Oberflächengeometrie des Objektes. Bei jeder Iteration wird die lokale Oberflächenkurve für

jeden Maschenpunkt berechnet und entschieden, an welcher Stelle zusätzlich Punkte projiziert werden müssen.

Einige Ergebnisse von verschiedenen Oberflächen wurden dargestellt und es wurde gezeigt, dass unser System geeignet ist, 3D Modelle mit hoher Genauigkeit zu rekonstruieren. Durch den Einsatz unseres Kantenbasierten LSC Ansatz konnten, verglichen zum GOM Atos II, optimierte Modelle mit 98% weniger Punkten erzeugt werden, wobei alle wichtigen morphologischen Informationen über das Objekt trotzdem erfasst wurden.

Der Grund, warum unser Ansatz bessere optimierte 3D Modelle liefert, liegt in der Tatsache, dass wir die charakteristischen Oberflächeneigenschaften schon während des hierarchischen Erfassungsprozess ermitteln. Bei dem Ansatz der Ausdünnung von Maschen, wie er in der Literatur beschrieben wird, wird meist das schrittweise Löschen von Punkten über das Minimieren einer Energiefunktion verfolgt. Der Nachteil hierbei ist, dass die Oberflächenform nicht als Indikator verwendet wird, um zu evaluieren, ob sich ein Punkt an einer signifikanten Stelle befindet.

Momentan basiert die Steuerung der projizierten Muster allein auf der LSC-Schätzung, da die Geometrie des Objektes bei der Rekonstruktion komplett unbekannt ist. Unsere zukünftige Arbeit wird einen Schritt weitergehen und sich mit eventuell vorhandenem Vorwissen beschäftigen. Mit der Kombination der Vorkenntnis über das Objekt und der LSC-Schätzung wird das System fähig sein, die für den Nutzer interessanten Oberflächeneigenschaften sehr schnell zu bestimmen. Dieser Ansatz kann im Industriellen Umfeld z.B. zur Qualitätskontrolle genutzt werden.

7 Literaturverzeichnis

- ALBOUL, L.; ECHEVERRIA, G. & RODRIGUES, M., 2005: Discrete curvatures and gauss maps for polyhedral surfaces, in European Workshop on Computational Geometry (EWCG), Eindhoven, the Netherlands, 2005, pp. 69–72.
- BÖHLER, M. & BOOCHS, F., 2006: Getting 3D shapes by means of projection and photogrammetry, Inspect, GIT-Verlag, Darmstadt, 2006.
- DYN, N.; HORMANN, K.; KIM, S.J. & LEVIN, D., 2001: Optimizing 3D triangulations using discrete curvature analysis, Mathematical Methods for Curves and Surfaces, Oslo 2000, Nashville, TN., 2001, pp.135-146.
- FAUGERAS, O.D. & TOSCANI, G., 1986: “The calibration problem for stereo“, in Proc. Computer Vision and Pattern Recognition, Miami Beach, Florida, USA, pp.15-20.
- HORAUD, R. & MONGA, O., 1995 : Vision par ordinateur: outils fondamentaux, 2^{ème} édition, Hermès.
- KANAGANATHAN, S. & GOLDSTEIN, N.B., 1991: Comparison of four point adding algorithms for Delaunay type three dimensional mesh generators, IEEE Transactions on magnetics, 1991, 27(3).
- KNYAZ, V.A., 2006: Automated calibration technique for photogrammetric system based on a multi-media projector and a CCD camera, ISPRS Image Engineering and Vision Metrology (IEVM06), Dresden, September 2006, pp. 25-27.
- LATHULIÈRE, A.; MARZANI, F. & VOISIN, Y., 2003: Calibration of a LCD projector with pinhole model in active stereovision applications, Conference SPIE: Two- and Three-Dimensional Vision Systems for Inspection, Control, and Metrology, Rhode Island, USA, 2003, vol. 5265, pp. 199-204.
- LUHMANN, T., 2003: Nahbereichsphotogrammetrie Grundlagen - Methoden – Anwendungen, Edition 2.

- MALTRET, J.-L. & DANIEL, M., 2002: Discrete curvatures and applications: a survey. Rapport de recherche 004.2002, Laboratoire des Sciences de l'Information et des Systèmes, 2002.
- MEYER, M.; DESBRUN, M.; SCHRÖDER, P. & BARR, A.H., 2002: Discrete differential-geometry operators for triangulated 2-manifolds, In Proc. VisMath 02, Berlin, Germany, 2002, pp.35-57.
- NIEDERÖST, M. & MAAS, H.-G., 1997: Entwurf und Erkennung von codierten Zielmarken, Tagungsband der 16. Wissenschaftlich-Technischen Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung, Oldenburg 1996, Germany.
- REMONDINO, F. & FRASER, C., 2006: Digital camera calibration methods: considerations and comparisons, International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, ISPRS Commission V Symposium, Dresden, Germany, Vol. XXXVI, part 5, pp. 266-272.
- SURAZHISKY, T.; MAGID, E.; SOLDEA, O.; ELBER, G. & RIVLIN, E., 2003: A comparison of gaussian and mean curvatures estimation methods on triangular meshes, in IEEE International Conference on Robotics & Automation, 2003.

Inspektion linearer Objekte mit flugzeuggestützten Sensoren

ALBERT WIEDEMANN¹

Zusammenfassung: Es existiert ein beträchtlicher Bedarf, lineare Objekte, vor allem aus dem Bereich Infrastruktur wie Verkehrswege und Versorgungsleitungen, permanent zu überwachen. Flugzeuggestützte Sensoren lassen dabei die höchste Effizienz zu. Die BSF Swissphoto betreibt neben mehreren Flächenflugzeugen unter anderem digitale Luftbildkameras wie die Vexcel Ultracam D und Ultracam X sowie mehrere luftgestützte Laserscannersysteme von Optech. An Hand von Beispielen wird das Potential dieser Daten für die Erfassung und Überwachung linearer Objekte dargestellt, wobei auch die digitale Analyse dieser Daten Bestandteil des Beitrages ist.

1 Einleitung

Lineare Infrastruktureobjekte wie Strom- und Telefonleitungen, Pipelines und Verkehrswege durchziehen die modernen Landschaften und haben Wechselwirkungen mit ihrer Umwelt. Der Zustand der linearen Objekte und ihrer Umgebung bedarf einer regelmäßigen Überwachung, um Störungen in ihrem Betrieb und in der Umwelt zu minimieren.



Abb. 1: Cessna 206 der BSF Swissphoto während einer Flussbefliegung am 10.02.2008 mit eingebautem Laserscanner Optech ALTM 3100

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

2 Datenerfassung

Die luftgestützte Datenerfassung mit Flächenflugzeugen ist sehr viel wirtschaftlicher als mit Helikoptern zu realisieren. Die Vibrationen sind geringer, die Betriebskosten sind niedriger, die Ausdauer größer und die Geschwindigkeit meist höher. Allerdings müssen zur Sicherstellung einer stabilen Fluglage und für den wirtschaftlichen Betrieb die meisten Bildflugzeuge eine minimale Geschwindigkeit relativ zur umgebenden Luftmasse von etwa 100 bis 140 Knoten (185-260 km/h) einhalten. Hierzu muss man die zu erwartenden Windgeschwindigkeiten hinzurechnen, um die minimale Geschwindigkeit über Grund zu ermitteln, da man mit Gegen- und Rückenwind rechnen muss.

Die BSF Swissphoto operiert meist mit den eigenen Cessnas (siehe Abb. 1), chartert aber bei Bedarf auch Flugzeuge mit besonderen Flugeigenschaften, etwa Turboprops mit Druckkabine für große Flughöhen oder Flugzeuge mit besonderen Langsamflug- und Steigeigenschaften wie die Pilatus Porter PC-6 für den geländefolgenden Einsatz im Hochgebirge.

Zum Einsatz kommen bei BSF Swissphoto die eigenen Sensoren, vor allem großformatige digitale Luftbildkameras und luftgestützte Laserscanner, aber auch weitere Sensoren von Partnern, wie etwa Thermalkameras.

2.1 Bilddatenerfassung mit großformatigen Digitalkameras

Bei der Befliegung muss sichergestellt sein, dass die Vorwärtsbewegung des Flugzeuges keine Bewegungsunschärfen in den Bildern verursacht. Die *Forward Motion Compensation* der Vexcel Ultracam kompensiert bis zu 50 Pixel Bewegungen. Bei Belichtungszeiten kürzer 1/100 s ist das FMC System somit in der Lage, die Vorwärtsbewegung zu kompensieren.

Im Normalmodus beträgt die minimale Bildfolgezeit 1,5 bzw. 2,2 s (UCD/UCX). Im Fastmodus (minimale Bildfolgezeiten UCD: 1,0 s, UCX: 1,2 s) kann man mit beiden Modellen der Vexcel



Abb. 2 Vierfach vergrößerter Ausschnitt einer Befliegung mit der Vexcel Ultracam D

Ultracam jeweils Bilder bis zu einer Auflösung von 2 cm erstellen, wenn mit 120 kn und 60 % Längsüberdeckung geflogen wird. Dadurch reduziert sich zwar die Menge aufnehmbarer Daten einer Mission, dennoch können auf Grund der Kamerakapazität im Fastmodus in einer Mission 95 km (UCD), bzw. 250 km (UCX) einfache Streckenkilometer mit 2 cm Auflösung aufgenommen werden. Im Normalmodus sind ca. 250 km (UCD), bzw. 650 km (UCX) bei 3 cm Auflösung möglich. Die geringe Flughöhe und geforderte Präzision des Bildfluges stellen auch erhebliche Anforderungen an die Crew.

2.2 Luftgestütztes Laserscanning

Luftgestützte Laserscanner kommen vorwiegend aus Hubschraubern zum Einsatz. Die Laserscannersysteme waren in der Vergangenheit kaum in der Lage bei typischen Flächenflugzeuggeschwindigkeiten von ca. 100 bis 140 Knoten (185-260 km/h) Daten in ausreichender Dichte zu erfassen. Die neuesten Systeme können mit einer höheren Frequenz betrieben werden, so dass die Aufnahme mit Flächenflugzeugen zunehmend erfolgt.

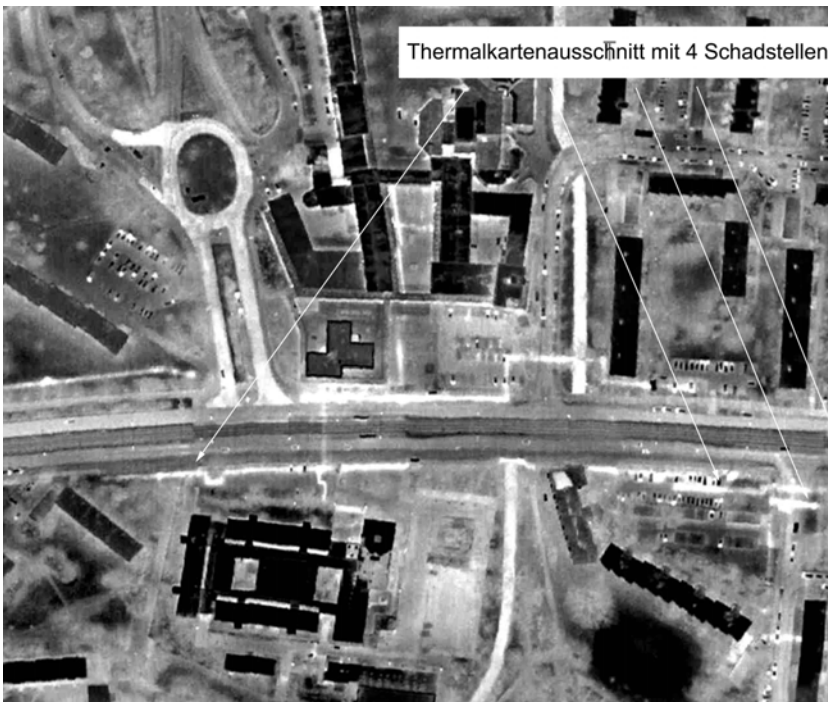


Abb.3 : Thermaldaten von Fernwärmenetzen (Quelle: Scandat)



Abb. 4: Befliegung mit der Vexcel Ultracam D, Bodenaufösung etwa 5 cm

2.3 Andere Sensoren

Neben großformatigen digitalen Luftbildkameras und Laserscannersystemen lassen sich auch andere Sensoren einsetzen. In einem Flug zur Überwachung von Deichen im Rahmen des Hochwassers 2006 erfolgte eine kombinierte Befliegung der Überschwemmungszone mit Vexcel Ultracam D und einem Thermalscanner der Firma Scandat.

2.4 Anwendungsbeispiele

Von BSF Swissphoto wurden im Laufe der letzten Jahre diverse Projekte zur Dokumentation linearer Objekte durchgeführt. Dabei kommt der Flugplanung eine besondere Bedeutung zu. Schwierig ist es vor allem, lineare Objekte zu befliegen, die enge Radien aufweisen wie natürliche Flussläufe oder Leitungen und Verkehrswege in gebirgigem Gebiet.

2.4.1 Rohrleitungssysteme

Im Bereich des Flughafens Schönefeld wurden Rohrleitungssysteme erfasst. Die Befliegung am 16.11.2006 erfolgte in etwa 1000 m über Grund, was zu einer Bodenaufösung von ca. 10 cm führt (Abb. 2). Es bleibt zu prüfen, inwiefern Methoden aus der As-built Anlagenvermessung auf diese Daten anwendbar sind (MISCHKE & RIEKS 2001, PRZYBILLA & WOYTOWICZ 2004). Auch der Einsatz von Laserscannern erlaubt hier automatische Auswertestrategien (BECKER 2005). Es lassen sich aber z.B. mit Thermalsensoren auch Fernwärme-Leitungssysteme auf Wärmelecks untersuchen (Abb.4, GEBNER & KRICKAU 2007).

2.4.2 Stromnetz

In der Vergangenheit reichte die Auflösung von abbildenden Sensoren kaum aus, um elektrische Leitungssysteme zu überwachen. Da die Identifikation eindeutiger Punkte in Leitungsrichtung auf den Leitungen nahezu unmöglich ist (zumindest abseits der Masten) und zusätzlich die Basis

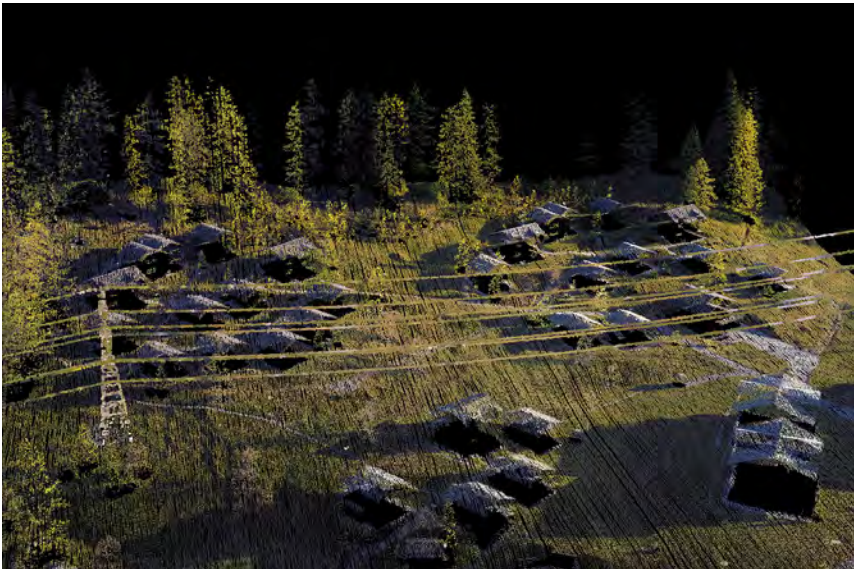


Abb. 5: Befliegung mit der ALTM3100, Bodenauflösung etwa 3-4 Pt/m²

in nahezu parallel zu den Leitungen verläuft, ist eine stereoskopische Auswertung der Leitungen selbst kaum realisierbar. So beschränkte man sich mit Bilddaten auf Havariebefliegungen. Dazu das Beispiel nach dem Wintersturm 2007 in Sachsen-Anhalt (Abb. 5). Die Befliegung erfolgte wenige Tage nach dem Schadensereignis mit der Vexcel Ultracam D in einer Höhe von 600 m über Grund (GSD ca. 5 cm).

Zur dreidimensionalen Erfassung von Leitungssystemen eignen sich besser Laserscanner. Selbst dünnste Drähte erzeugen eine Reflektion und sind somit in den Daten repräsentiert. Diese frühen Signale lassen sich sehr gut durch automatische Filterverfahren erfassen. Die BSF Swissphoto hat eine eigenständige Auswertumgebung auf der Basis von Eigenentwicklungen und Standardsoftware aufgebaut (LÜTHY et al., 2005) und nutzen diese effizient.

2.4.3 Bahnkörper mit Nebenanlagen

Im Sommer 2007 wurden Bahnanlagen in Potsdam befliegen. Dabei ging es darum, das maximale Auflösungspotential zu ermitteln. Die Befliegung erfolgte in 350 m über Grund, was eine Bodenauflösung von etwa 3 cm bedeutet. Die Daten dienen auch als Basis für Studien hinsichtlich des automatisierten Auswertepotentials hochauflösender Bilddaten. Die langen Schlagschatten zeigen die spätabendliche Befliegung. Dennoch sind die Lichtverhältnisse ausreichend, um auch in den Schattenbereichen noch Zeichnung sehen zu können. Diese speziellen Lichtverhältnisse führen zu Bildern, die Streiflichtaufnahmen in der Architekturphotogrammetrie ähnlich sind.

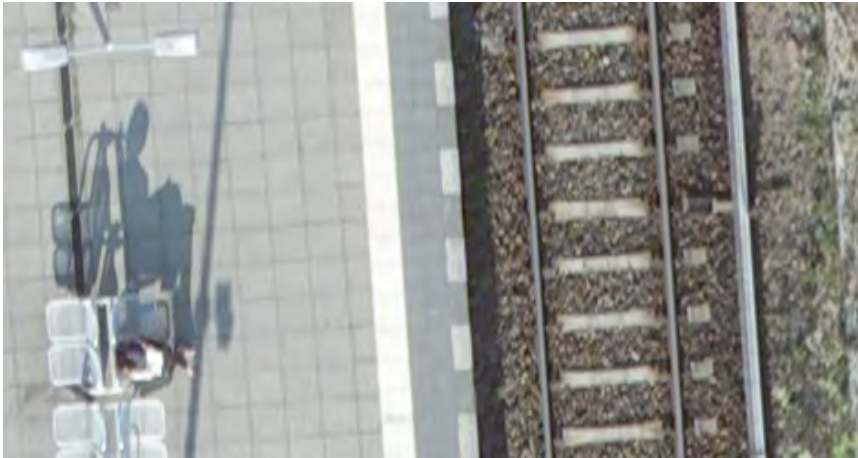


Abb. 6: Ausschnitt aus einer hochauflösenden Befliegung von Bahnanlagen, Bodenauflösung 3 cm

2.5 Sensorkombinationen

Die BSF Swissphoto hat einige Erfahrung mit Kombinationsflügen, so mit Vexcel Ultracam und Thermalscanner, aber vor allem in Kombination mit luftgestützten Laserscannern (WIEDEMANN et al, 2007). Diese Kombination bietet ein beträchtliches zusätzliches, bisher nicht ausgeschöpftes Potential, insbesondere im Bereich der Datenanalyse und Klassifizierung. Auch für die im Sommer 2007 beflogene Bahntrasse (Abb. 6) liegen Laserscannerdaten vor, allerdings von einer geringfügig späteren Befliegung mit 4 Pt/m².



Abb. 7: Querprofil durch die Laserscanning-Daten der Bahnbefliegung vom Sommer 2007

3 Datenanalyse

3.1 Bildanalyse

Diese höchstaflösenden Bilder bieten ein vollkommen neues Potential in der Bildanalyse. Besonders die sich wiederholenden Bildstrukturen entlang linearer Objekte laden dazu ein, digitale Bildanalysemethoden zur automatischen Verfolgung dieser Objekte in der Bildsequenz heranzuziehen. Da es sich um anthropogene Objekte handelt, sind hier Methoden aus der Nahbereichsphotogrammetrie häufig besser geeignet (WENZEL et al., 2007, BENNING et al 2004) als gebräuchliche Methoden aus der Luftbildphotogrammetrie. Die Unstetigkeit der Oberfläche spielt hier eine entscheidende Rolle.

Mit Hilfe der Autokorrelation können sich wiederholende Strukturen in den Bildern lokalisiert werden. Dabei spielen im Gegensatz zu den üblichen Punktzuordnungsverfahren andere Kriterien eine Rolle: Eine untergeordnete Rolle spielt die Robustheit des Verfahrens hinsichtlich unterschiedlicher Beleuchtung (in einem Bild weitgehend homogen), unterschiedlicher Rotation (bei linear wiederholten Strukturen) und Maßstäbe, während man um die relevanten Punkte und Linien mit unterschiedlichen Hintergründen rechnen muss.



Abb. 8: Bildanalyse zur Verfolgung einer Leitung über unterschiedlichen Hintergründen

Somit sucht man Bildverarbeitungsmethoden, welche robust sind hinsichtlich unterschiedlicher Hintergründe. Dies lässt sich am besten durch eine Vielzahl berücksichtigter Merkmale erreichen (Abb. 8). Wird manuell eine Startlinie für eine lineare Struktur festgelegt, kann das Bild parallel zu dieser Linie gedreht werden, so dass diese in Spaltenrichtung verläuft. Dann werden die Merkmale an einigen Startpunkten erfasst. Die gewählten Merkmale sind hier die Grauwertverteilung im Pan-Bild, in den vier Kanälen RGB und NIR, jeweils 4 Kompassgradienten sowie die Varianz im Pankanal, die Gradienten und die Varianz unter Verwendung einer 3×3 - und einer 7×7 -Matrix. Man erkennt deutlich, dass die Merkmale ausreichend dominant sind, um automatisch verfolgt zu werden.

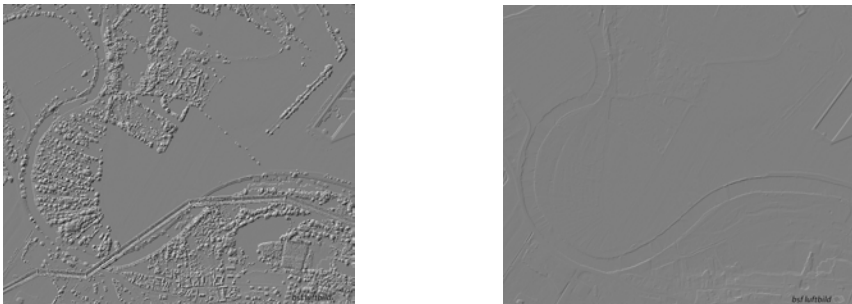


Abb.9 : Laserdaten einer Flussbiegung DSM (links) und DTM (rechts)

3.2 Laserdaten

Laserdaten lassen häufig in Bilddaten unsichtbare Strukturen wie die Uferlinien im DTM (Abb. 9) erkennen. Besonders wenn man die Analyse der Laserscannerdaten durch Bildinformation stützt, sind optimale Ergebnisse zu erwarten. Die in der Regel mangelnde Lageauflösung von Laserscannerdaten kann durch die genauere Lokalisierung von Unstetigkeitsstellen im Bildmaterial an Hand der Gradientenbilder erhöht werden. Somit werden Unstetigkeitsstellen in der Lage aus den Bildern ermittelt, in der Höhe aus den Laserscannerdaten. Zusammen lässt sich so eine teilautomatische 3D-Vektordatenerfassung realisieren.

4 Zusammenfassung

Die luftgestützte Sensorik dringt in Auflösungsbereiche und Datendichten vor, die bisher terrestrischen Anwendungen vorbehalten waren. Daher können die luftgestützten Methoden aus den terrestrischen Anwendungen sicherlich viele Ansätze übernehmen. Somit können die systematisch und effizient erfassten Luftbilddaten mit automatisierbaren Prozessen verschmolzen werden, was die photogrammetrische Effizienz weiter steigern wird.

5 Literaturverzeichnis

- BECKER, R., (2005): Differentialgeometrische Extraktion von 3D-Objektprimitiven aus terrestrischen Laserscannerdaten Veröffentlichungen der RWTH Aachen, Nr. 63, 2005.
- BENNING, W.; BECKER, R. & EFFKEMANN, C., (2004): Extraktion von Ecken, Kanten und Profilen aus Laserscannerdaten, gestützt durch photogrammetrische Aufnahmen. In : Luhmann, Thomas (Hrsg.), Photogrammetrie Laserscanning Optische 3D-Messtechnik, Wichmann, S. 213-220 (2004)
- GEBNER, A. & KRICKAU, H.-J., 2007: Verfahren zur Inspektion, Überwachung und Fehlerortung an Fernwärmeleitungen, AGFW-Seminar Dresden, 2007, http://www.envico-scandat.de/content/lectures/AGFW-Seminar%202007_19.4.2007.pdf
- LÜTHY, J.; INGENSAND, H. & STENGELE, R., 2005: Production Suite for Airborne Optical 3D Measurements, Wien, 2005
- MIESCHKE, A. & RIEKS, H.-J., 2001: As-built Anlagenvermessung in der chemischen Industrie. Photogrammetrie-Fernerkundung-Geoinformation, 1/2001, S. 53.-58.
- PRZYBILLA, H.-J. & WOYTOWIJCZ, D., 2004: Dokumentation industrieller Anlagen: Vom 2D-Bestandsplan über das GIS zur virtuellen Realität – eine Standortbestimmung. Photogrammetrie-Fernerkundung-Geoinformation, 1/2004, S. 53.-58.
- WENZEL, S., DRAUSCHKE, M. & FÖRSTNER, W., 2007: Detection and Description of Repeated Structures in Rectified Facade Images. PFG, 2007 Heft 7, S. 485-494.
- WIEDEMANN, A.; PETER, W. & SCHMITS, M., 2007: Möglichkeiten und Einschränkungen des kombinierten Einsatzes digitaler Luftbildkameras und luftgestützter Laserscanner. Deutsche Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung: Basel-Muttenz 2007, Band 16

Spatial Distribution of Stand Volume through Integration of Field Measurement and Remote Sensing Data: a Case Study of Tropical Rainforest in Central Indonesia

ARIEF WIJAYA¹ & RICHARD GLOAGUEN²

Abstract: Timbers are the main product of forests that vastly harvested for commercial purpose. Estimation of timber capacity based on stand volume approach was demonstrated in this study. Linear and nonlinear methods were used to see the predictive ability of these methods in estimating stand volume. Neural network method trained using Levenberg-Marquardt algorithm was implemented, whereas remote sensing data, vegetation indices and image transform data were applied as predictors. Ordinary kriging was used for interpolating stand volume estimate over the study area. This study found that predictive ability of neural network method outperformed multi-linear regression in estimating the stand volume.

1 Introduction

Timbers are the main forest resource that vastly harvested for commercial purpose. Harvesting of forest timber often violates the forest sustainable management principle, and on a great scale this might definitely cause deforestation and forest degradation; further it may affect global carbon cycle. Proper management practice on forest resource harvesting should be conducted in order to maintain sustainability of the forest, and obviously accurate and reliable information on timber capacity is urgently needed. Forest timber estimate may be approached from the volume of single tree, so called stand volume, and the result can be used to study forest stand volume within a region. This work aims to estimate the forest stand volume using field measurement and remotely sensed data considering a case study on a tropical rainforest in Central Indonesia.

Conventional multi-linear regression method has a lack in exhibiting spatial distribution of predicted variable as this method cannot attribute the geographical location of such variable. Stand volume is continuously distributed in the forest; therefore estimate of stand volume should consider other method, such as kriging, so as spatial prediction of stand volume can be observed. Moreover, predictive ability of multi-linear regression is at some extent questionable, particularly when data coming from different sources used as predictors; therefore as comparison a nonlinear least square method based on neural network was used to estimate the stand volume.

2 Study Area

This study considered Labanan concession forest in East Kalimantan, Central Indonesia. This area is geographically located along the equator at the coordinate of 1° 45' to 2° 10' N, and 116° 55' to 117° 20' E. The forest area is situated in a relatively flat region with the elevation from 50 - 650 meters above sea level and enjoys annual rainfall rate of about 2000 mm (MANTEL, 1998). The Labanan forest is categorized as a lowland dipterocarp forest and

¹ Faculty of Agricultural Technology, Gadjah Mada University, Jl. Sosio Yustisia 1, Bulaksumur, Yogyakarta, 55281, Indonesia; Email : Arief.Wijaya@student.tu-freiberg.de

² Remote Sensing Group, Institute for Geology, TU-Bergakademie, B. von-Cottastr. 2, 09599 Freiberg, Germany

currently is under adaptive collaborative management (ACM) to achieve sustainable management of the forest (WIJAYA et al., 2007). The topography is undulating to steeply rolling, raising from sea level in the east near the confluence of the Segah and Kelai river to over 500 m in the foothills of the mountains to the west of Labanan (see Fig. 1).

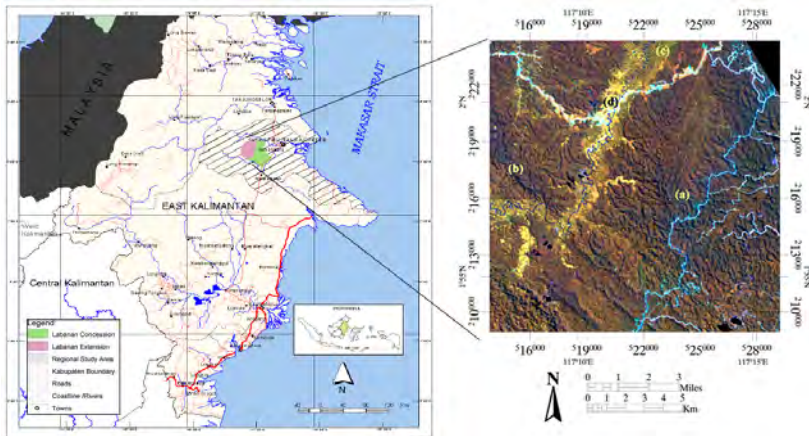


Fig. 1: The study area showing major land cover types: (a) logged over forest, (b) dense forest, (c) riparian forest and (d) clear cut forest/bare land

The entire concession area covers 83,300 ha; 54,600 ha under permanent production, 27,000 ha under limited production and 1,700 ha used for other purposes. Logging activities are carried out according to the Indonesian Selective Cutting and Planting (TPPT) silviculture system. Based on this system the Labanan concession area is divided into seven RKL's. Each RKL, representing a 5-year plan, is further divided into five annual coupes (RKT's). An average of 8 trees per ha are logged at 35 years interval; only commercial species with DBH = 50 cm are logged. Logging has been taking place progressively since 1976. Large parts of the natural forest in Labanan have already been logged over (RKL1 to 6), except for RKL7 and protected forest zone.

3 Data and Methods

3.1 Data

3.1.1 Satellite Image Preprocessing

Landsat 7 ETM+ image from May 31, 2003 was used for the study. The image, showing humid tropical rainforests in the study area, is very clear with almost no haze and clouds. The image was geometrically corrected using 30 ground control points with an error estimate of less than 1 pixel and resampled using nearest neighborhood method to minimize the change on spectral image histogram.

Although the acquired image shows almost no haze and clouds, atmospheric corrections and radiometric calibration on the satellite image were conducted as this study estimated vegetation indices. Remote sensing references have recommended for atmospheric corrections before the vegetation indices were estimated from a satellite data (JENSEN, 1996;

LILLESAND & KIEFER, 1994). Basically there are two approaches for atmospheric corrections, which are based on a complex radiative transfer function and image-based correction (SONG et al., 2001). The radiative transfer function correction needs field measurement data of atmospheric conditions during the image was acquired. This data may not be available for each region, like for this specific study area. Thus, a simple atmospheric correction based on satellite image was recommended for such case (FOODY et al., 2003). This study implemented the atmospheric corrections using a simple but accurate technique called Dark Object Subtraction (DOS) (CHAVEZ Jr., 1988). Various DOS approaches have been developed, and we may refer the implemented DOS technique as Cost-DOS or DOS2 techniques (SCHROEDER et al., 2006). The DOS approach assumed that dark objects exist in each image, e.g. dark vegetation and water body, thus the atmospheric corrections can be carried out by subtracting other pixels with these dark pixels. The atmospheric corrections were conducted for multi-spectral band of ETM data.

The effects due to different topographical illumination and terrain were corrected using C-Correction method assuming Lambertian surface, i.e. a surface with equal characteristics for transferring radiation energy (RIAÑO et al., 2003). The corrected image was used for estimating vegetation indices and estimating stand volume on the study area.

3.1.2 Field Inventory Data Preparation

The field inventory data consists of biophysical properties of forest stand were made available for the purpose of this study. The data were collected on 1997-1998 in 17 transects as a series of inventory data from concession management. There are 1515 circular sampling plots (each has size of 500 m²) measuring tree diameter at breast height (DBH), basal area, and number of stems. Stand volume was estimated based on volume equation considering basal area and conversion factor of each vegetation species. Instead of using complete dataset, care was taken for selecting particular field data which corresponds with spectral data as we experienced by taking complete dataset the correlation between stand volume and ETM data was not significant.

Most studies confirmed that forest stand properties as well as forest biomass, e.g. above ground biomass, have high correlation with near-infra red (NIR) and middle-infra red (MIR) bands of ETM data (FOODY et al., 2003; LU et al., 2004). These studies as well as other remote sensing references commonly correlate bright pixels of ETM NIR and MIR bands with dense vegetation and forested land on the ground.

In this study data selection process was conducted based on the correlation between NIR Band (ETM Band 4) and stand volume data; this forest property was selected as we proposed to estimate the stand volume using combination of remote sensing and field data. The following explains a simple and effective data pruning approach implemented for this study. Stand volume data and their correspond NIR band pixel values were plotted and simple linear regression was predicted upon the observation on plotted data. For each sample plot, stand volume was estimated using the regression equation and along its major diagonal axis, the actual stand volume within ± 2 standard deviation (SD) were selected. The particular case was for stand volume corresponds to NIR band values ranged from 17 to 30 (surface reflectance were multiplied by 100 for the convenience of data representation), the stand volume data was pruned more selectively, while most stand volume correspond to this NIR band interval. The actual stand volume within this NIR band interval should have values between $\pm 0.2 \cdot SD$ and $\pm 1 \cdot SD$ along the major axis. We assessed the data pruning results by comparing the mean and standard deviation of the actual stand volume and ETM NIR band from the complete dataset and its subset. If the data were selected effectively, the variable in the resulted subset should have similar mean and standard deviation as in the full dataset, i.e. each variable in the

subset explains similar phenomena as its full dataset. The stand volume dataset was selected using Pearson correlation test, and there were 76 representative sample plots ($R=0.838$, $\alpha=0.01$, 1-tailed test) selected in the data subset.

3.2 Methods

3.2.1 Levenberg-Marquardt Neural Network

Neural network basically is a network with interconnected neurons trained using certain algorithm to find the optimum solution that minimizes error estimate (WIJAYA, 2006). Different types of neural network have been developed, and feed forward neural network is probably amongst the most popular (ATKINSON & TATNALL, 1997). Feed forward neural network trained with back-propagation algorithm is commonly used for many applications (BOLANCA et al., 2005; LERNER et al., 1999; LIM & KIRKOSHI, 2005). Unfortunately, in order to find an optimal solution the network training needs a great number of iterations which is time expensive and an excessive experiment for selecting proper algorithm parameters. Other algorithms providing faster training are available, but these algorithms are not as popular as the back-propagation algorithm. This study experimented with a feed forward neural network trained using Levenberg-Marquardt algorithm and the network has a three-layer-architecture, so-called multi-layer neural network.

The Levenberg-Marquardt algorithm is an iterative technique that locates the minimum of a function that is expressed as the sum of squares of nonlinear functions (HAGAN & MENHAJ, 1994). It becomes a standard technique for nonlinear least-squares problems and can be thought of as a combination of steepest descent and the Gauss-Newton method. When the current solution is far from the correct one, the algorithm behaves like a steepest descent method: slow, but guaranteed to converge. When the current solution is close to the correct solution, it becomes a Gauss-Newton method.

Given a function $F(x)$ that is a sum of squares of nonlinear functions,

$$F(x) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m [f_i(x)]^2 \tag{Eq. 1}$$

to find the minimum of function $F(x)$, the Jacobian of $f_i(x)$ be denoted $J_i(x)$, and the Levenberg-Marquardt method searches in the direction given by the solution p to the equation

$$(J_k^T J_k + \lambda_k I) p_k = -J_k^T f_k \tag{Eq. 2}$$

where λ_k are nonnegative scalars and I is the identity matrix. The method has a nice property that for some scalar λ related to λ_k , the vector p_k is the solution of the constrained sub-

problem of minimizing $\|J_k^T p + f_k\|_2^2 / 2$ subject to $\|p\|_2 \leq \Delta$.

3.2.2 Vegetation Indices

Various vegetation indices may be computed from satellite image data. These vegetation indices were proposed for different applications, such as soil moisture, vegetation condition, mineral deposits, etc (JENSEN, 1996). Our analysis mentioned that looking at the advanced developed of

Tab. 1: Vegetation indices used in this study

Vegetation Indices	Formula
Simple ratio	
ETM 4/3	$ETM4/ETM3$
ETM 5/3	$ETM5/ETM3$
ETM 5/4	$ETM5/ETM4$
ETM 5/7	$ETM5/ETM7$
ETM 7/3	$ETM7/ETM3$
Normalized vegetation indices	
NDVI	$(ETM4 - ETM3)/(ETM4 + ETM3)$
ND53	$(ETM5 - ETM3)/(ETM5 + ETM3)$
ND54	$(ETM5 - ETM4)/(ETM5 + ETM4)$
ND57	$(ETM5 - ETM7)/(ETM5 + ETM7)$
ND32	$(ETM3 - ETM2)/(ETM3 + ETM2)$
Complex vegetation indices	
ARVI	$(NIR + 2RED + BLUE)/(NIR + 2RED - BLUE)$
EVI	$2.5 \times (NIR - RED)/(NIR + 6RED - 7.5BLUE + 1)$
SAVI	$(NIR - RED) \times (1 + L)/(NIR + RED + L)$
MSAVI2	$((2NIR + 1) - \sqrt{(2NIR + 1)^2 - 8(NIR - 2RED)})/2$
GEMI	$\varepsilon(1 - 0.25\varepsilon) - (RED - 0.125)/ (1 - RED)$
	where
	$\varepsilon = (2(NIR^2 - RED^2) + 1.5NIR + 0.5RED)/(NIR + RED + 0.5)$
Image transform	
VIS123	$ETM1 + ETM2 + ETM3$
MID57	$ETM5 + ETM7$
ALBEDO	$ETM1 + ETM2 + ETM3 + ETM4 + ETM5 + ETM7$

vegetation indices, in the future perhaps vegetation indices would be simply a digital number without any reasonable meanings and correlation with objects measured on the ground. This study however demonstrated how the use of existing vegetation indices, especially those which proposed for monitoring vegetation, can be useful for estimating stand volume. Tab. 1 explains the vegetation indices used as variables in this study.

Besides vegetation indices and image transform explained in Tab. 1, we computed other image transforms based on principal component analysis (PCA) and tasseled cap (TC). Three

PCA bands, namely PC1, PC2 and PC3, as well as other three TC bands, namely brightness (TC1), greenness (TC2) and wetness (TC3) were also used as variables in this study.

4 Results and Discussion

4.1 Correlation between Image Spectral and Biophysical Data

The correlation between satellite image, vegetation indices and forest biophysical data, i.e. diameter at breast height (DBH), number of stems, basal area and stand volume were measured using one tail Pearson correlation test and the results were shown in Tab. 2.

Tab. 2: Correlation of Satellite Data and Vegetation Indices with Stand Properties

Variable	DBH	Number of Stems	Basal Area	Stand Volume	Variable	DBH	Number of Stems	Basal Area	Stand Volume
B1	.300(**)	.400(**)	.271(**)	.197(*)	ND32	.038	.151	-.081	-.182
B2	.317(**)	.392(**)	.310(**)	.269(**)	ARVI	.037	-.164	.210(*)	.313(**)
B3	.274(**)	.377(**)	.247(*)	.188	EVI	.317(**)	.093	.579(**)	.689(**)
B4	.552(**)	.419(**)	.778(**)	.839(**)	SAVI	.322(**)	.101	.602(**)	.719(**)
B5	.350(**)	.411(**)	.444(**)	.419(**)	MSAVI2	.358(**)	.124	.629(**)	.748(**)
B7	.261(*)	.374(**)	.291(**)	.240(*)	GEMI	.433(**)	.231(*)	.731(**)	.837(**)
SR	.086	-.131	.248(*)	.368(**)	VIS123	.296(**)	.390(**)	.275(**)	.219(*)
SR53	.086	-.052	.289(**)	.396(**)	MID57	.318(**)	.400(**)	.388(**)	.352(**)
SR54	.182	.308(**)	.215(*)	.166	ALBEDO	.412(**)	.446(**)	.501(**)	.482(**)
SR57	.042	-.080	.237(*)	.300(**)	PC1	.484(**)	.457(**)	.638(**)	.649(**)
SR73	.055	-.011	.170	.247(*)	PC2	-.037	-.238(*)	.071	.168
NDVI	-.026	-.215(*)	.125	.223(*)	PC3	-.027	.062	.062	.049
ND53	.134	-.019	.352(**)	.443(**)	TC1	.477(**)	.461(**)	.607(**)	.610(**)
ND54	.187	.303(**)	.240(*)	.199(*)	TC2	.283(**)	.035	.529(**)	.651(**)
ND57	.154	-.020	.329(**)	.404(**)	TC3	-.293(**)	-.378(**)	-.372(**)	-.340(**)

** Correlation is significant at the 0.01 level (1-tailed)

* Correlation is significant at the 0.05 level (1-tailed)

Considering selected sample plot data in the correlation analysis, we found ETM band 4 and some vegetation indices, namely EVI, SAVI, MSAVI2, GEMI yield a relatively high correlation with stand volume ($R > 0.60$, $\hat{\alpha} = 0.01$, 1-tailed test). Similar results are also shown by some image transform data, i.e. PC1, TC1 (brightness) and TC2 (greenness). Given the results on Tab. 2, other Landsat ETM bands are less correlated with stand properties data, except for ETM band 4. For further analysis, we excluded ETM band 4 data for stand volume prediction, while this band, as expected, has a high correlation with stand volume due to its use on the data pruning process.

Various regression equations can be developed attributing different combinations of these spectral data and vegetation indices. Optimization of data combination in estimating stand volume or other stand properties is beyond the scope of this study. In this study, we simply chose combination of ETM spectral bands, except ETM band 4, for estimating stand volume. The regression equation and estimation of stand volume using neural network were modeled using combination of ETM band 12357 and number of stems data.

4.2 Estimation and Spatial Distribution of Stand Volume

4.2.1 Multi-linear Regression Approach

Modeling of multi-linear regression considered ETM band 12357 and number of stems as predictors and stand volume as dependent variable. Linear relationship between predictors and dependent variable was computed and the result shows that 54.1% of stand volume estimate can be explained by the predictors. Given the result of analysis of variance (ANOVA) in Tab. 3, the computed regression is significant ($F_{test} = 16.5$, $\hat{\alpha}=0.01$), and the Durbin-Watson test confirmed that no first-order autocorrelation presence in the residuals of the equation ($D_{test}=1.749$, $N=76$, $K=5$, $d_L=1.51900$, $d_U=1.73985$, $\hat{\alpha}=0.05$).

Tab. 3: Regression Model Statistics

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate	Change Statistics					Durbin-Watson
					R Square Change	F Change	df1	df2	Sig. F Change	
1	.736 ^(a)	.541	.508	36.83230	.541	16.500	5	70	.000	1.749

^(a)Predictors: (Constant), B1, B2, B3, B5, B7

The coefficients of regression model were obtained and a linear equation could be formed accordingly (see Tab. 4). Unfortunately, statistical test of significance found that ETM band 1, band 2 and band 3 were not significant if they were applied separately for estimating stand volume ($\hat{\alpha}_{test} > 0.05$). Further study should be conducted to find optimal predictors of stand volume using other input data, such as vegetation indices as computed in this study or other forest parameters, e.g. basal area.

Tab. 4: Coefficients of Regression Equation

Model	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients (Beta)	t	Sig.
	Beta	Std. Error			
(Constant)	151.788	22.875		6.636	.000
B1	-3.288	13.533	-.079	-.243	.809
B2	14.703	12.250	.685	1.200	.234
B3	-9.136	6.684	-.622	-	.176
B5	20.638	3.168	2.272	6.515	.000
B7	-27.333	5.360	-1.925	-	.000
				5.099	0

4.2.2 Levenberg-Marquardt Neural Network Method

Prediction of stand volume using neural network method was implemented applying Levenberg-Marquardt algorithm for training the network. Standard back-propagation algorithm was also used as comparison. Landsat ETM band 123457, vegetation indices, image transform products, and combination of these data were used as input for neural networks. For each input data, estimation of stand volume was repeated for four times and

mean estimate was recorded accordingly. Predictive ability of both algorithms in estimating stand volume was assessed using mean square error (MSE) and correlation between the actual and the estimated stand volume was plotted. The results show that Levenberg-Marquardt algorithm outperformed back-propagation algorithm in estimating stand volume. We also observed that back-propagation algorithm needs more iterations than Levenberg-Marquardt for resulting similar accuracy.

Tab. 5: Error estimates of stand volume prediction

Training Algorithm	#	ETM bands		Number of stems		ETM bands and Number of stems	
		Correlation	MSE	Correlation	MSE	Correlation	MSE
Back-propagation	1	0.67	0.078	0.44	0.128	0.74	0.057
	2	0.75	0.048	0.46	0.094	0.74	0.054
	3	0.30	0.078	0.36	0.146	0.63	0.060
	4	0.84	0.038	0.69	0.060	0.80	0.046
Mean		0.64	0.060	0.49	0.107	0.73	0.054
Levenberg-Marquardt	1	0.81	0.031	0.68	0.052	0.88	0.018
	2	0.83	0.029	0.49	0.069	0.87	0.018
	3	0.88	0.021	0.64	0.059	0.89	0.026
	4	0.87	0.021	0.54	0.069	0.91	0.009
Mean		0.85	0.026	0.59	0.062	0.89	0.018

Provided the results of correlation between actual and predicted stand volume (Tab. 5), combination of ETM bands and number of stems ($R_{\text{mean}}=0.89$, $\text{MSE}=0.018$) provides better estimate accuracy than ETM bands ($R_{\text{mean}}=0.85$, $\text{MSE}=0.026$) and number of stems ($R_{\text{mean}}=0.59$, $\text{MSE}=0.062$).

Compared with multi-linear regression, Levenberg-Marquardt neural network shows better predictive ability, i.e. lower error estimate; thus interpolation of stand volume over the study area implemented the volume estimate that was predicted using the neural network method.

4.2.3 Spatial Distribution of Stand Volume

Distribution of stand volume over the study area is exhibited on Fig. 2. The spatial distribution was estimated using Kriging after calculating semivariogram model of predicted stand volume. The interpolation was done using ordinary kriging with an assumption that mean stand volume is unknown, and the result is acceptable in terms of prediction error and the spatial distribution of the estimated value. In general, we found high stand volume on the areas which have not been harvested, while low stand volume found on the areas which are close to road access and main rivers, as well as those which already been harvested. This means the presence of secondary forest is noticeable, only in some small areas the volume estimate was not accurate.

Provided the interpolation result, the stand volume in the study area is varying from 66 – 355 m^3/ha and the error estimate ranged from 38 – 47 m^3/ha . Levenberg-Marquardt neural network obtained $256 \pm 46 \text{ m}^3/\text{ha}$ of estimated stand volume over the study area, while based on field measurement data $253 \pm 53 \text{ m}^3/\text{ha}$ of stand volume were found in the study area. We can say that the predictive ability of neural network trained using Levenberg-Marquardt in estimating stand volume has resulted in a reasonable results, thus the possibility to implement this method for other applications is greatly encouraged.

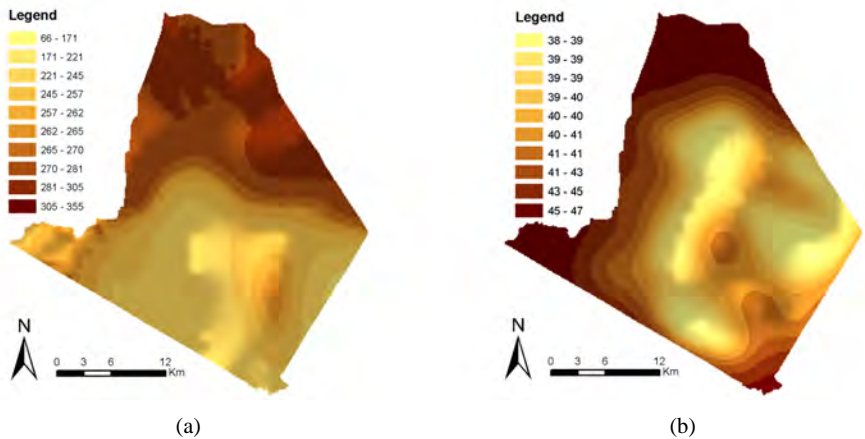


Fig. 2: Interpolation using ordinary kriging: (a) map of stand volume estimate (m³/ha) and (b) standard error map

5 Conclusion and Recommendations

Data selection or data pruning is a common technique for selecting outliers and uncorrelated data, however one have to be sure that variables used to prune the sample data, either based on common agreement or the results of previous research, were correlated one each other. This study selected forest inventory data to correlate with NIR band of Landsat ETM data, as most remote sensing studies and references confirmed a significant correlation between NIR band and vegetation properties, e.g. stand volume.

Provided the results of stand volume estimate and its error, predictive ability of Levenberg-Marquardt neural network outperformed multi-linear regression, thus the earlier method was used to interpolate spatial distribution of stand volume over the study area. The interpolation was conducted using ordinary kriging, and we found the results are generally acceptable, except for some small areas. This study found 256 ± 46 m³/ha of predicted stand volume estimated using Levenberg-Marquardt neural network. This result is similar with the actual stand volume which is 253 ± 53 m³/ha.

Further study may be conducted; particularly to prune sample data more efficiently so that more data is obtained. Experiments with different vegetation indices as predictors for various stand properties, e.g. basal area, diameter at-breast height (DBH) or even forest biomass, should be considered.

6 References

- ATKINSON, P.M. & TATNALL, A.R.L., 1997. Introduction Neural networks in remote sensing. *International Journal of Remote Sensing*, 18(4): 699-709.
- BOLANCA, T.; CERJAN-STEFANOVIC, S. & NOVIC, M., 2005. Application of Artificial Neural Network and Multiple Linear Regression Retention Models for Optimization of

- Separation in Ion Chromatography by Using Several Criteria Functions. *Chromatographia*, 61(3): 181-187.
- CHAVEZ JR., P.S., 1988. An Improved Dark-Object Subtraction Technique for Atmospheric Scattering Correction of Multispectral Data. *Remote Sensing of Environment*, 24: 459-479.
- FOODY, G.M.; BOYD, D.S. & CUTLER, M.E.J., 2003. Predictive relations of tropical forest biomass from Landsat TM data and their transferability between regions. *Remote Sensing of Environment*, 85(4): 463-474.
- HAGAN, M.T. & MENHAJ, M.B., 1994. Training feedforward networks with the Marquardt algorithm. *Neural Networks, IEEE Transactions on*, 5(6): 989-993.
- JENSEN, J.R., 1996. *Introductory Digital Image Processing : A remote Sensing Perspective*. Prentice Hall.
- LERNER, B.; GUTERMAN, H.; ALADJEM, M. & DINSTEIN, I., 1999. A comparative study of neural network based feature extraction paradigms. *Pattern Recognition Letters*, 20(1): 7-14.
- LILLESAND, T.M. & KIEFER, R.W., 1994. *Remote Sensing and Image Interpretation*. John Wiley & Sons, Inc.
- LIM, C.W. & KIRIKOSHI, T., 2005. Prediction of Promotional Effect Using Neural Network Modeling. *Journal of Pharmaceutical Marketing and Management*, 16: 3-26.
- LU, D.; MAUSEL, P.; BRONDIZIO, E. & MORAN, E., 2004. Relationships between forest stand parameters and Landsat TM spectral responses in the Brazilian Amazon Basin. *Forest Ecology and Management*, 198(1-3): 149-167.
- MANTEL, S., 1998. *Soil and Terrain of the Labanan Area: Development of an environmental framework for the Berau Forest Management Project.*, Berau Forest Management Project, Berau.
- RIAÑO, D.; CHUVIECO, E.; SALAS, J. & AGUADO, I., 2003. Assessment of Different Topographic Corrections in Landsat-TM Data for Mapping Vegetation Types. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(5): 1056 - 1061.
- SCHROEDER, T.A.; COHEN, W.B.; SONG, C.; CANTY, M.J. & YANG, Z., 2006. Radiometric correction of multi-temporal Landsat data for characterization of early successional forest patterns in western Oregon. *Remote Sensing of Environment*, 103(1): 16-26.
- SONG, C.; WOODCOCK, C.E.; SETO, K.C.; LENNEY, M.P. & MACOMBER, S.A., 2001. Classification and change detection using Landsat TM data: When and how to correct atmospheric effects? *Remote Sensing of Environment*, 75(2): 230-244.
- WIJAYA, A., 2006. Comparison of soft classification techniques for forest cover mapping. *Journal of Spatial Science*, 51(2): 7-18.
- WIJAYA, A.; MARPU, P.R. & GLOAGUEN, R., 2007. *Geostatistical Texture Classification of Tropical Rainforest in Indonesia (in CD ROM)*, ISPRS International Symposium on Spatial Data Quality, ITC Enschede, The Netherlands.

Geodateninfrastruktur

- Operationelle Koordinierung der GDI-Niedersachsen im Kontext von INSPIRE und GDI-NI

ROLF UEBERHOLZ¹

1 Zusammenfassung

Der Aufbau von Geodateninfrastrukturen ist unverzichtbarer Bestandteil der Informations- und Kommunikationsgesellschaft und von nachgewiesenem Nutzen für Verwaltung, Wirtschaft und Bürger. GDI umfasst alle technologischen, politischen und institutionellen Maßnahmen, die sicherstellen, dass Methoden, Daten, Technologien, Standards sowie finanzielle und personelle Ressourcen zur Gewinnung und Anwendung von Geoinformationen entsprechend den Bedürfnissen der Wirtschaft zur Verfügung stehen.

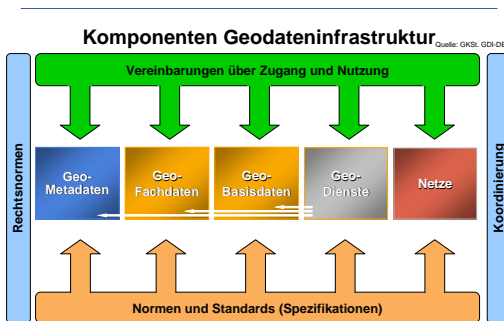


Abb. 1: Komponenten Geodateninfrastruktur

Der Vortrag stellt zunächst den Aufbau der Geodateninfrastruktur Niedersachsen (GDI-NI) im Kontext von INSPIRE und GDI-Deutschland (GDI-DE) vor, benennt die politischen, fachpolitischen und fachtechnischen Positionen und Aktivitäten und unterstreicht den Aufbau der GDI-Deutschland als gemeinsame Aufgabe von Bund, Ländern und Kommunen.

¹⁾ Rolf Ueberholz, Landesvermessung und Geobasisinformation Niedersachsen, Podbielskistr. 331, 30659 Hannover; E-Mail: rolf.ueberholz@lgn.niedersachsen.de

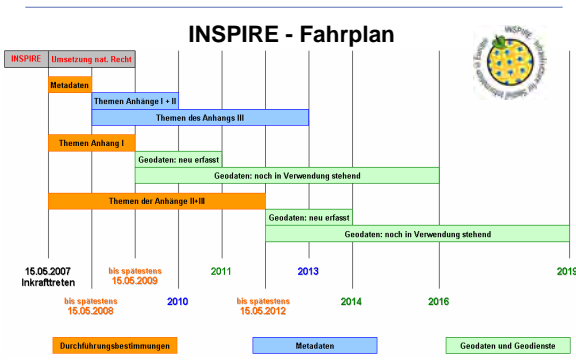


Abb. 2: INSPIRE - Fahrplan

Anschließend werden die Beschlüsse des Niedersächsischen Landtages vom 11.12.2002 und der Niedersächsischen Landesregierung vom 14.12.2004 und 29.11.2005 zum Aufbau der Geodateninfrastruktur Niedersachsen dargestellt. Schwerpunkte des Vortrags sind die Handlungsfelder sowie die Möglichkeiten und der Nutzen der GDI-NI. Dabei wird auf die Einbeziehung von Kommunen, Wirtschaft und Wissenschaft sowie auf grenzüberschreitende Pilotprojekte (X-Border GDI, GDI-MRH) und das Projekt zur GDI-konformen Bereitstellung und Nutzung von Laserscandaten eingegangen.

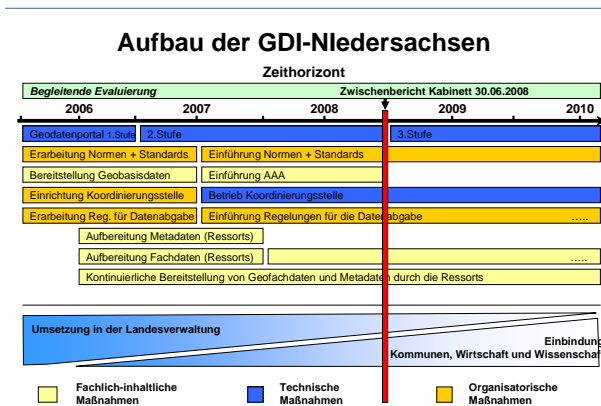


Abb. 3: Aufbau der GDI-Niedersachsen

Die fachlich-inhaltlichen, die organisatorischen und technischen Maßnahmen sowie die Realisierungsstufen und die Zeitplanung werden vorgestellt. Die Umsetzung der GDI-NI wird vom Lenkungsausschuss GDI-NI strategisch gesteuert und von allen Beteiligten unter operationeller Koordination der Koordinierungsstelle GDI-Niedersachsen, die beim Landesbetrieb für Landesvermessung und Geobasisinformation Niedersachsen (LGN) eingerichtet ist, aufgebaut.

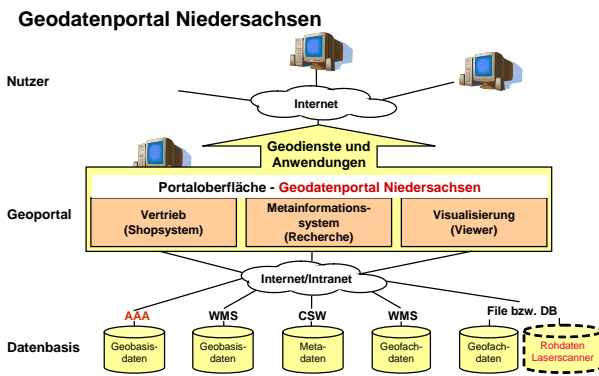


Abb.4: Geodatenportal Niedersachsen

Arbeitsschwerpunkte sind der Aufbau des Geodatenportals Niedersachsen, die Erarbeitung und Festlegung von Standards und Normen (Applikationsprofile), die Bereitstellung und Aufbereitung GDI-konformer Geobasisdaten, Geofachdaten und Metadaten sowie die begleitenden Evaluierungsmaßnahmen. Zum 30.06.2008 wird der Niedersächsischen Landesregierung ein weiterer Evaluierungsbericht vorgelegt.

Messungen von Landabsenkungen im Kashmar Tal, NE Iran, unter Verwendung von Satelliten Radar Interferometrie

JAN ANDERSSOHN¹, HANS-ULRICH WETZEL², THOMAS WALTER² & MAHDI MOTAGH²

Zusammenfassung: Flüssigkeitsspeicher Systeme wie Öl, Gas, Magma oder Wasserreservoirs sind oft kontrolliert durch Gesteinsstrukturen und Störungen im Untergrund. In Sedimentbecken, wo keine direkten Informationen über die tiefer liegenden Strukturen verfügbar sind, erlauben Muster von Oberflächendeformationen eine Abschätzung der verdeckten Blockstrukturen. Wir liefern ein Beispiel aus einem semi-ariden Gebiet des Irans, dem Kashmar Tal, wo bedingt durch Überabpumpung des Grundwassers Landabsenkung eintritt. Geodätisch bestimmte Absenkungsraten mittels Satelliten Radar Interferometrie und Nivellementmessungen im Kashmar Tal ergeben Werte 15 – 30 cm pro Jahr. Das Muster der Oberflächendeformation ist stark ungleichmäßig und weist eine NE-SW gestreckte linsenförmige Verbreitung auf. Diese Verteilung ähnelt stark alten regionalen Kreide-Tertiär Blockstrukturen, die während früherer alpiner tektonischer Deformationen entstanden. Obwohl die frühen alpinen Störungen als nicht aktiv betrachtet werden, zeigen die gemessenen Landabsenkungsmuster eine deutliche strukturelle Kontrolle der Geometrie des Grundwasserbeckens und des Deformationsverhaltens während der Drainage. Diese Studie diskutiert, dass das Muster der Absenkung verdeckte Strukturen unterhalb oder innerhalb des Grundwasserspeichers abbildet.

1 Einleitung

Grundwasserreservoirs in ariden und semiariden Gebieten unterliegen häufig intensiver und unkontrollierter Grundwasserübernutzung. Im Mittleren Osten teilen sich ungefähr 5% der Weltbevölkerung weniger als 1% des verfügbaren Frischwassers. Somit wurde Wasser zu einer bedeutenden ökonomischen und strategischen Ressource (OREN 2002). Viele der Grundwasserspeicher im Mittleren Osten sind tiefsitzende Grundwasserleiter aus der Kreide- oder Triaszeit und haben zu erwartende Wiederauffüllraten in der Größenordnung von mehreren 1000 Jahren (BEAUMONT et al. 1988). Sie werden daher oft als nicht erneuerbare Ressourcen betrachtet.

¹ Jan Anderssohn, GeoForschungsZentrum Potsdam, Department 1, Section 1.4 Remote Sensing, Telegrafenberg A17, D-14473 Potsdam, e-mail: calypso@gfz-potsdam.de

² GeoForschungsZentrum Potsdam, Deutschland

Im Iran wird die landwirtschaftliche Bewässerung als Hauptgrund für Grundwasserübernutzung und messbare Schrumpfung der Grundwasserspeicher angenommen (LONGFIELD 1932, TOLMAN & POLAND 1940, POLAND & DAVIS 1969). Dem WHO Joint Monitoring Programme (2002) zufolge haben ca. 5.6 Millionen Iraner derzeit keinen Zugang zu sauberem Trinkwasser. 60% der Landfläche des Irans liegen in ariden bzw. semi-ariden Regionen. Wassermangel verhindert weitere Ausdehnung der Landwirtschaft und ökonomischer Aktivitäten (MODARRES 2007). Verbunden mit starker Wasserentnahme kann die Kompaktion des Grundwasserleitersystems, bedingt durch eine Überlastung des Kapillargefüges einhergehen. Wenn die Wiederfüllrate kleiner als die Entnahmerate ist, kann die Landabsenkung irreversible werden (SNEED et al. 2003) und es kann zu Einschränkungen der Landwirtschaft kommen, welche stark abhängig vom Grundwasser ist (POLAND 1984). Außerdem können grundwasserbedingte Landabsenkungen zu signifikanten Schäden der Infrastruktur führen (FIEDLING et al.). Die jährlichen Kosten der Wasserdegradation im Iran belaufen sich auf 2,82% vom BIP. 10% davon sind Kosten die auf Zerstörungen durch Aquifer-Abpumpungen entfallen (WORLD BANK 2005). Die verfügbare Wassermenge pro Einwohner zeigt eine drastische Reduktion von 5.800 m³ in 1965 zu 1.910 m³ in 2001. Extrapoliert daraus kann 2025 jeder Einwohner nur noch über 1.000 m³ (WORLD BANK 2005) verfügen.

Bedingt durch den aktuellen Mangel an Absenkungs-Monitoring-Systemen, sind keine verlässlichen Informationen über die Geschwindigkeiten und Ausdehnungen von Absenkungen in den Grundwasserbecken des Iran vorhanden. Verschiedene Studien haben mit zunehmender Genauigkeit das große Potential für räumlich-zeitliche Detektion und Überwachung von grundwasserbedingten Deformationen mit Hilfe der geodätischen InSAR-Methode (Interferometric Synthetic Aperture Radar) gezeigt (GALLOWAY et al. 1988, AMELUNG et al. 1999, GALLOWAY et al. 2000, LU & DANSKIN 2001, HOFFMANN et al. 2003, MOTAGH et al. 2007). Verglichen mit terrestrischen Beobachtungstechniken von Wasserreservoirien und auch an Bohrungen (z.B. Piezometrie, Nivellement, Pegel) bietet InSAR die Möglichkeit flächenhafte, zeitliche und sub-cm genaue Ergebnisse zu liefern. Daher ist InSAR ein besonders geeignetes Werkzeug zur Beobachtung und Überwachung von Deformationen, besonders für beeinträchtigte Gebiete mit einer Ausdehnung von mehren 100 km².

Wir untersuchten das Kashmar-Tal im Nordosten des Irans, ungefähr 220 Kilometer südlich der Provinzhauptstadt Mashhad und präsentieren eine detaillierte Studie über das Muster und die Entwicklung der dortigen Landabsenkung (InSAR, Nivellementmessungen, multispektrale Fernerkundung).

Das Quartärbecken von Kashmar streicht etwa Ost-West und hat eine Länge von ca. 100 km bei einer Breite von 25 km. Die Stadt Kashmar befindet sich am östlichen Ende des Tals hat etwa 70.000 bis 180.000 Einwohner. Das Kashmar-Tal ist in den vergangenen Jahrzehnten für den Anbau von Weintrauben und für die Produktion von Pistazien und Rosinen bekannt geworden.

Die deutliche Zunahme der Vegetationsverbreitung (rot) in den Jahren von 1972, über 1987 und bis 2000 ist bei den Farbkompositdarstellungen (Abb. 1) ebenso gut zu erkennen, wie die Vergrößerung der Stadtflächen von Kashmar (grau).

Das Iranische Metrologische Wetterarchiv (IRIMO 2006) zeigt für die Stadt Kashmar von 1988 bis 2006 eine leichte Abnahme des jährlichen Niederschlages um ca. 57mm und eine leichte Zunahme der Durchschnittstemperatur um ca. 1,3°C,

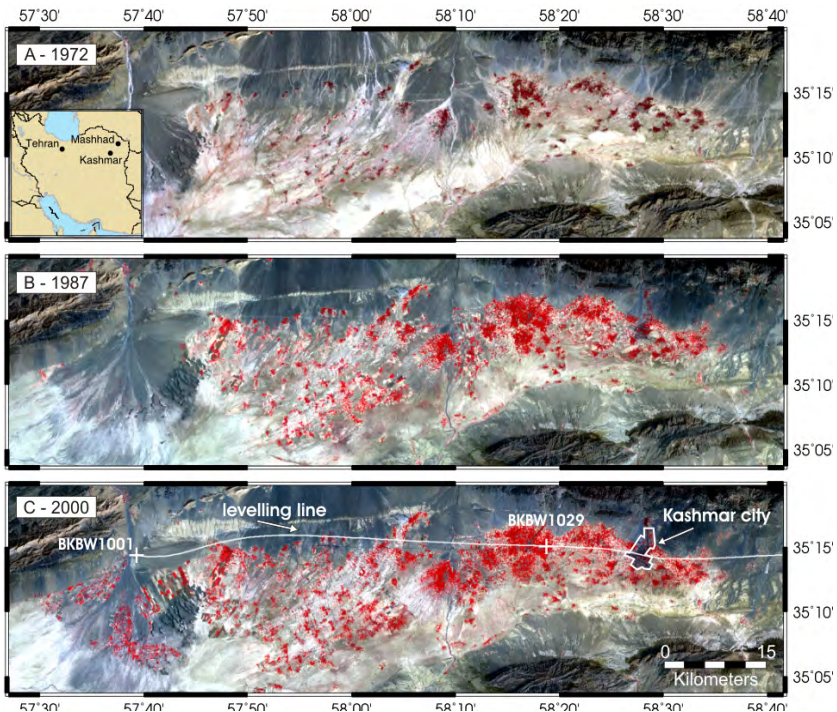


Abbildung 1: Landsat MSS, TM und ETM+ Farbkomposite verschiedener Zeitpunkte **A)** Oktober 1972, **B)** August 1987 und **C)** September 2000. Die roten Pixel stellen die vitale Vegetation dar. Durch die langfristig verfügbaren Landsat-Daten kann ein signifikanter Anstieg der Vegetationsverbreitung während der letzten 35 Jahre nachgewiesen werden. Die weiße Linie in **C)** zeigt die Lage der Nivellementmessungen.

Die genannten Faktoren bestätigen die Annahme eines gestiegenen Grundwasserbedarfes. Hinzu kommt laut WORLD BANK 2005 die gestiegene Grundwasserentnahme im Iran von 20 Billionen m^3 im Jahre 1960 auf mehr als 53 Billionen m^3 in 2002-2003. Gemittelte Grundwassermessungen an piezometrischen Bohrlöchern im Kashmar-Tal ergaben Grundwasserspiegelabsenkungen von ca. 70 cm pro Jahr.

2 Messmethoden zur Detektion und Quantifizierung der Landabsenkung

Es wurden Fernerkundungsdaten (SAR Daten) des ENVISAT Satelliten genutzt, welche eine Auflösung von ungefähr 20 m und eine Abdeckung von 100 x 100 km^2 haben. 22 SAR SLC Daten konnten für den Zeitraum zwischen Juli 2003 und März 2006 analysiert werden. Zur

Prozessierung der SAR Daten nutzen wir eine 2-pass InSAR Methode (MASSONET & FEIGEL 1998), implementiert im Software Packet SARscape (www.sarmap.ch). Zur Korrektur der Topographie wurden die 90m-SRTM-Daten verwendet (<http://srtm.usgs.gov>). Bedingt durch eine gute Kohärenz, dem 35 Tage Rekurrenzintervall von ENVISAT, sowie durch das Vorhandensein kleiner Basislinien konnten 22 Interferogramme prozessiert werden. Für Zeitspannen größer als ~200 Tage ging die Kohärenz der Interferogramme verloren. Bodendeformationen gemessen durch das InSAR-Verfahren werden in sogenannten Fringes (Farbzyklen) dargestellt. Jeder Fringe repräsentiert eine Verschiebung in Blickrichtung des Satelliten von 2.8 cm. Abbildung 2 zeigt vier ausgewählte Interferogramme für verschiedene Zeitspannen. Unter Verwendung aller geeigneten Daten konnte die zeitlich-räumliche Entwicklung der Landabsenkung bestimmt werden.

Das National Cartographic Center of Iran (NCC) führte im Zeitraum 1993-2003 zwei Nivellemtmesskampagnen im Kashmar-Tal durch, welche zur Validierung der Fernerkundungsdaten genutzt werden können. In Abbildung 1c ist der Verlauf des Nivellements als weiße Linie zu erkennen. Die Ergebnisse des Nivellements können mit InSAR Ergebnissen verglichen werden.

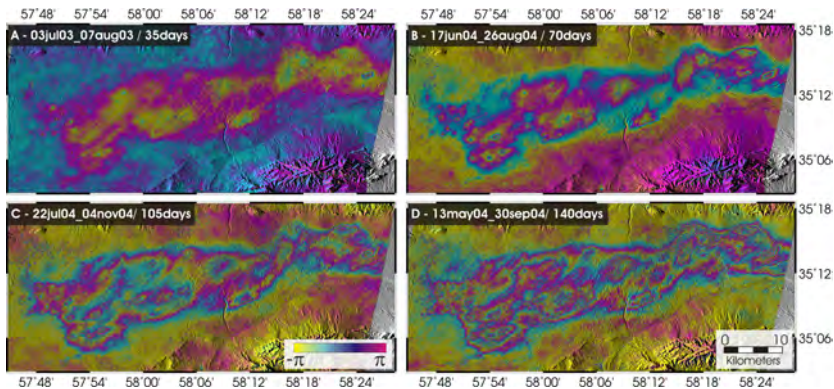


Abbildung 2: Vier beispielhafte Interferogramme mit verschiedenen Zeitspannen (A – 35, B – 70, C – 105, D - 140). Die Entwicklung der Deformationsmuster im Laufe der Zeit ist deutlich erkennbar. Es zeigt sich das die Menge der Absenkung zunimmt, jedoch die räumliche Ausdehnung stabil bleibt.

Als dritte Methode verwendeten wir Daten des passiven Medium Resolution Imaging Spectrometer (MERIS) Instruments, welche Abschätzung der atmosphärischen und troposphärischen Bedingungen ermöglicht. Außerdem kann mit Hilfe der MERIS-Daten der Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) bestimmt werden. Dieser kann Aufschluss über die Veränderung der Vegetation im Untersuchungsgebiet geben. Atmosphärischer Wasserdampf kann hochgenaue InSAR Anwendungen erheblich beeinflussen, bedingt durch den signifikanten Einfluss auf Mikrowellensignale (Li et al. 2006). Unter Verwendung der MERIS-Wasserdampfdaten und von Wolkenmasken konnten wir Interferogramme, welche sehr

heterogene Fringes aufweisen, hinsichtlich atmosphärischer Einflüsse näher analysieren und bewerten.

3 Ergebnisse

Die 22 prozessierten Interferogramme erstrecken sich über einen Zeitraum von Juli 2003 bis März 2006 und zeigen einheitliche Muster der Absenkung auf. Die weitläufige Deformation bezieht sich auf das länglich ausgedehnte Tal und durch Bergketten begrenzt. Mitanalysierte Gebiete außerhalb des Kashmar-Tals zeigen keine signifikanten Deformationen und können als stabil betrachtet werden. Abbildung 2 präsentiert vier beispielhafte Interferogramme für verschiedene Zeitspannen.

Das von Absenkung betroffene Gebiet hat eine ungefähre Größe von 750-800 km². In allen Interferogrammen ist die Lage der Grenzen zwischen Absenkung und Nichtabsenkung stabil. Die genannten Grenzen korrelieren nur in geringem Maße mit der Topographie. Die Absenkung ist generell im Inneren des Tales größer und nimmt zu den Rändern hin ab. Gebiete mit geringerer Absenkung sind generell NE-SW ausgerichtet und sichtbar in allen Interferogrammen. Zur näheren Untersuchung der Deformation und deren zeitlicher Variabilität wurde die kumulative Deformation anhand einer Zeitreihe aufeinander folgender Interferogramme berechnet. Hierbei unterliegen ungefähr 60% des Gebietes einer Deformation zwischen 0 und 30 cm, wobei einzelne lokale Gebiete sich bis zu 58 cm gesenkt haben. Diese stark absinkenden Gebiete weisen kreisförmige Formen auf, deren Lage mit Standorten technischer Gebäude in Luftbildern korreliert. Zusätzlich zu diesem kumulativen Ergebnis wurde ein „Stack“ unter Verwendung aller Interferogramme berechnet. Als Ergebnis kann die Absenkungsrate pro Monat angegeben werden, welche zwischen 0 und 2,5 cm/Monat liegt. In Abbildung 3 ist dieses Ergebnis unter Verwendung eines schattierten Reliefs und des geologischen Strukturbaus dargestellt.

Um die InSAR Ergebnisse zu bestätigen wurden sie mit den Nivellementergebnissen verglichen. Die Nivellementmessungen ergaben eine Absenkung von 1,12 m für den Messpunkt BKBW1001 relativ zum Punkt BKBW1029 für den Zeitraum von 1993-2003, oder anders ausgedrückt um 11 cm pro Jahr. Die maximale Nivellement Standardabweichung liegt zwischen 1,2 mm und 1,7 mm. Eine Fehlerfortpflanzung für den InSAR „Stack“ entlang der Nivellementlinie ergab 1,6 mm Standardabweichung, unter Berücksichtigung einer Standardabweichung für eine Einmal-Messung außerhalb des Absenkungsgebietes von 0,3 cm. Im Vergleich zum Nivellement weist das InSAR „Stack“ Profil mehrere kleine lokale Deformationen auf, was auf die höhere räumliche Auflösung der InSAR Messung zurückzuführen ist. Außerhalb der landwirtschaftlichen Gebiete zeigen beide Profile keine signifikante Deformation auf. Dies kann als Bestätigung dafür dienen, dass die InSAR-Ergebnisse keinen konstanten „Offset“ haben. Innerhalb der landwirtschaftlich genutzten Gebiete zeigen beide Profile vergleichbare Trends, wobei die InSAR Messung eine größere Absenkung aufweist. Dies führt uns zur Annahme, dass sich die Absenkung zwischen dem Zeitraum des Nivellements (1993-2000) und dem der InSAR Messung (2003-2006) verstärkt hat. Durch die Übereinstimmung mit den Nivellementsmessungen werden die InSAR-Ergebnisse bezüglich Ausdehnung und lokaler Variation der Absenkung bestätigt.

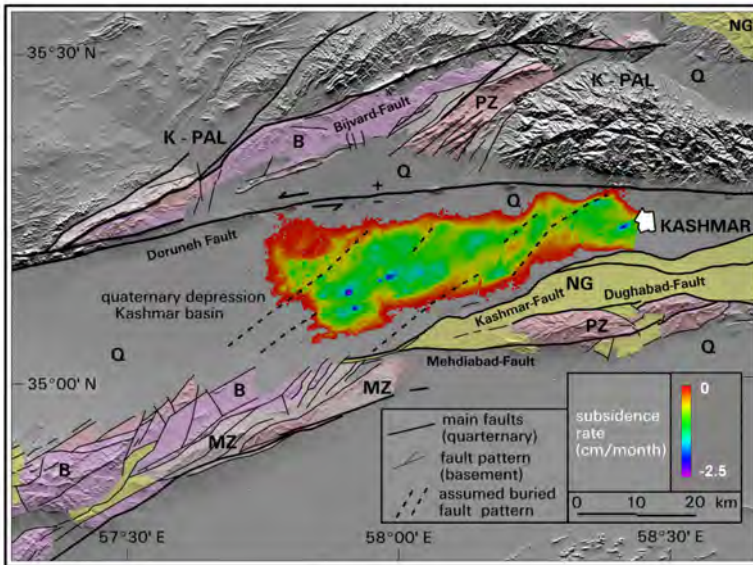


Abbildung 3: Monatliche Absenkungsraten über einer schattierten Reliefkarte mit geologischem Strukturmodell. Das Absenkungsmuster aus InSAR-Interpretation wird regional kontrolliert durch verdeckte NO-SW-Blockstrukturen im Quartärbecken von Kashmir.

Um die zeitliche Veränderung der Absenkung zu begründen, berechneten wir unter Verwendung von 37 level-2b MERIS-Daten den NDVI für das Untersuchungsgebiet. Ein Anstieg des NDVI um 18 % Prozent wurde gemessen. Dies weist auf eine signifikante Zunahme der Vegetation, am wahrscheinlichsten bedingt durch intensivere Landwirtschaft, hin.

4 Diskussion

Unter Verwendung der InSAR-Messmethode wurde die Dynamik der Landabsenkung im Kashmir-Tal für den Zeitraum 2003-2006 ermittelt und Verbreitung und Quantität der Absenkung bestimmt. Das analysierte Gebiet mit einer Größe von 750-800km² sinkt im Dezimeterbereich pro Jahr ab. Kurzzeitinterferogramme (35 Tage Zeitspanne) zeigen eine konstante Absenkung. Für Langzeitinterferogramme (140 Tage Zeitspanne) konnte dies nicht beobachtet werden, wahrscheinlich bedingt durch saisonale Schwankung und variierendem Wasserbedarf.

Der „Stack“ der Interferogramme zeigt die gleichen Deformationsmuster wie ein einzelnes Interferogramm. Die durch InSAR und Nivellement gemessenen Absenkungsraten stimmen im

Profil überein, wobei die InSAR Ergebnisse größere Werte aufzeigen. Wir nehmen daher an, dass die Lokalisierung der Absenkung konstant ist, aber die Rate der Absenkung zunimmt.

Die detaillierte Analyse des Absenkungsmusters im Kashmar-Tal zeigt lokale Maxima so wie NE-SW ausgedehnte Gebiete geringerer Absenkung. Dies führt zur Annahme des Einflusses von verdeckten Blockstrukturen innerhalb oder unterhalb der den Aquifer beinhaltenden Sedimente.

Das Absenkungsgebiet im Kashmar Tal ist Teil einer tektonisch kontrollierten quartären Beckenstruktur, die sich in verschiedenen alpinen Deformationsstufen im zentralen Iranischen Plateaus entwickelt hat (GUEST et al. 2007). In diesem Prozess formte die sinistrale Doruhneh-Störung (MOHER-ASHJAL 1975, BERBERIAN & TCHALENKO 1976) die nördliche Begrenzung des LUT Blocks und des Kashmar-Beckens. Die südliche Grenze ist kontrolliert durch das rezente Aufschiebungssystem der Kashmar-, Doughabad- und Mehdiabad-Störungen. Die erfolgte Faltung weist auf eine NE-SW-Kompression hin. In Übereinstimmung damit erklären sich auch die sinistralen Bewegungen der Doruhneh-Störung und die Entwicklung vor NW-SE-Weitungsbrüchen. Dieses geodynamische Modell kann die NE-SW gerichtete Grabenstruktur im Kashmarbecken erklären. Die aufgeschlossenen NE-SW streichenden morphologischen und tektonischen Grabenstrukturen am nördlichen und südlichen Rand des Absenkungsgebietes machen das Fortstreichen dieser Blockstrukturen auch über das Becken hinweg wahrscheinlich. Damit haben sie kontrollierenden Einfluss auf die Struktur innerhalb oder unterhalb des Sedimentkörpers des Aquifers. Daraus folgt unsere Hypothese, dass diese genannten Strukturen und Störungen das Aquifersystem durchlaufen und dort als Barrieren der Absenkung dienen können, was zu den beobachteten Deformationsmustern führen kann.

GALLOWAY & HOFFMAN (2006) präsentierten vergleichbare Grenzen für saisonale Deformationsmuster am Silver Creek in Kalifornien (USA), welche durch InSAR gemessen wurden. Die Charakteristik dieser Begrenzungen weist u. a. gleichfalls auf Störungen im Aquifer hin, die als Barrieren der Absenkung dienen. MOTAGH et al. (2007) präsentierten vergleichbare Absenkungsraten in der Nähe der Iranischen Stadt Mashhad. Das Absenkungsgebiet zeigte ebenso eine strukturelle Kontrolle bedingt durch quartäre Störungen innerhalb des Tals.

Unter Berücksichtigung der durch InSAR und Nivellement gemessenen andauernden und zunehmenden Landabsenkung, induziert durch weiter steigende landwirtschaftliche Grundwassernutzung und verringerten Niederschlägen vor dem Hintergrund globaler Klimaänderungen, ist zu erwarten, dass die Überpumpung des Grundwassers im Kashmar-Tal sehr wahrscheinlich ein entscheidender Faktor in der weiteren Entwicklung des Gebietes sein wird.

5 Danksagung

Wir danken dem National Cartographic Center of Iran für die Bereitstellung der Nivellement Daten und die Unterstützung der Arbeit. Außerdem danken wir Frau Dr. S. Chabrilat und Frau N. Richter für die konstruktiven Ratschläger im Rahmen der Prozessierung der Multispektraldaten. ENVISAT ASAR und MERIS Daten wurden durch die European Space Agency zur Verfügung gestellt (Category-1 research proposal No. 3188).

6 Literaturverzeichnis

- AMELUNG, F.; GALLOWAY, D.; BELL, J.; ZEBKER, H. & LACZNIAK, R.G., 1999: Sensing the ups and downs of Las Vegas: InSAR reveals structural control of land subsidence and aquifer-system deformation, *Geology*, 27, 483-486.
- BEAUMONT, P.; BLAKE, G.H. & WAGSTAFF, J.M., 1988: *The Middle East: A Geographical Study*, pp. 624, David Fulton, London.
- BERBERIAN, M. & TCHALENKO, J., 1976: Bibliography with abstracts on the seismicity and tectonics of Iran, *Geological Survey of Iran*, 39, 429-516.
- FIELDING, E.; BLOM, R.G. & GOLDSTEIN, R.M., 1998: Rapide subsidence over oil fields measured by SAR interferometry, *Geophysical Research Letters*, 25, 3215-3218.
- GALLOWAY, D.L.; HUDNUT, K.W.; INGEBRITSEN, S.E.; PHILLIPS, S.P.; PELTZER, G.; ROGEZ, F. & ROSEN, P.A., 1998: Detection of aquifer system compaction and land subsidence using interferometric synthetic aperture radar, Antelope Valley, Mojave Dessert, California, *Water Resources Research*, 34, 2573-2585.
- GALLOWAY, D.; JONES, D. & INGEBRITSEN, S., 2000: Measuring Land Subsidence from Space, *Geological Survey Fact Sheet-051-00*.
- GALLOWAY, D.L. & HOFFMANN, J., 2006: The application of satellite differential SAR interferometry-derived ground displacement in hydrology. *Hydrology Journal*, 15, 133-154.
- GUEST, B.; GUEST, A. & AXEN, G., 2007: Late Tertiary tectonic evolution of northern Iran: A case for simple crustal folding, *Global Planetary Change*, 58, 435-453.
- HOFFMANN, J.; GALLOWAY, D.L. & ZEBKER, H.A., 2003: Inverse modeling of interbed storage parameters using land subsidence observations, Antelope Valley, California, *Water Resources Research*, 39, SBH5-1 – SBH5-13.
- LONGFIELD, T.E., 1932: *The subsidence of London*. HMSO, (Ordnance Survey, Professional Paper, No. 14).
- LI, Z.; FIELDING, E.J.; CROSS, P. & MUELLER, J.M., 2006: Interferometric synthetic aperture radar atmospheric correction: GPS topography-dependent turbulence model, *Journal of Geophysical Research*, 111, B02404.
- LU, Z., & DANSKIN, W.R., 2001: InSAR analysis of natural recharge to define structure of a ground water basin, San Bernadino, California, *Geophysical Research Letters*, 28, 2661-2664.
- MASSONNET, D. & FEIGEL, K.L., 1998: Radar interferometry and its application to changes in the earth's surface, *Reviews of Geophysics*, 36, 441-500.
- MODARRES, R. & DE PAULO RODRIGUES DA SILVA, V., 2007: Rainfall trends in arid and semi-arid regions of Iran, *Journal of Arid Environments*, 70, 344-355.
- MOHAJER-ASHJAI, A., 1975: *Recent and contemporary crustal deformation in Eastern Iran*, Imperial College London, London.
- MOTAGH, M.; DJAMOUR, Y.; WALTER, T.R.; WETZEL, H.U.; ZSCHAU, J. & ARABI, S., 2007: Land subsidence in Mashhad Valley, northeast Iran: results from InSAR, levelling and GPS, *Geophysical Journal International*, 168, 518-526.
- OREN, M.B., 2002: *Six Days of WAR: June 1967 and the Making of the Modern Middle East*. UNESCO Studies and Reports in Hydrology, Paris, France, pp 480, Oxford University Press Inc., New York.

- POLAND, J. & DAVIS, G., 1969: Land Subsidence due to withdrawal of fluids, *Reviews in Engineering Geology*, 2, 187-269.
- POLAND, J., 1984: Guidebook to studies of land subsidence due to ground-water withdrawal, pp. 305, UNESCO Studies and Reports in Hydrology, Paris, France.
- SNEED, M.; IKEHARA, M.E.; STORK, S.V.; AMELUNG, F. & GALLOWAY, D.L., 2003: Detection and Measurements of Land Subsidence Using Interferometric Synthetic Aperture Radar and Global Positioning System, San Bernadino County, Mojave Desert, California, U.S. GEOLOGICAL SURVEY, Water Resources Investigations Report 03-4015.
- TOLMAN, C. & POLAND, J., 1940: Ground-water, salt-water infiltration, and round surface recession in Santa Clara Valley, Santa Clara County, California, *Transaction of the American Geophysical Union*, 21, 23-24.
- WORLD BANK, 2005: Islamic Republic of Iran: Cost Assessment of Environmental Degradation, Report No. 32043-IR, Washington, D.C.

GeoScience Markup Language „Esperanto“ für geologische Daten

KRISTINE ASCH¹ & HORST-GÜNTER TROPPENHAGEN¹

Zusammenfassung: Die Kunden geologischer Dienste wollen digitale Daten in einem standardisierten Format, das direkt in ihren Anwendungen verwendet werden kann.

Technologien, die es wissenschaftlichen Einrichtungen ermöglichen, diesen Bedarf zu decken, sind die eXtensible Markup Language (XML) und webbasierte Datenlieferung. Sie erlauben es den Institutionen, eine Schnittstelle zu standardisierten, wieder verwendbaren Datenprodukten zu implementieren, die es den Kunden ermöglicht, die weltweiten wissenschaftlichen Daten sofort zu nutzen.

Dieser Beitrag stellt die GeoSciML (GeoScience Markup Language) vor. Sie ist ein auf Standards basierendes Datenformat speziell für geowissenschaftliche Daten, das einen Rahmen für die applikationsneutrale Kodierung von geowissenschaftlichen thematischen und zugehörigen räumlichen Daten bereitstellt.

Sie wird entwickelt von der Interoperability Working Group der Commission for the Management and Application of Geoscience Information (CGI) der International Union of Geological Sciences (IUGS). Die Arbeitsgruppe ist (momentan) zusammengesetzt aus Spezialisten der Geologie und Informationstechnik von Institutionen aus Nordamerika, Europa, Asien und Australien.

GeoSciML findet Anwendung als Werkzeug für die neue EU-Direktive INSPIRE und das globale „OneGeology“ Projekt.

1 Einleitung

Schon vor langer Zeit hat die Digitalisierung die Welt der Kartographie, Geologie, Geophysik, Geographie und verwandter wissenschaftlicher Disziplinen erreicht.

Anfangs wurde die digitale Technik hauptsächlich genutzt, um weiterhin analoge Produkte (Karten, Atlanten, Nachschlagewerke, Berichte etc.) herzustellen. Um dieses Ziel zu erreichen, wurden und werden unterschiedliche digitale Systeme benutzt, die zu GIS (Geographische Informationssysteme) fortentwickelt wurden und zu mächtigen Werkzeugen für die verschiedensten Aufgaben der Verarbeitung und Verbreitung raumbbezogener Information geworden sind.

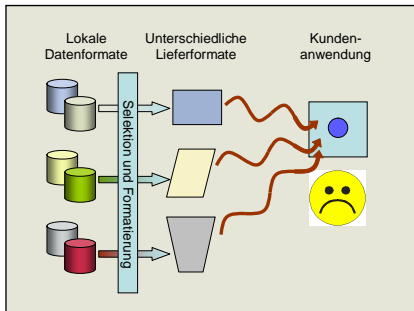


Abb. 1: Aktueller Zustand

Deren entscheidende Stärke liegt in der

¹ Dr. Kristine Asch, Horst-Günter Troppenhagen, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Stillweg 2, 30655 Hannover, E-Mail: k.asch@bgr.de, troppenhagen@bgr.de

Verknüpfung verschiedener fachlicher Ausgangsdaten für die Lösung einer spezifischen Fragestellung. Die für die Problemlösung benötigten Ausgangs – bzw. Geobasis und Geofachdaten werden selten in Eigenregie erhoben, sondern, zumindest zu großen Teilen, aus adäquaten Quellen bezogen. An dieser Stelle ergibt sich oft folgendes Problem: Die gelieferten Daten befinden sich in einem Format, das für das eigene System nicht oder nur teilweise direkt verwertbar ist. Sollen die (raumbezogenen) Daten sogar politische Grenzen überschreiten, wird die Lage noch komplizierter. Nur ungenügend wird die nun nötige, zeitraubende Anpassung oder Konvertierung in Kauf genommen.

In dieser Situation kommen nun mehr und mehr standardisierte Datenformate zum Einsatz, z.B. GML² für den Austausch raumbezogener Objekte. Für den Bereich der Geologie und der geologischen Karten (bzw. geologiebezogene GIS) ist seit einiger Zeit ein Austauschformat für geologische Daten in der Entwicklung - die Geoscience Markup Language (GeoSciML).

2 Die Geoscience Markup Language

Das Projekt für die Entwicklung der GeoSciML wurde im Jahre 2003 gegründet. Es befindet sich unter der Schirmherrschaft der CGI³ Working Group on Data Model Collaboration und ist Teil der CGI Interoperability Working Group.

Mehrere Vorgängerprojekte hatten starken Einfluss auf die Entwicklung der GeoSciML, u.a. Aktivitäten staatlicher Fachinstitutionen (Britischer Geologischer Dienst – BGS -, Geologischer Dienst Japan, GSJ), und zwar für grenzüberschreitende (Das Nordamerikanische Datenmodell für geologische Karten - NADM⁴) oder industrieorientierte (eXploration and Mining Markup Language - XMML) Fragestellungen.

Ziel ist, kurzfristig geologische Informationen vergleich- und austauschbar darzustellen, die auf Informationen geologischer Karten und (Feld-)Beobachtungen basieren. Langfristig ist die Erweiterbarkeit auf weitere geowissenschaftliche Themenfelder gewährleistet.

GeoSciML nutzt vorhandene geowissenschaftliche Datenmodelle, aus denen ein gemeinsamer Satz von Objekttypen extrahiert wurde. Diese bauen auf geologischen Kriterien (geologische Einheiten, Strukturen, Fossilien) oder Ergebnissen geologischer Untersuchungen (Proben, Profilschnitte, Messwerte) auf. Unterstützende Objekte, z.B. geologische Zeitskalen, Begriffslexika etc, werden ebenfalls berücksichtigt, so dass sie zur Klassifizierung der primären Objekte dienen können.

GeoSciML ist ein GML Application Schema und beruht damit auf einem OGC (Open Geospatial Consortium)-Standard. Sie ist ein Format für den Austausch von Daten. Sie stellt keine Datenbankstruktur dar.

² Geography Markup Language, kurz GML, ist ein Datenformat zum Austausch geobezogener Objekte ("Features"). GML ist eine Anwendung von XML und durch Schemabeschreibungen (XML-Schemadateien *.xsd) festgelegt. GML erlaubt die Übermittlung von Objekten mit Attributen, Relationen und Geometrien im Bereich der Geodaten.

³ Commission for the Management and Application of Geoscience Information

⁴ North American Geologic Map Data Model

Bei der Entwicklung werden Unified Modeling Language (UML) - Werkzeuge für die Modellierung benutzt.

Die Umsetzung von UML in die XML (Extensible Markup Language)-Schemata erfolgte (bis auf kleine Abweichungen) OGC-konform.

GeoSciML bietet momentan Schemata für folgende Objekte:

- *GeoSciML*: „Basispaket“ (root package) für GeoSciML v 2.0: ein Anwendungsschema, das einen Satz Objekttypen und Strukturen für Informationen in den Geowissenschaften spezifiziert.

Earth Material: Das GeoSciML „Earth Material Package“ beinhaltet Klassen, die eine Beschreibung der natürlich vorkommenden Substanzen des Untergrundes beinhalten.

- *Borehole*: Das GeoSciML „Borehole Package“ beinhaltet Elemente für die Beschreibung von Bohrlöchern.
 - *Collection*: Das GeoSciML „Collection Package“ beinhaltet Elemente, die die Strukturierung von WMS-Antwortdokumenten und andere Anwendungen unterstützen.
 - *Fossil*: Das GeoSciML „Fossil package“ beinhaltet Klassen für die Repräsentation von Fossilien.
 - *Geologic Age*: Das GeoSciML „GeologicAge Package“ beherbergt Klassen zur Beschreibung des geologischen Alters von Gesteinseinheiten.
 - *Geologic Feature*: Das GeoSciML „GeologicFeature Package“ umfasst die Grundklassen MappedFeature und GeologicFeature. GeologicFeature repräsentiert ein konzeptuelles Merkmal, das einem Legendeneintrag einer traditionellen geologischen Karte vergleichbar ist. Das MappedFeature stellt die Verbindung zur eigentlichen Geometrie her.
 - *Geologic Relation*: Das GeoSciML „GeologicRelation Package“ beinhaltet die Basisklasse für die Beziehungen geologischer Objekte zueinander.
- Geologic Structures*: Das „Geologic Structure Package“ erlaubt die Beschreibung der Anordnung von Einheiten im geologischen Untergrund nach Inhomogenitäten, Strukturen und/oder Brüchen in einem Material.
- Geologic Unit*: Das GeoSciML „GeologicUnit Package“ beinhaltet Klassen, die fiktive geologische Einheiten repräsentieren. Konkrete räumliche Eigenschaften sind diesen Einheiten zuweisbar.
- *Value*: Das GeoSciML "CGI_Value Model" stellt eine allgemeine Möglichkeit zur Verfügung, "literale" (wörtlich angegebene) Werte zu kodieren. Ebenfalls hier enthalten ist das "CGI_GeometricDescriptions" Package. Es erlaubt die Beschreibung ebenenbezogener oder linearer Orientierungen eines geologischen Objektes.

3 Anwendungsmöglichkeiten von GeoSciML

Die Verwendung der GeoSciML bietet die Möglichkeit des Austauschs von geologischen bzw. geowissenschaftlichen Daten über politische und fachliche Grenzen hinweg. Zeitraubendes Konvertieren und Bearbeiten der Daten zur Integration in das eigene Format entfällt und damit auch die speicherintensive Notwendigkeit, Fremddaten als lokale Kopie vorhalten zu müssen. Ein OGC-konformer WFS (Web Feature Service) genügt als Datenquelle, wobei dieser die eventuell notwendige Konvertierung des lokalen Formates in die GeoSciML „on the fly“ vornehmen könnte (siehe nächster Abschnitt „Praktische Umsetzung“).

Bei entsprechenden Fähigkeiten einer Clientsoftware können, bei Nutzung entsprechender Kataloge, Thesauri, Zeittabellen, Farbskalen etc., die eigenen und fremden Daten gleichartig dargestellt werden, was sehr hilfreich ist, um z.B. raumbezogene Daten der Geologie Chinas (Symbole, Zeitskala) oder auch der USA (Zeitskala, Farbskala) zu verstehen und zu nutzen. Ebenso ist eine unterschiedliche Darstellung der gleichen Daten möglich, z.B. nach Darstellungsstandards unterschiedlicher Disziplinen. Ein Beispiel hierzu wäre die Darstellung der geologischen Einheiten Europas einerseits nach der Lithologie (Gesteinsart) und andererseits nach der Chronostratigraphie (nach dem Alter).

4 Praktische Umsetzung

Es ist davon auszugehen, dass momentan so gut wie keine Institution die GeoSciML als ihr internes Datenformat benutzt. Eine Formatumsetzung (Schema translation) in die GeoSciML ist praktisch unumgänglich. Im Falle eines WFS sind durch diesen folgende Anforderungen zu erfüllen:

- das allgemeine GML Anwendungsschema muss unterstützt werden,
- das Einbinden von Übersetzungslexika für die Eigenschaften, die als Text ausgedrückt werden (um z.B. Kreide nach Cretaceous zu übersetzen) muss möglich sein und
- Standardabfragen müssen beantwortet werden.

Die Schemaumsetzung in GeoSciML könnte an verschiedenen Positionen in einer Softwarearchitektur oder Prozesskette erfolgen.

- Umsetzung auf der Clientseite. Es werden die Daten eines Dienstes empfangen, die der internen Struktur des Anbieters entsprechen, aber eine Standardsyntax verwenden, z.B. CSV (comma-separated values) oder GML.
- Die Umsetzung geschieht durch einen WFS, der zwischen dem Client und dem eigentlichen Service als Stellvertreter (Proxy) agiert und somit nach Außen als konformer Dienst auftritt.
- Ein Server, z.B. ein relationales Datenbanksystem, der seinerseits als

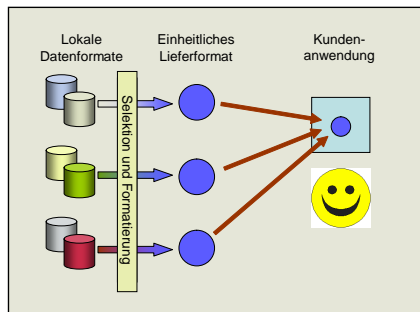


Abb. 2 Angestrebter Zustand

Datenquelle für den eigentlichen WFS Server dient, bietet die Daten bereits im GeoSciML Format an. Dies kann durch einmaliges Replizieren des Datenbestandes in eine dem geforderten Schema entsprechende Struktur erreicht werden oder aber durch Präparieren entsprechender „Views“ (vordefinierte Abfragen, Sichten) oder Prozeduren durch den Datenbankverwalter.

- Umsetzung direkt in der Serversoftware.

Eine erste praktische Anwendung für GeoSciML soll das vom Britischen Geologischen Dienst initiierte Projekt OneGeology werden, das im April 2007 begonnen hat und von einer ständig zunehmenden Zahl von geologischen Organisationen und Diensten getragen wird. Ziel dieses Projektes ist es, weltweit geologische Daten im Maßstab 1: 1 Millionen, die von den Mitgliedern des Projektes per WMS/WFS bereitgestellt werden, einheitlich und dynamisch darzustellen. Damit kann GeoSciML ihre praktische Anwendbarkeit zeigen und zur internationalen Kommunikation in den Geowissenschaften beitragen.

5 Literaturverzeichnis⁵

- CGI COUNCIL, 2007: ANNUAL REPORT TO THE INTERNATIONAL UNION OF GEOLOGICAL SCIENCES FOR 2006, <http://www.cgi-iugs.org/>
- CGI INTEROPERABILITY WORKING GROUP, 2003: GeoSciML - the CGI Datamodel and Encoding., <https://www.seegrid.csiro.au/twiki/bin/view/CGIModel/GeoSciML>
- CGI WEBSITE, 2008: GML Application Schema - Package Overview, <http://www.cgi-iugs.org/GeoSciML/index.html>
- CGI WEBSITE, 2008: Why do we need GeoSciML?, http://www.cgi-iugs.org/tech_collaboration/data_model/docs/Why_do_we_need_GeoSciML_v1.doc
- COX, S., 2006: Geospatial information services: interoperability considerations. <https://www.seegrid.csiro.au/twiki/bin/view/AppSchemas/InteroperabilityConsiderations>
- ONEGEOLOGY HOMEPAGE : <http://www.onegeology.org/home.html>
- STROBEL, S. & REINHARDT, W., 2007: Die Bedeutung von Profilen für den Datenaustausch mittels Geography Markup Language. MITTEILUNGEN DES BUNDESAMTES FÜR KARTOGRAPHIE UND GEODÄSIE, Band 39 http://137.193.222.80/publikationen/download/strobel_bkg_2007.pdf

⁵ Alle Internetadressen zuletzt besucht im Februar 2008.

Erfassung und Analyse von Laserscandaten zur Unterstützung der Landschaftsarchäologie

SILKE BOOS¹, SABINE HORNUMG², PATRICK JUNG², HARTMUT MÜLLER¹

Zusammenfassung: Landschaftsarchäologische Forschung beschäftigt sich mit dem Aufspüren historisch relevanter Funde und Befunde zum Zwecke der Annäherung an den historischen Landschaftsraum. Dieses Ziel wird über eine Kombination verschiedener Prospektionsmethoden wie Feldbegehungen, Luftbildarchäologie und geophysikalischer Messmethoden verfolgt. Eine wichtige Grundlage für die Visualisierung der Landschaft bilden Digitale Geländemodelle (DGMe). Sie dienen aber nicht nur alleine der Repräsentation der Topographie, sondern können ebenfalls wichtige Hinweise auf archäologische Strukturen geben. In diesem Zusammenhang stellen hochauflösende, aus Airborne Laserscanning (ALS)-Daten erzeugte DGMe ein hilfreiches Instrument dar. Häufig zeigt sich aber, dass die Punktdichte der ALS-Daten in bewaldeten Gebieten zu gering ist, um sehr feine Strukturen zu reproduzieren. In diesem Fall kann eine Vermessung des Geländes mittels terrestrischem Laserscanning Abhilfe leisten.

Die angesprochenen Methoden des Laserscannings wurden im Rahmen eines Forschungsprojekts des Instituts für Vor- und Frühgeschichte der Universität Mainz zum keltischen oppidum „Hunnering“ und dessen Umfeld angewandt und erprobt.

1 Einleitung

Die Erfassung eines vor- und frühgeschichtlichen Landschaftsraums mit seinem Netz aus menschlichen Siedlungen, ihren Acker- und Weideflächen und natürlichen Ressourcen sowie ihren Netzwerken aus Bestattungspätzen und sakralen Zentralorten wird in der archäologischen Forschung als Landschaftsarchäologie bezeichnet. Gemeinhin bringt man archäologische Forschung häufig mit Ausgrabungen oder Analysen von Fundobjekten als wissenschaftliche Methoden in Verbindung; Landschaftsarchäologie hingegen kann diesem Anspruch aufgrund ihrer Betrachtung auf dem Landschaftsmaßstab kaum gerecht werden, da die Ausgrabung ganzer Landschaften nicht realisierbar ist. Sie stützt sich daher auf spezielle Prospektionsmethoden wie die Kartierung von Einzelfunden, geophysikalische Messmethoden und Luftbildarchäologie, die dem Aufspüren sowie der systematischen Erfassung von Funden und Befunden dienen, ohne diese zunächst in ihrem Bestand zu stören (BOFINGER, J.; KURZ, S. & SCHMIDT, S., 2006).

In jüngerer Zeit werden zunehmend Methoden und Technologien der Photogrammetrie und Geoinformatik eingesetzt, um sich dem historischen Lebensraum zu nähern. Insbesondere der Einsatz von Laserscanning-Technologien eröffnet für die landschaftsarchäologische Forschung ganz neue Möglichkeiten. Zur großflächigen Erfassung der Geländeoberfläche hat sich in den letzten Jahren besonders Airborne Laserscanning (ALS) etabliert. Es wurden bereits eine Reihe von Untersuchungen durchgeführt, die einer Verwendung von ALS-Daten speziell für archäologische

¹ Institut i3mainz, am Fachbereich 1 - Geoinformatik und Vermessung, Fachhochschule Mainz, Holzstrasse 36, 55116 Mainz, boos@geoinform.fh-mainz.de, mueller@geoinform.fh-mainz.de

² Institut für Vor- und Frühgeschichte der Universität Mainz, Schillerstr. 11, 55116 Mainz, hornusa@uni-mainz.de, patjung@uni-mainz.de

Zwecke einen deutlichen Zugewinn an archäologisch relevanter Information konstatieren (CHALLIS, K., 2006, SITTLER, B., 2004). Die aus ALS-Daten erzeugten hochauflösenden Digitalen Geländemodelle (DGMe) dienen dabei zum einen der möglichst detaillierten Repräsentation der Landschaft, schöpfen ihr Potential aber ganz besonders aus der Interpretation des Bildes und dem Erkennen bisher unbekannter archäologischer Strukturen. Vor allem in bewaldeten Gebieten, die bislang nur sehr kleinräumig und mühsam prospektiert werden konnten und wo die klassische Luftbildarchäologie an ihre Grenzen stößt, zeigen sich die hervorragenden Möglichkeiten eines Einsatzes von ALS-Daten für archäologische Zwecke (DEVEREUX, B.J.; AMABLE, G.S.; CROW, P. & CLIFF, A.D., 2005, KRAUS, K. & PFEIFER, N., 1998). Bisher gebräuchlich in der archäologischen Feldforschung zur Erfassung archäologisch relevanter Reliefmerkmale ist die Vermessung des Geländes mit Hilfe eines Tachymeters. Hierzu wird die Geländeoberfläche über regelmäßig verteilte Punkte vermessen und das Punktraster in Bereichen anthropogener Reliefveränderungen verdichtet. Hier zeigt sich ein weiterer großer Vorteil der Datenerfassung durch ALS gegenüber der Tachymetrie, da diese völlig unabhängig von der Interpretation der Topographie ist und Informationsverluste durch nicht erkannte Strukturen vermeiden lässt. Jedoch ist die Erfassung archäologischer Strukturen auch abhängig von der durch ALS erzielten Punktdichte auf der Geländeoberfläche. In sehr dicht bewaldeten Gebieten kann eine unzureichende Durchdringung der Baumkronen bewirken, dass archäologische Strukturen nicht erfasst werden. In solchen Fällen lässt sich in archäologisch interessanten Bereichen durch die Vermessung des Geländes mit Hilfe eines terrestrischen Laserscanners Abhilfe leisten.

Die Visualisierung der mittels Laserscanning erfassten Punkte als DGM erfolgt in einem Geographischen Informationssystem (GIS). Anders als bei der Darstellung eines Luftbilds lässt sich die Interpretation eines DGM durch Änderung verschiedener Faktoren in einem GIS variieren. So ist es zum Beispiel möglich, Faktoren der Schatteneigenschaften zu beeinflussen (Höhe des Reliefs, Richtung der Schattierung im Bezug auf lineare Strukturen, Position der Sonne) oder sekundäre Modelle wie Hangneigung, Aspekt und Krümmung abzuleiten, wodurch bestimmte Reliefmerkmale hervorgehoben werden können.

2 Das Untersuchungsgebiet

Seit Ende 2006 wird am Institut für Vor- und Frühgeschichte der Universität Mainz das Umfeld des keltischen *oppidum* „Hunnenring“ im nördlichen Saarland untersucht. Wertvolle Funde im näheren Umfeld des Hunnenrings weisen auf die Ansiedlung einer keltischen Oberschicht in dieser heute peripher gelegenen Mittelgebirgsregion hin. Im 2. und 1. Jh. v. Chr. bzw. evtl. erstmals schon um 400 v. Chr. diente das 18,5 ha große Dollbergplateau einer größeren Gemeinschaft als zentrale Siedlung und hatte die Funktion eines ökonomischen, politischen und religiösen Zentrortes inne. Aber auch für die folgende römische Zeit deuten sich vielerorts Kontinuitäten an, die in der Entstehung einer dorffartigen Ansiedlung mit zentralörtlichem Charakter gipfeln (WIEGERT, M., 2002).

Im Mittelpunkt des archäologischen Interesses steht die Frage, welche ökonomischen Faktoren die keltisch-römische Besiedlung des Hunnenrings und seines weiteren Umfelds in vor- und frühgeschichtlicher Zeit beeinflusst haben. Die nährstoffarmen und staunassen Böden der Region dürften kaum einer über Subsistenz hinaus reichenden Landwirtschaft gedient haben. Vielmehr

legen die reichen Eisenerz- und Kupfervorkommen der Gegend die Vermutung nahe, dass diese schon in vorgeschichtlicher Zeit als bedeutsame wirtschaftliche Grundlage gedient haben.

Ziel der landschaftsarchäologischen Untersuchungen ist daher der Nachweis nicht nur einer Verhüttung lokaler Erze bereits in keltisch-römischer Zeit, sondern vielmehr ihre Stellung als möglicherweise primärer Wirtschaftsfaktor der Region, der auch vor dem Hintergrund geologischer Untersuchungen zu Metallgehalt und Verhüttungstechniken zu beurteilen sein wird.



Abb. 1: Das Untersuchungsgebiet und sein näheres Umfeld.

aus mehreren zum Getreideanbau genutzten Flächen, Wiesen und mehreren brachliegenden Parzellen sowie den angrenzenden Waldflächen (Abb.1). Der Wald östlich und westlich der landwirtschaftlichen Nutzflächen wird teilweise durch Fichtenschonungen gebildet, während im Norden und dem sich nordwestlich erstreckenden Münzbachtal, das einen markanten Einschnitt ins Gelände darstellt, lockerer Mischwald steht. Besonders augenfällig ist die anthropogene Überformung des Münzbachtals. Hier sticht ein neuzeitlicher Steinbruch hervor, aber auch ein Fußpfad und markante Steinsetzungen auf der Geländeoberfläche, die eine direkte Wegeverbindung zum Hunnenring vermuten lassen, gehören zu den charakteristischen Merkmalen dieses Geländeabschnitts.

Die Prospektionen hatten zum Ziel, einen weiteren Erkenntnisgewinn über die Ausdehnung der römischen Siedlung zu erreichen und Hinweise auf alte Eisenverarbeitung oder -verhüttung zu finden.

3 Methodik und Ergebnisse

Als zweites Bundesland nach Baden-Württemberg stellt das Saarland seit kurzem flächendeckend ALS-Daten bereit, die bei einer Befliegung im Frühjahr 2006 erhoben wurden. Für das Untersuchungsgebiet wurde für einen Bereich von 9 km² ein ALS-Datensatz angeschafft, mit dessen Hilfe ein DGM berechnet werden konnte. Dieses diente als Grundlage für die archäologischen Prospektionstätigkeiten und bildete den Ausgangspunkt für Analysen in einem GIS. Ein

Die Prospektionsarbeiten des Jahres 2007 konzentrierten sich im wesentlichen auf eine ca. 20 ha große Fläche 1,2 km südöstlich des Hunnenrings nahe der Ortschaft Schwarzenbach, auf der bei archäologischen Arbeiten Mitte der 80er Jahre ein gallo-römischer Tempel mit umgebender Zivilsiedlung ausgegraben

wurde (MIRON, A., 2000). Das Siedlungsareal befindet sich im Gewann „Auf dem Spätzrech“ und besteht heute

Teil des stark reliefierten und anthropogen überformten Münzbachtals wurde in einem weiteren Schritt mit einem Terrestrischen Laserscanner erfasst.

Im Folgenden werden die angewandten Methoden betrachtet, deren Verwendung im Rahmen des Projektes beschrieben und die Ergebnisse diskutiert.

3.1 Airborne Laserscanning

Das Verfahren des ALS beruht auf der Abtastung der Geländeoberfläche durch einen in einem Flugzeug installierten Laserscanner, der bei einer Datenrate von bis zu 100000 Punkten pro Sekunde eine räumliche Auflösung von bis zu 25 Laserpunkten/m² erreichen kann (MAAS, H.-J., 2005). Durch die seitliche Ablenkung des Laserstrahls über einen Scanmechanismus und die Vorwärtsbewegung des Flugzeugs wird ein Geländestreifen unter dem Flugzeug abgetastet. Die Positions- und Orientierungsparameter der Flugzeugplattform werden mit Hilfe eines im Flugzeug integrierten sog. GPS/INS-Systems ermittelt. In Kenntnis über Lage und Orientierung der Flugzeugplattform kann über die Laufzeitmessung des Laserpulses die Position des Reflektionssubjekts auf der Geländeoberfläche rekonstruiert werden und somit dessen 3D-Koordinaten mit einer Höhengenaugigkeit von 10 – 20 cm (im flachen Gelände) bestimmt werden. Eine charakteristische Eigenschaft von Laserscannern ist die Unterscheidung von Mehrfachreflektionen. Für einen einzelnen Laserpuls können über die Vegetation mehrere Reflektionen beobachtet werden, da Teile des Lichtimpulses am Bewuchs reflektieren können, während andere bis zur Geländeoberfläche durchdringen. Der bei einer ALS-Befliegung aufgezeichnete Datensatz wird deshalb mit Hilfe spezieller Programme durch Filter- und Klassifikationsmethoden prozessiert, welche die Auftrennung der Punktwolke in Boden- und Nichtbodenpunkte bewirkt. In Abhängigkeit von der Fragestellung lassen sich so aus den zugrunde liegenden Daten ein Digitales Oberflächenmodell (DOM), für das sowohl die erste als auch die letzte Reflektion verarbeitet wird, oder aber ein DGM, welches nur die letzte Reflektion berücksichtigt, generieren.

Für das Untersuchungsgebiet „Am Spätzrech“ wurde aus last-pulse-Daten, die eine mittlere Punktdichte von 1,5 Punkten/m² aufwiesen, in der Software ESRI ArcGIS 9.2 ein DGM mit einer Auflösung von 0,5 m berechnet. Aus diesem wurden Schummerungsdarstellungen aus verschiedenen Himmelsrichtungen abgeleitet. Die archäologische Interpretation dieser Darstellungen zeigte, dass die Visualisierung des DGM mit Beleuchtung aus Nordwest die aus historischer Sicht interessanten Reliefmerkmale am deutlichsten hervorheben. Großes Interesse erweckte bei den Archäologen eine langschmale Erhebung, die sich südlich des gallo-römischen Tempels in west-östlicher Richtung erstreckt (Abb. 2a). Diese Struktur, die im Gelände mit dem bloßen Auge kaum auszumachen ist, wurde bei den Ausgrabungen der 80er Jahre als Grenze der römischen Siedlung angesprochen. Die Prospektionen des Jahres 2007 konnten diese These jedoch widerlegen. Bei den Arbeiten im Untersuchungsgebiet wurden mehr als 1400 Einzelfunde tachymetrisch eingemessen, welche sich zu großen Teilen aus römischen Dachziegeln und Keramikfragmenten zusammensetzen. Die Visualisierung der Funde im GIS in Kombination mit dem DGM lässt erkennen, dass sich die Funde auch jenseits der vermuteten Grenze der römischen Siedlung fortsetzen, diese also eine größere Ausdehnung gehabt haben wird als bisher vermutet (Abb. 2b). Auch wird deutlich, dass sich der Kern der Siedlung nahe dem Tempel befunden haben muss und die Besiedlung mit zunehmender Entfernung zum Tempel analog zur Ausdünnung der Funde auch weniger dicht gewesen sein wird. Weiterhin gut im DGM zu erkennen, ist der neuzeitliche Stein-

bruch im Münzbachtal, und auch der angesprochene Fußpfad, der oberhalb des Münzbachs verläuft, wird durch das DGM sehr detailliert herausgearbeitet. Es zeigt sich aber auch, dass das Relief stellenweise nur unzureichend und sehr unstrukturiert wiedergegeben ist. Diese Bereiche decken sich häufig mit denen, wo die Punktdichte deutlich unter einem Punkt/m² liegt und somit bei einer Auflösung des DGM von 0,5 m nur ungenügend repräsentiert werden können. Deshalb entschieden wir uns, im Münzbachtal den Bereich des neuzeitlichen Steinbruchs mit einem terrestrischen Laserscanner aufzunehmen.

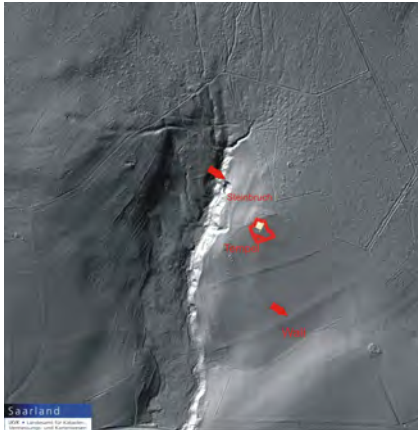


Abb. 2a: DGM des Untersuchungsgebietes als Schummerungsdarstellung (Beleuchtung aus NW).

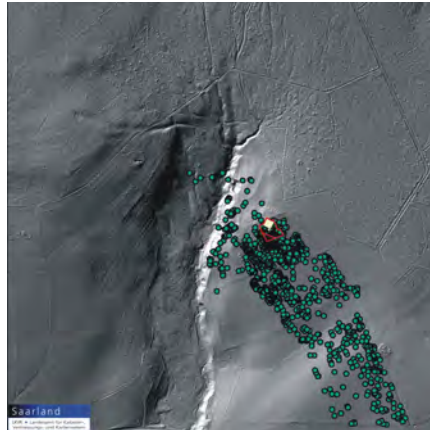


Abb. 2b: Fundverteilung im Untersuchungsgebiet.

3.2 Terrestrisches Laserscanning

Terrestrisches Laserscanning (TLS) ist auf dem besten Wege sich als 3D-Messtechnik neben der Photogrammetrie und Tachymetrie zu etablieren. In der Archäologie hat sich diese Methode für die Erfassung von Baudenkmalern und Objekten jeglicher Art bereits vielfach bewährt (BÖHLER, W., BORDAS VICENT, M., HEINZ, G., MARBS, A. & MÜLLER, H., 2004, HEINZ, G., MÜLLER, H., 2005). Aber auch für topographische Aufnahmen konnte die Eignung des TLS zur detaillierten Dokumentation des Reliefs nachgewiesen werden (HÖNNIGER, C. & KERSTEN, T., 2005, HÖNNIGER, C., KERSTEN, T. & MESCHELKE, K., 2004).

Beim TLS wird ein gewählter Betrachtungsbereich mittels berührungsfreier Lichtpunktabtastung rasterförmig vermessen, wobei wie beim ALS die Laufzeit und die jeweilige spektrale Reflektivitätsintensität erfasst werden. Bei der Erfassung einer Oberflächengeometrie ergibt sich so zunächst eine digitale Punktwolke, die neben den 3D-Punktkoordinaten (x,y,z) auch den Intensitätswert für jeden gemessenen Punkt aufweist. Manche Scanning-Systeme verfügen über die Möglichkeit, zur besseren Visualisierung in Kombination mit einer Digitalkamera jedem Punkt zusätzlich den RGB-Farbwert zuzuordnen.

Derzeit befinden sich eine ganze Reihe verschiedener terrestrischer Laserscan-Systeme auf dem Markt, die sich hinsichtlich ihres Messprinzips sowie ihrer Genauigkeit und Reichweite unterscheiden. Laserscanner, die nach dem Impulslaufzeitverfahren arbeiten, können Distanzen von bis zu mehreren hundert Metern messen, erreichen aber eine geringere Genauigkeit als Phasenscanner, welche aufgrund ihres Messprinzips aber nur Distanzen von weniger als 100 m erreichen lassen (BÖHLER, W. & MARBS, A., 2002). Für topographische Aufnahmen eignen sich aufgrund der größeren Reichweite daher eher Laserscan-Systeme, die nach dem Impulslaufzeitverfahren arbeiten.

Im Untersuchungsgebiet wurde der angesprochene neuzeitliche Steinbruch und seine Umgebung in einem Bereich von ca. 1 ha mit dem Laserscanner HDS 3000 der Firma Leica aufgenommen. Dieser arbeitet nach dem Impulslaufzeitverfahren und verfügt über die aus Tabelle 1 zu entnehmenden Systemspezifikationen.

Tab.1: Systemspezifikationen des HDS 3000

Reichweite	100 m
Messrate	1.800 pts/sec.
Ausschnitt	270° x 360°
Laserklasse	3R
Strahlöffnung	<6mm bei 50m
Schrittweite	max. 20.000 pts/row max. 5.000 pts/row
- horizontal	
- vertikal	
Genauigkeit	4mm / 50m 60 microrad 60 microrad
- Entfernung	
- Winkel (Hz)	
- Winkel (V)	
Gewicht	16 kg (ohne Batterie)

Abstrahlungseffekte, verursacht durch den lockeren Mischwald des Untersuchungsgebiets, erforderten die Aufnahme über 9 verschiedene Standpunkte. Das Gelände wurde mit einer Auflösung von 5 cm/15 m aufgenommen. Für die Registrierung der Einzelscans wurden 7 Kugeln der Firma Leica verwendet, deren Landeskoordinaten zusätzlich tachymetrisch bestimmt wurden. Die Registrierung der über 2 Millionen Einzelpunkte erfolgte in der Leica-Software *Cycloone 5.6*. Ein im Rahmen einer Diplomarbeit an der Fachhochschule Mainz (EMIG, S. & RASEL, S., 2007) entwickeltes Programm ermöglichte es, störende vertikale Objekte (in der Hauptsache Bäume) im großen Umfang zu entfernen. Dieses Programm fügt die Punktwolke des Laserscans zunächst in ein definiertes Raster ein und filtert für jede Zelle den tiefsten Punkt heraus. Über Nachbarschaftsoperatoren können weitere störende Punkte gelöscht werden. Die stark ausgedünnte Punktwolke konnte nach diesen Vorverarbeitungsschritten im Programm *Raindrop* Geomagic 9.0 so weit nachbearbeitet werden, dass nur noch Punkte der Geländeoberfläche übrig blieben. Aus den resultierenden 200000 Restpunkten des Laserscans wurde in ArcGIS ein DGM berechnet und in ESRI ArcScene als Triangulated Irregular Network (TIN) in 2,5 D-Darstellung visualisiert. Ein Vergleich mit einem TIN aus ALS-Daten des gleichen Geländeabschnitts stellt klar den größeren Detailreichtum des TLS-TIN heraus.

Die Interpretation des Laserscans durch die Archäologen ließ eine linienförmige Struktur erkennen, die quer in das Bachtal des Münzbachs abfällt und sich auf der anderen Seite des Ufers fortsetzt. Diese könnte möglicherweise mit den bereits angesprochenen Steinsetzungen, die eine Wegeverbindung zum Hunnenring vermuten lassen, in Verbindung gebracht werden.



Abb. 3a: Terrestrischer Laserscan des neuzzeitlichen Steinbruch als 2,5D-Darstellung in ArcScene.



Abb. 3b: Airborne Laserscan des neuzzeitlichen Steinbruch als 2,5D-Darstellung in ArcScene.

4 Fazit und Ausblick

Das vorgestellte Forschungsprojekt konnte zeigen, dass die Verwendung von ALS-Daten und deren Visualisierung als hochauflösendes DGM entscheidende Hilfestellung für archäologische Prospektionsvorhaben leisten kann. Es zeigte sich auch, dass der Einsatz eines terrestrischen Laserscanners für kleinräumige Geländeaufnahmen selbst in bewaldeten Gebieten eine lohnende Alternative zur Tachymetrie und dem ALS darstellt.

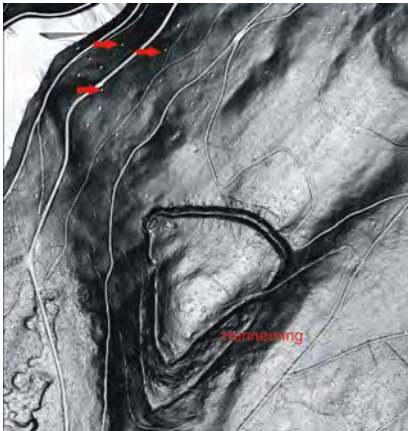


Abb. 4: Neuzzeitliche Meilerplätze nahe des Hunnering in slope-Darstellung.

Die weiteren Forschungen werden sich auf den Nachweis von primären Bergbauspuren konzentrieren. Wichtiger Ausgangspunkt stellt in diesem Zusammenhang die Auswertung und Visualisierung weiterer ALS-Daten dar. Erste Ergebnisse konnten für ein größeres Gebiet nordwestlich des Hunnering eine Vielzahl auffälliger kreisrunder Strukturen mit

Durchmessern von bis zu 12 m ausmachen (Abb. 4).

Diese wurden von den Archäologen bei einer Feldbegehung als neuzzeitliche Meilerplätze identifiziert und werden wahrscheinlich den Ausgangspunkt für die nächste Prospektionskampagne darstellen. Weiterhin ist es geplant, im GIS die für die Standortwahl von Siedlungen wichtigen

Kriterien wie Gewässernähe, Hangneigung, Bodengüte etc. zu kombinieren und zum archäologischen Befund in Bezug zu setzen, um daraus weitere potentielle Fundstellen ableiten zu können.

5 Literaturverzeichnis

- BÖHLER, W.; BORDAS VICENT, M.; HEINZ, G.; MARBS, A. & MÜLLER, H., 2004: High Quality Scanning and Modeling of Monuments and Artifacts - - Proceedings of the FIG Working Week 2004, May 22-27 - Athens, Greece. Published by FIG. – 2
- BÖHLER, W. & MARBS, A., 2002: 3D Scanning Instruments - - CIPA, Heritage Documentation - International Workshop on Scanning for Cultural Heritage Recording - Corfu, Greece – 2002.
- BOFINGER, J.; KURZ, S. & SCHMIDT, S., 2006: Ancient Maps - modern data sets: different investigative techniques in the landscape of the Early Iron Age princely hill fort Heuneburg, Baden-Württemberg. In: S. Campana u. M. Forte (Hrsg.), From Space to Place. 2nd International Conference on Remote Sensing in Archaeology [Proceedings 2nd Internat. Workshop Rome, Italy 2006]. BAR Internat. Ser. 1568 (Oxford 2006).
- CHALLIS, K., 2006: Airborne Laser Altimetry in Alluviated Landscapes. *Archaeological Prospection*, 13 (2), 103 – 127.
- DEVEREUX, B.J.; AMABLE, G.S.; CROW, P. & CLIFF, A.D., 2005: The potential of airborne lidar for detection of archaeological features under woodland canopies. *Antiquity*, 79, 648 – 660.
- EMIG, S. & RASEL, S., 2007: Dokumentation von historischen Geländestrukturen und Analyse von Laserscannerdaten. Unveröffentlichte Diplomarbeit an der FH Mainz.
- HEINZ, G. & MÜLLER, H., 2005: Surveying of Pharaohs in the 21st Century - - Proceedings of the FIG Working Week 2005, April 2005 - Cairo, Egypt - 2005 -
- HÖNNIGER, C. & KERSTEN, T., 2005: Topographische Aufnahme der sächsischen Ringwallanlage Willenscharen mit dem 3D-Laserscanning-System Mensi GS100. *Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik - Beiträge der 4. Oldenburger 3D-Tage 2005*, 224-231.
- HÖNNIGER, C. & KERSTEN, T. & MESCHELKE, K., 2004: Topographische Geländeaufnahme mit terrestrischem Laserscanner. *Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation e.V.*, Band 13, 24. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPf, 333-340.
- KRAUS, K. & PFEIFER, N., 1998: Determination of terrain models in wooded areas with airborne laser scanner data. *IPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 53, 193 – 203.
- MAAS, H.-J., 2005: Akquisition von 3D-GIS Daten durch Flugzeuglaserscanning. *Kartographische Nachrichten*, Vol 55, Heft 1, 3 – 11.
- MIRON, A., 2000: Der Tempel von Schwarzenbach „Spätzrech“, Kr. St. Wendel. Zur Aufarbeitung eines Altfundkomplexes. In: A. Haffner/S. von Schnurbein (Hrsg.), *Kelten, Germanen, Römer im Mittelgebirgsraum zwischen Luxemburg und Thüringen [Koll. Trier 1998]*. *Koll. Vor- u. Frühgesch.* 5 (Bonn 2000) 397-407.

- SITTLER, B., 2004: Revealing historical landscapes by using airborne laser scanning. Laser-Scanners for Forest and Landscape Assessment, Proceedings of the ISPRS working group VIII/2 Volume XXXVI, Part 8/W2, 258-261.
- WIEGERT, M., 2002: Der "Hunnenring" von Otzenhausen, Lkr. St. Wendel. Die Siedlungsfunde und Bebauungsstrukturen einer spätlatenezeitlichen Höhenbefestigung im Saarland. Internat. Arch. 65. Rahden, 2002.

Semi-automatic Remote Sensing River and Fault Analysis for geomorphological and Neotectonics

RICHARD GLOAGUEN¹

Summary: Streams play an important role in the evolution of a landscape and can give us valuable information with respect to erosion rates and tectonic movements. Since rivers respond rapidly to tectonic changes they are a prospective instrument to modern geomorphology. Quantitative measurements of a number of geomorphic indices are commonly used as a reconnaissance tool in tectonic geomorphology studies to identify areas experiencing tectonic deformation. In order to estimate the relative variations of tectonic activity in a study area, we propose to use the combination of different geomorphic indices. We have developed an algorithm allowing stream profile analysis based on elevation information. We have automatized the analysis of river profiles and are able to generate indices maps (e.g. concavity, valley shape), incision and isobase maps. Our correlation and covariance analysis as well as fractal analysis of lineaments and drainage patterns allow us to quantify and locate zones of active deformation. As each method is equivocal due to the number of factors influencing each index, the objective is to generate several maps which, integrated in a GIS allow a better interpretation of the results. Backed with remote sensing data and ground-checking we expect to provide a precise localization of the deformed area and the local strain intensity. We have already tested the algorithm with different DEM types (e.g. radargrammetric, SRTM) with success.

1 Introduction

Rivers flowing along bedrock channel cause the primary non-glacial mechanism of incision. The rate at which channels incise sets the rate at which the rest of the landscape surface evolves, and hence controls the response time of such landscapes to tectonic forcing (Hancock et al. 1998). Therefore, the study of the drainage networks and longitudinal profiles is a suitable approach to explore neotectonics. Several studies tried to extract neotectonic information, mainly rates and patterns of deformation, directly from DEM (e.g. Kirby and Whipple 2001; Lague et al. 2000). At least two gradient indices for river profile analysis are available in the literature. While Hack's gradient index (1973) proposes a logarithmic equation for an equilibrated longitudinal river profile, the steepness index derived from the stream power law assumes a known relationship between slope and catchments area.

¹) R. Gloaguen and the Remote Sensing Group: TU Bergakademie Freiberg, gloaguen@geo.tu-freiberg.de



Figure 1: Drainage system of the Pamir-southern Tien Shan

By examining different rivers, HACK (1957) found that a graded longitudinal profile can be approximated by a simple logarithmic graph following the term

$$H = C - k \ln L . \quad (1)$$

H is the altitude at a point along profile, L is the horizontal distance from drainage divide to this point and C and k are constants. The derivative of equation 1 can be rearranged to

$$\frac{dH}{dL} = \frac{k}{L} . \quad (2)$$

dH/dL is the slope S of the profile, so equation 2 can be written as

$$S = \frac{k}{L} . \quad (3)$$

A detachment-limited incision model asks for a power-law function for river-profile evolution (KIRBY & WHIPPLE 2001). The time rate of change of channel evolution dz/dt can be expressed as:

$$\frac{dz}{dt} = U - E , \text{ or} \quad (4)$$

$$\frac{dz}{dt} = U(x,t) - KA^m S^n , \quad (5)$$

where U is the rock uplift rate, E is erosion, A is upstream drainage area, S is local channel gradient, K is a dimensional coefficient of erosion, and m and n are constants. If a knick-point is generated by an active fault, the reach upstream of the fault is steepened, which causes additional transport energy, which in turn gives rise to enhanced erosion. Immediate downstream, the slope is too small to transport the incoming enlarged sediment load and deposition takes place. As long as erosion is smaller than uplift, steepness and hence, erosion will increase. If erosion catches up with uplift, erosional dynamic equilibrium will be reached at the fault. Given stable rock

reology (i.e. there is no progressive exhumation of more or less resistant rocks), the knick-point will remain stable until the uplift rate changes. Assuming such dynamic equilibrium ($dz/dt=0$), equation 6 can be solved to yield an expression for equilibrium channel gradient.

$$S = \left(\frac{U}{K}\right)^{\frac{1}{n}} A^{-\frac{m}{n}}, \text{ or} \tag{6}$$

$$S = k_s A^{-\theta}, \tag{7}$$

Where θ is called intrinsic channel concavity and k_s is the steepness index with

$$\theta = \frac{m}{n} \text{ and} \tag{8}$$

$$k_s = \left(\frac{U}{K}\right)^{\frac{1}{n}} \tag{9}$$

Equation 8 predicts that concavity θ is completely independent from uplift, while k_s shows a direct proportionality with the rock uplift rate U . Some streams may show a single slope-area scaling for their entire length. In other cases, a longitudinal profile is characterized by changing values of k_s and θ (WOBUS et al. 2006), which reflect spatial or temporal variations in climate, lithology, or uplift rate. These changes are the object of interest. In a plot of slope against catchment area different reaches can be defined and regressed each with a power-law function to obtain values of k_s and θ . Equation 8 is used as the regression model. The values obtained by regression can be plotted in maps for comparison with geologic and tectonic setting. According to equation 9, k_s can be used as a relative uplift rate value. As suggested by WOBUS et al. (2006), a normalized steepness index k_{sn} was used, since k_s and θ are strongly correlated.

2 Methodological development

2.1 DEM generation

The first step is DEM generation: we have generated DEMs using most remote sensing methods (e.g. photogrammetry, radargrammetry, stereogrammetry, InSAR; e.g. GOERNER et al. 2008; GLOAGUEN et al. 2007; KURZ et al. 2007; BOEHME et al. 2006). Depending on the location and the expected resolution, different techniques are selected.

2.2 Stream profile analysis

We have developed an algorithm allowing stream-profile analysis based on elevation information (WOBBE et al. submitted). We have already successfully tested the algorithm with different DEM types (e.g. radargrammetric, SRTM). The drainage network is extracted from DEM data of the area by calculating flow directions at all points using the D8 algorithm, proposed by FAIRFIELD & LEYMARIE (1991) and JONES (2002). Stream longitudinal profiles are identified and selected based upon least cost path analyses, which compute paths of least down slope resistance (i.e. the downstream flow path) and Strahler order. As the extracted streams contain some error, smoothing algorithms are applied, depending upon number of nodes. Besides usual indices (e.g. slopes, Hack's gradient), the stream-power law is used to draw area-slope profiles of all streams. Trends are selected from each profile, based upon knickpoints, which are selected manually. The concavity and steepness indices are calculated by regression analysis. Uplift rates are derived as suggested by WOBUS et al. (2006). Steepness and concavity

indices are plotted on maps to identify their variations. Relative uplift rates can be calculated by estimating the m and n factors. Absolute rates can be estimated, if calibration is available (e.g. terrace dating, cosmogenic isotopes quantification of erosion [RUSLE] e.g. WOBUS et al., 2006).

Our preliminary work shows that most of the rivers in Pamir-southern Tien Shan are not equilibrated. The Panj river is a good example (Fig. 1). This major river first flows parallel to the orogenic trend and then makes a sharp bend northward cutting through major active faults and sutures. Flow through the active deformation zones are marked but strong variations in the river slope. Our first results from various proxies, including low-temperature thermochronology, show that the Shakh dara and the Yasgulem dome, and the Darvaz fault zone are areas are uplift.

2.3 Local correlation of streams and faults

Another parameter allowing the detection and quantification of neotectonic activity is given by the influence of faults on stream geometry and direction. STOYAN & STOYAN (1981) published a method to quantify correlations between geometric structures on maps. Two different line systems A_1 (drainage system) and A_2 (fault system) will be considered. The line densities (intensities) λ_1 and λ_2 of these two systems are measured first:

$$\lambda = \frac{\text{complete line length}}{\text{area of the territory}} \text{ in } \left[\frac{1}{\text{km}} \right] \tag{10}$$

The reduced covariance C_{12} (STOYAN & STOYAN 1981) gives the expected total line-length of A_1 measured in a circle with radius r . According to STOYAN & STOYAN (1983), C_{12} is well approximated by moving a circle at regular intervals along A_1 , measuring total fault lengths inside, and calculating the expected value over all measuring points. C_{12} completely describes the correlation between faults and streams. If A_1 and A_2 are independent, then

$$C_{12}(b_r) = \lambda_2 F(b_r), \tag{11}$$

where $F(b_r)$ is the area of the measuring circle. This method provides a formulation giving the tendency of rivers to flow near faults (“fault attraction”). Even in areas of low strain, such as the Erzgebirge of Saxony, the fault-attraction distance is a good estimator of fault activity (KAESSNER & GLOAGUEN, submitted). We are currently working on new algorithms allowing the quantification of fault attraction (collaboration with D. Stoyan, Freiberg). We are also working on new statistical methods allowing a better quantification of fault intensity (e.g. LOCHMAN et al. 2007).

2.4 Covariance analysis of streams and faults

Computational procedures used to calculate the variance of a property of one data set can be extended to the calculation of a measure of variability between the same properties in two data sets (DAVIS 1986). This measure, the covariance, can be calculated to estimate the correlation between the directions of rivers and faults at varying distances.

$$Cov = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (D_r - \bar{D}_r) (D_f - \bar{D}_f) \tag{10}$$

In this equation, D_i describe the directions of the rivers and D_f the directions of the faults. In order to calculate a covariance for certain distances h between streams and faults, pairs of measurements were ordered according to the distance they embrace. This whole procedure is implemented in MATLAB (SHAHZAD et al. submitted).

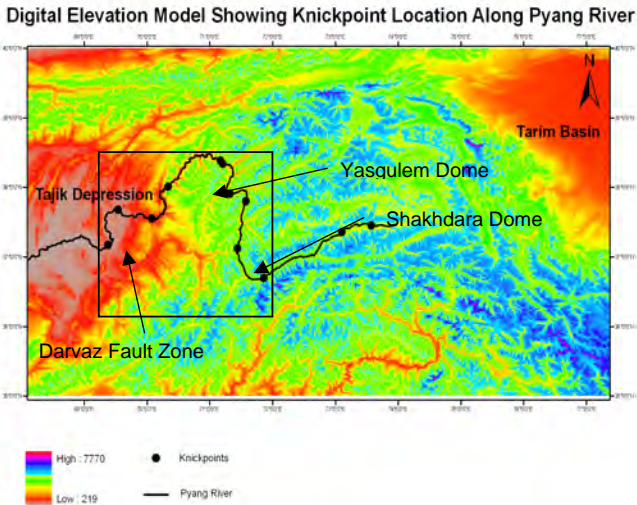


Figure 2: Knickpoints extracted from river profile analysis plotted on a DEM of the Pamir-southern Tien Shan region. The square locates Fig. 3.

2.5 Measurement of valley shapes

The ratio of valley width to valley height can be used to determine the effect of tectonism on valley geometries (e.g. BURBANK & ANDERSON 2001). While small width-to-height ratios suggest prolonged incision and uplift, high ratios show that erosional processes are dominating the landscape (BULL & MCFADDEN 1977).

2.6 Fractal dimension

The estimation of fractal dimensions allows a measure of the degree of complexity by evaluating how a dimension measurement increases or decreases at different scales. The idea here is to quantify the influence of neotectonic activity on the drainage system by measuring the reduction of complexity of the river as the deformation intensity increases. In other words, we expect the drainage system to lose its original complexity (dendritic network) and linearize, as topographic changes triggered by faults will modify the flow network geometry. We already created an algorithm based on semivariograms and power-spectrum density to measure fault-network complexity (GLOAGUEN et al. 2007). For this purpose, we also implemented a box counting method (WONG et al. 2005).

Even at an early stage of development, this method shows interesting results: the fractal dimension is lower in tectonically highly disturbed areas (e.g. the Panj on its northward transect or the intersection between Wunsch and Panj; Fig. 3). In this study, the fractal analysis is also applied to determine a quantitative parameter (the fractal dimension D) for the sinuosity of single-thread meandering channels. Where a braided river pattern is developed, only the main channel is digitized and analyzed using the ruler dimension method. This method is widely used

for 2D investigation of linear structures due to its simplicity and capability of being easily automated (TURCOTTE 1997). To obtain D_R -values ($r =$ ruler dimension), one needs to count the number of steps $N(d)$ taken by walking a divider (ruler) of length d on the river, and plot the logarithm of $N(d)$ versus the logarithm of d . A linear trend of this plot over about one and a half order of magnitudes, and a low standard deviation are evidence that the sinuosity of a river is a fractal and statistically scale invariant over this range of scales (TURCOTTE 1997). The negative slope equals $-D_r$. We assume that the fractal dimension of a straight river reach equals 1 (actual measured values are about 1.02 to 1.06) and that meandering channels have a value of about 1.15 (e.g. NIKORA 1991; TURCOTTE 1997).

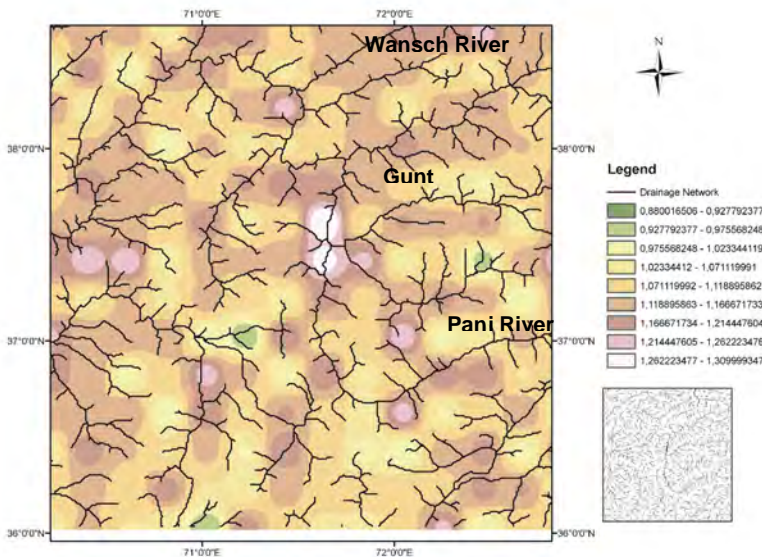


Figure 3: Fractal analysis of the Panj drainage system around Ishkaschim (see localization of study area in Fig.2). The real network used for fractal dimension estimation is shown on the bottom right box.

2.7 Object extraction

Object-based classification is a promising technique for image classification. Unlike pixel-based methods, which only use the measured radiometric values, the object-based techniques can also use shape and context information of scene textures. These extra degrees of freedom provided by the objects allow the automatic identification of geologic structures. We evaluated object-based classification in the context of extraction of faults. Digital elevation models and radar data have been processed. We then determined the statistics of the fault populations. The fractal dimensions of fault dimensions are similar to fractal dimensions directly measured on remote sensing images of the study area using power spectra (PSD) and variograms. These methods allow unbiased statistics of faults and help us to understand the evolution of fault systems. Furthermore, the direct analysis of image texture measured by its fractal dimensions is a good

indicator of the fault statistics and allows us to classify the intensity and type of deformation. We proposed for example that extensional fault networks can be modeled by iterative function system (IFS) (GLOAGUEN et al. 2007).

2.8 Remote sensing erosion quantification

High topography and hardly accessible terrains make field studies on a large-scale cumbersome. Yet, an integrative approach, employing several remote sensing techniques in combination with field studies and task-oriented experimental and numeric simulations, provide the necessary tools to the understanding coupling processes (ANDERMANN & GLOAGUEN submitted). New remote sensing technologies have the capability of measuring physical parameters, such as precipitation, land use, vegetation coverage, soil moisture, and uplift with an area-wide coverage and high spatial resolution. Integrated experimental simulations can provide insights on principal properties and parameter interaction responsible for the landscape evolution. In theory, landscape evolution depends on coupled feedbacks effects, e.g. when erosion does not compensate uplift, the topography becomes uplifted, which is defined as surface uplift (surface uplift = tectonic uplift - erosion). So far, no physical demonstration supports this theoretical approach, which presently is based on intuitive assumptions concerning geomorphologic processes. Numerical modeling based on the principle properties from experimental simulations and with remotely acquired area-wide parameter input, provides a powerful tool to understand the acting processes in mountain belts. These techniques, in combination with conventional remote sensing techniques, allow us to quantify the surface deformation (intensity, timing, localization) and their influence on environmental processes such as surface and underground water flow, seismic and landslide hazard, and, at some extent, land use. The aim of all these subprojects is to generate a suite of tools allowing the quantification of deformation parameters, mainly using remote sensing data.

Our preliminary work indicates that existing remote sensing methods, allowing an estimation of erosion, largely underestimate erosion in tectonically active area. In the Pamir, a non-negligible part of erosion processes is directly tectonically linked and occur during landslides. We are working on remote sensing methods allowing a better constraint on overall erosion in active areas. As erosion is directly correlated to uplift, the rivers are forced to incise rapidly. An estimation of erosion rates will help us to localize zone of tectonic uplift but also allow the quantification of uplift rates as shown previously (stream power law). We are currently calibrating parameters such as precipitation intensities based on remote sensing measurement such a TRMM. We also developed new methods for the remote sensing estimation of soil type using support vector machines (HAHN & GLOAGUEN 2008).

3 Literaturverzeichnis

- ANDERMANN, C. & GLOAGUEN, R., 2008: Remote Sensing estimation of erosion in a tectonically active area: Botekoshi catchment (Nepal), submitted to Int. J. Rem. Sens.
- BÖHME, B.; STEINBRUCH, F.; GLOAGUEN, R.; HEILMEIER, H. & MERKEL, B., 2006: Geomorphology, hydrology, and ecology of Lake Urema, central Mozambique, with focus on lake extent changes, *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, v. 31, 15-16, 745-752. doi:10.1016/j.pce.2006.08.010
- BULL, W. B. & MCFADDEN, L. D., 1977: Tectonic geomorphology north and south of the Garlock Fault, California. In *Geomorphology in arid regions*, D. Doehring, Ed. State University of New York at Binghamton.

- BURBANK, D. W. & ANDERSON, R. S., 2001: Tectonic Geomorphology. Blackwell Science, Cambridge.
- DAVIS, J. C., 1986: Statistics and data analysis in geology. John Wiley and Sons, Inc., New York.
- FAIRFIELD, J. & P. LEYMARIE, P., 1991: Drainage networks from grid digital elevation models. *Water Resources Research*, 27:709-717.
- GLOAGUEN, R.; MARPU, P. & NIEMEYER I., 2007: Automatic Extraction of Faults and Fractal Analysis from Remote Sensing Data, *Nonlin. Processes Geophys.*, 14, 131-138.
- GOERNER, A.; JOLIE, E. & GLOAGUEN, R., 2007: Non-climatic growth of the saline Lake Beseka, Main Ethiopian Rift, accepted by *J. Arid Env.*
- HAHN, C. & GLOAGUEN, R., 2007: Soil type classification using SVM, NPG. In press.
- JONES, R., 2002: Algorithms for using a DEM for mapping catchment areas of stream sediment samples. *Computers & Geosciences*, 28:1051-1060.
- KAESSNER, A. & GLOAGUEN, R.: Recent Tectonics in the Eger Rift? Neotectonic Information from River Analysis. Submitted to *International Journal of Earth Sciences*.
- KIRBY, E. & WHIPPLE, K., 2001: Quantifying differential rock-uplift rates via stream profile analysis. *Geology*, 29(5):415-418.
- STOYAN, D. & STOYAN, H., 1981: Quantifizierung von Korrelationen zwischen geometrischen Strukturen auf geologischen Karten. *Zeitschrift für angewandte Geologie* 28, 5, 240-244.
- KURZ, T.; GLOAGUEN, R.; EBINGER, C.; CASEY, M. & ABEBE, B., 2007: Deformation distribution and type in the Main Ethiopian Rift (MER); a remote sensing study, *J. Afr. Earth Sc.* V. 48, 2-3, 100-114 doi: 10.1016/j.jafrearsci.2006.10.008
- STOYAN, D. & STOYAN, H., 1983: Über eine Methode zur Quantifizierung von Korrelationen zwischen geologischen Liniensystemen. *Zeitschrift für angewandte Geologie* 29, 10 512-517.
- WOBBE, F.; GLOAGUEN, R. & STANEK, K.: River profile analysis for neotectonic analysis. Submitted to *Computer & Geosciences*.
- WOBUS, C.; WHIPPLE, K.; KIRBY, E.; SNYDER, N.; JOHNSON, J.; SPYROPOLOU, K.; CROSBY, B. & SHEEHAN, D., 2006: Tectonics from topography: Procedures, promise and pitfalls. In: Willett, S. D., N. Hovius, M. T. Brandon und D. Fisher (Hrsg.): *Tectonics, climate, and landscape evolution: Geological Society of America Special Paper 398*, S. 55-74. Geological Society of America.
- WONG, A.; WU, L.; GIBBONS, P. B. & FALOUTSOS, C., 2005: Fast estimation of fractal dimension and correlation integral on stream data, *Information Processing Letters*, 95, 91-97.

Spektroradiometrische Untersuchungen im GEO/BIOLabor ,FND Salzstelle Teutschenthal-Bahnhof' (Halle)

**BIRGIT HEIM¹, CORNELIA GLÄßER¹, GREGOR BORG¹, JÖRG REICHERT¹, MATTHIAS THOMAE²,
SABINE CHABRILLAT³ & WILFRIED RICHTER⁴**

Zusammenfassung: An der Salzhalde Teutschenthal bei Halle (Saale) ist nach Durchsickerung salzhaltiger Auslaugungswässer durch Haldenmaterial des Braunkohleabbaus ein GEO/BIO-Labor entstanden: eine FND-Salzstelle inmitten intensiver Mineralfällung. Das GEO/BIO-Labor bietet VNIR-SWIR spektral strukturierte Materialien, wie Sulfatpräzipitate, und pigment- und morphologisch variable Halophyten.

Die spektrale Identifizierbarkeit von $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (Gips) wurde an frischen Substratproben, sowie getrocknet/pulverisiert untersucht. Gipssubstrate, welche getrocknet/pulverisiert die mineralspezifische spektrale Signatur besitzen, zeigen als geländefeuchte Substrate breitere Absorptionsbanden und keine spektrale Doublettenstruktur. Als spektral-strukturierte Bodensignaturen stehen sie aber für die Untersuchung von Boden/Vegetation-Mischsignalen zur Verfügung. Die spektroradiometrischen Analysen unterstützen die schnelle Erstellung eines deskriptiven Modells des Untersuchungsgebietes.

1 Einleitung

Ab Mitte des 20. Jahrhunderts wurden in der historischen Bergbaulandschaft Teutschenthal's bei Halle (Saale) Kali- und Steinsalzverarbeitungsrückstände auf die Braunkohlhalden der ehemaligen Braunkohlengrube 'Langenbogen' (Stilllegung in 1910) aufgehaldet. Im Schachtberggebiet fließen hochmineralisierte, saure Auslaugungswässer ab über grundwasserhemmende lakustrine Sedimente der Weitzschke-Feuchtmulde, und verursachen eine sich ausbreitende Geländeversalzung, pedologische Veränderungen und Sinterbildung. Die großflächige Präzipitation von Sulfatmineralien und weitreichende pedologische Degradationsprozesse kennzeichnen ein hochreaktives geochemisches Milieu, in dem ausgeprägte pedologische und mineralogische Prozesse in beobachtbaren, kurzen Zeitspannen ablaufen. Daher empfahlen bereits KOCH et al. (2002) und RICHTER (2001), das Schachtberggebiet als Geotop des Landes Sachsen-Anhalt aufzunehmen.

Die extremen hydro-pedologischen Randbedingungen wiederum steuern Vegetations-Sukzessionsprozesse und bedingen eine Ökoton-Landschaft (Saumbiotope) von hoher Heterogenität.

¹) Dr. Birgit Heim, Prof. Dr. Cornelia Gläßer, Prof. Dr. Gregor Borg, Dr. Jörg Reichert, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Institut für Geowissenschaften, Von-Seckendorff-Platz 4, D-06120 Halle, e-mail: birgit.heim@email.de, cornelia.glaesser@geo.uni-halle.de, gregor.borg@geo.uni-halle.de, joerg.reichert@geo.uni-halle.de

²) Dr. Matthias Thomae, Landesamt für Geologie und Bergwesen Sachsen-Anhalt Richard-Wagner-Str. 56, D-06114 Halle, e-mail: thomae@lagb.mw.sachsen-anhalt.de

³) Dr. Sabine Chabrilat, Geoforschungszentrum Potsdam, Sektion 1.4 Fernerkundung, Telegrafenberg A17, D-14473 Potsdam, e-mail: chabri@gfz-potsdam.de

⁴) Dr. Wilfried Richter, Preußenstr.3, D-04289 Leipzig

Die floristische Sättigung der sekundären Binnensalzstelle mit über 20 halophilen und halotoleranten Arten kennzeichnet das Flächennaturdenkmal (FND) der ‚FND Salzstelle Teutschenthal-Bahnhof‘, aktualisiert aufgenommen in JOHN (2000) und beschrieben in RICHTER (2001).

Aufgrund der extremen Standortbedingungen des GEO/BIO-Labors steht ein Pool spektral strukturierter und extrahierbarer Materialien zur Verfügung, wie z.B. Sulfatpräzipitate und pigment- und morphologisch variable Halophyten. So bieten sich in Universitätsstandortnähe Forschungsmöglichkeiten zur Gelände- und Laborspektorradiometrie von für das mitteleuropäische Binnenland regional ungewöhnlichen mineralogischen und botanischen Besonderheiten. Bereits in GIERTH (2006) wurden spektorradiometrische Untersuchungen am Haldenmaterial im Rahmen von Laborsimulationen zu den Auslaugungsprozessen der Salzhalde durchgeführt. Nachfolgend werden die ersten Ergebnisse spektorradiometrischer Messungen an Bodensubstraten und Vegetation im Geländejahr 2007 im GEO/BIOLabor vorgestellt.

2 Untersuchungsgebiet

Nordwestlich der Ortslage Teutschenthal-Bahnhof ist die westliche Salzhalde auf historischen Rückstandshalden des Braunkohleabbaus aufgehalde. Die Auslaugungswässer der Kalisalzhalde treten vor allem nördlich der Halde, in einem Bereich eines ehemaligen Austrittsstollens des historischen Braunkohleabbaus aus. Im Südosten grenzt die vom historischen Braunkohlenabbau angeschnittene Saale-Grundmoränenplatte des Schachtberges an die Feuchtsenke. Im Osten der Weitzschke-Feuchtmulde haben sich an Austrittsflächen von Sickerwässern Störstellen mit blanken Bodenflächen innerhalb landwirtschaftlicher Nutzungsflächen gebildet.

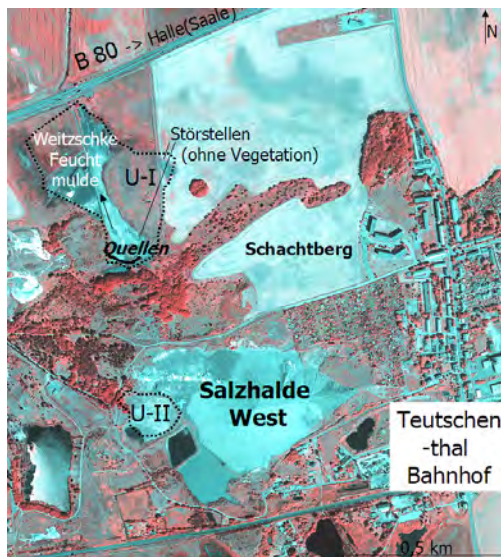


Abb. 1: CIR-Orthofoto, 2006. Untersuchungsgebiete I, II und der Salzhalde West bei Teutschenthal Bahnhof.

Im Abfluss der Sickerwasserquellen sind großflächige blanke Störstellen entstanden, die von Hydro-Halophytenvegetation umsäumt werden. Zu den dominierenden Hydro-Halophyten zählen *Salicornia europaea* und *Sueda maritima* nahe der Wasserlinie, sowie *Spergularia media* topographisch höher zur Wasserlinie.

Nach kurzer Oberflächenpassage der salzhaltigen und schwach sauren Auslaugungswässer tritt eine intensive Sulfatfällung ein. In der Feuchtmulde stehen Gipsinterterrassen an, die mit ockerfarbenen Fe-Präzipitaten verschlämmt sind. An den Muldenrandgebieten außerhalb des Bereiches der kontinuierlich stattfindenden Präzipitationssprozesse liegen Fe-Oxyhydroxid-gefärbte Bereiche der Schlammoberfläche vor. Auf den Sinterflächen findet in jahreszeitlicher Dynamik, abhängig vom Wasserhaushalt, den Haldenlösungsvorgängen und den Temperaturbedingungen, eine zusätzliche, intensive Mineralneubildung von Mineralphasen mit stengeligem und Rosetten-Habitus statt. Die Weitzschke-Feuchtmulde mit Halophyten-Saumbiotopen und intensiver Mineralisierungen bildet das Untersuchungsgebiet U-I (Abb.1).

Westlich der Halde sind stillgelegte Tongruben aufgeschlossen. Am südwestlichen Salzhaldenfuß sammeln sich die Auslaugungswässer der Halde in abgedämmten Randseen. Angrenzend liegt eine trockene, teilweise zementierte und von Lösungsvorgängen geprägte Fläche vor, die zu einem Bereich der ehemaligen Tongruben hin abfällt. Zu Zeiten trockener Witterungsbedingungen bilden sich Polygonstrukturen. Anthropogene Strukturen sind von grobstolligen Reifenprofilen tief eingeschnittene MotoCross-Spuren. Die Vegetation ist als niedrige spärliche Krautschicht ausgebildet, oft auf die Lösungssenken und Geländerrisse bis - abbrüche und Reifenspurenindrücke konzentriert. Dieser Bereich bildet das Untersuchungsgebiet U-II (Abb. 1).

3 Datenmaterial und Methodik

Im Folgenden vorgestellt werden spektroradiometrische Gelände- und Labormessungen des Geländejahres 2007 im GEO/BIOLabor „FND Salzstelle Teutschenthal-Bahnhof“. In situ wurden Vegetationsbestände, Substratoberflächen und Einzelobjekte erfasst (Tabelle 1), sowie im Labor Substratproben jeweils frisch und getrocknet/pulverisiert gemessen.

Tab. 1: Untersuchungsobjekte und spektroradiometrische Messungen im GEO/BIOLabor.

Untersuchungsgebiet	Untersuchungsobjekt	R(λ)-Messmethodik	Mess-Code
U-I <i>Weitzschkefeuchtmulde</i> <i>N' der Salzhalde</i>	<i>Saumbiotope</i>	R(λ)-Messung über Pflanzenvergesellschaftungen	A
	<i>Mineralfällungen</i>	Synthetische R(λ)-Flächenmessungen der Sinter-, und Fe-Oxyhydroxidebereiche	B
U-II <i>zementierter trockener Bereich</i> <i>SW' der Salzhalde</i>	<i>Heterogene Boden-Vegetation</i>	R(λ)-Messung über Einzelpflanzen	A
	<i>Mischfläche mit lockerer Krautschicht über zementierter Fläche</i>	Synthetische R(λ)-Flächenmessungen von Boden/Vegetation-Mischbereichen	B
	<i>zementierte helle Flächen</i>	Synthetische R(λ)-Flächenmessungen	B
<i>U-I: Kristalle mit kurzprismatischen Habitus</i> <i>U-II: zementierte, helle Kruste; pulvrig-erdig ausgebildete Kruste, massige bis plattige Substrate</i>		R(λ)-Labormessungen an frischen und getrocknet/pulverisierten Proben	C

Gelände- und Labormessungen wurden mit dem Analytical Spectral Devices (ASD, Boulder, USA) FieldSpecPro Geländespektrometer (350 – 2500 nm, Visible Near Infrared - Shortwave Infrared (VNIR-SWIR)) mit einer 8° Voroptik durchgeführt. Gemessen wurde der spektrale Reflexionskoeffizient als Quotient aus der vom Material reflektierten Fraktion der auf das Material auftreffenden Einstrahlung, im folgenden wird dieser nach dem ASD Messvorgang automatisiert ausgegebene Quotient Reflektanz, $R(\lambda)$, genannt. ASD-Messvorgaben und technische Hinweise sind in HATCHELL (1999) aufgeführt.

3.1. Vegetationsuntersuchungen

Für Geländemessungen über Vegetationsbestand wurde mit 8° Voroptik in 90° Azimutwinkel zur Sonne eine 0,3 x 0,2 m Fläche im gleichbleibenden Abstand (15 cm Höhe über oberster Blattschicht) gescannt mit einer Messeinstellung von $n = 20$ Messungen, bzw. im Falle alleinstehender Individuen wurde im gleichbleibenden Azimutwinkel von 90° zur Sonne mit $n = 10$ gemessen, und jeweils die Einzelmessungen derselben Spezies an verschiedenen Individuen gemittelt. Über die Field-of-View (FOV) Reduzierung der 8° Voroptik konnte beim Messvorgang das spektrale Bodensignal ausgeschlossen werden. Diese Messmethodik wird mit dem Mess-Code (A) in Tabelle 1 aufgeführt. Im Gelände wurde die abwärtsgerichtete solare Gesamtstrahlung als diffus reflektierte Strahldichte eines ca. 99% reflektiven Spectralon® Weißstandards gemessen. Saisonal wurden mehrere Messkampagnen durchgeführt, um die unterschiedlichen Phänostufen (Sprössung, Blüte, Frucht) zu erfassen.

Parallel zur spektrometrischen Messung wurde die Phytospezies, die Bestandszusammensetzung, und die gemittelte Vegetationshöhe aufgenommen, und jeweils den Messbereich erfassende Vertikalfotos und Leaf Area Index LAI-Messungen mit dem Environmental and Biotechnology Research Systems (LI-COR, Nebraska, USA) LAI-2000 Plant Canopy Analyzer durchgeführt.

3.2 Synthetische Flächenmessungen

Zur Generierung von synthetischen $R(\lambda)$ -Flächenwerten wurden großflächige, mehrere m^2 große Mittelungen vorgenommen über Typusflächen. So zum Beispiel der Typus „zementiert mit heller Kruste, mit gruppenweiser Krautschicht bewachsen“ im U-II, sowie die „versinternten Bereiche“ und die „Fe-Oxyhydroxid-Randbereiche“ des U-I. Diese Typusflächen wurden in ihrer jeweiligen Flächenausdehnung im 3-maligen Messvorgang bei gleichmäßigem langsamen Laufschrift abgegangen und mit $n = 50$ ausgelösten Messungen gemessen, den Sensor mit 90° Azimut zur Sonne ausgerichtet. Die synthetische Flächenmittelung wird in Tabelle 1 unter Messmethodik (B) aufgeführt.

Im U-II befindet sich ein faziell und topographisch abgrenzbarer Durikrusten-Flächentypus innerhalb einer 40 m^2 Senkungsfläche. Die Fläche ist im Spätsommer geprägt von einer 0,1 bis 0,25 m hohen, heterogenen Krautschicht (dominiert von den Halophyten *Aster tripolorum* und *Spergularia media*) in der Phänostufe ‚Blüte‘. Die Flächenanteile von Bodenfläche und Vegetationsbestand, sowie typischer Vegetationsvergesellschaftungen wurden mittels eines 0,5 m x 0,5 m Schätzrahmens abgeschätzt. Die Flächenanteilsschätzung zeigt einen Bodenanteil von 60 %, und einen Vegetationsanteil von 40 % im Spätsommer. Dieser Typus „zementiert mit heller Kruste, mit gruppenweiser Krautschicht bewachsen“ wurde als 40 m^2 -Fläche mit Messmethodik (B) erfasst, und auch die jeweils prägenden Einzelobjekte mit Messmethodik (A) gemessen. Zusätzlich wurden zementierte Bereiche der Substratoberfläche ohne Vegetationsanteil als synthetisches $R(\lambda)$ -Flächensignal gemittelt.

3.3 Labor-Substratmessungen

Materialproben wurden in den Bereichen von auffällig gefärbten, bzw. strukturell auffälligen Oberflächen genommen, sowie tiefere Substratproben bis 0,5 m Tiefe.

Die Proben wurden spektroradiometrisch mit ASD FieldSpecPro jeweils als frische Proben in ihrem Feuchtzustand und natürlichem Mineralhabitus, sowie in pulverisierten und getrockneten Aufbereitung gemessen. Die Phasenzusammensetzung wurde mittels Pulver-Röntgendiffraktometrie an einem Siemens D5000 (Bragg-Brentano-Geometrie) bestimmt.

Jeweils 500 g Substrat wurde mit vorsichtiger Lufttrocknung, Mörserung und mit einer 0,2 mm Siebung als homogenisierte Probe für die spektroradiometrische Messung aufbereitet. Im Labormessaufbau beleuchtet eine Kaiser Studiilight 1000 Halogenlampe (3400 Kelvin) im 40° Zenithwinkel die Probe. Die 8° Voroptik wird im Nadir in 15 cm Abstand über die Materialprobe in der Petrischale geführt. Die abwärtsgerichtete direkte Strahlung der Halogenlampe wird als diffus reflektierte Strahlendichte eines ca. 99% reflektiven Spectralon® Weißstandards erfasst, und im automatischen Software-Ausgabeprozess des spektralen Messquotienten $R(\lambda)$ verrechnet.

4 Ergebnisse

Aus dem laufenden Projekt werden die folgenden Daten, Analysen und vorläufigen Interpretationen vorgestellt: Geländespektrometernmessungen der Halophytenbestände von *Salicornia europaea* und *Suaeda maritima* (U-I); synthetische Flächenmessung der zementierten, mit lockerer Krautschicht bewachsenen Typusfläche (U-II); spektroradiometrische Messungen vom natürlichen Vorkommen zur aufbereiteten getrockneten und pulverisierten Materialprobe.

4.1 Vegetationsuntersuchungen

In Bezug auf spektroradiometrische Vegetationsuntersuchungen bietet die zonierte Halophytenvegetation des GEO/BIOLabors eine hohe VNIR-SWIR-Variabilität aufgrund ihrer reichen Morphologie (Pflanzenstruktur) und variablen Pigmentzusammensetzung (Chlorophylle, Carotinoide, Anthocyane). In Abbildung 2 werden $R(\lambda)$ -Spektren (Mittelwert \pm Standardabweichung) von Dominanzbeständen der *Salicornia europaea* und *Suaeda maritima* im phänologischen Stadium ‚Blüte‘ vorgestellt. Die vertikale Morphologie der Hydro-Halophyten ohne schräg-horizontale Blattelemente und deren dichter Kurzwuchs ließen keine LAI-Messungen entsprechend den Messqualitätsvorgaben zu. Die Bestandsdichte wurde stattdessen visuell im Gelände mit einer Einteilung in drei Stufen (dicht, licht, vereinzelt) eingeschätzt und ist im Vertikalfoto dokumentiert. Die vorgestellten $R(\lambda)$ -Spektren *Salicornia europaea* und *Suaeda maritima* sind von dichten Beständen, ohne Einfluss des Bodensignals. Zwischen der Messung der beiden Bestände lag ein Messzeitabstand von 30 min, die Bestände befanden sich in jeweils ca. 10 cm Höhe über der Wasserlinie, so dass Messvarianz aufgrund unterschiedlicher Atmosphären- und Bodenfeuchtigkeit unterdrückt wird. Im laufenden Messvorgang bewirken die Bestands- bis Blattbewegungen, und die Variationen in der Blattbeschattung eine Messwertvarianz im NIR-SWIR Bereich. Mit der in (A) beschriebenen Messmethodik über eine Fläche kann eine Messmittelung dieser Einflüsse erreicht werden, und das $R(\lambda)$ -Spektrum wird als Mittelwert \pm Standardabweichung dargestellt.

Die laufenden Untersuchungen weisen darauf hin, dass bei den untersuchten Halophytenbeständen die gemittelte Vegetationshöhe, ein technisch aufwandfrei zu erfassender Geländeparameter, einen geeigneten „Ground-Truth“ Vegetationsparameter stellt, da die NIR $R(\lambda)$ -Werte (700 bis 1400 nm) positiv auf die Höhe des Pflanzenbestandes reagieren.

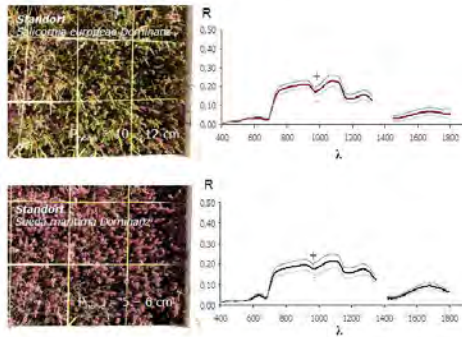


Abb. 2: Vertikalfotos der Halophyten-Standorte *Salicornia europaea* (10 bis 12 cm Bestandshöhe) und *Sueda maritima* (5 bis 6 cm Bestandshöhe). Gemittelte Reflektanz $R(\lambda)$ Spektren über $0,3 \times 0,2$ m Messflächen, Mittelwert \pm Standardabweichung; $\lambda = \text{nm}$.

4.2 Synthetische Flächenmessungen

Die helle Substratoberfläche in den Tiefensenken des U-II ist größtenteils zementiert. Die zementierte Oberfläche wurde im Gelände aufgrund visueller Parameter (weißlich, Seidenglanz und Lösungsspuren) vorläufig als gipshaltiges Substrat angesprochen. Stellenweise positive HCL-Reaktion kann auf CaCO_3 hinweisen. Im Sommer entwickelt sich die Vegetation zu einer lückigen Krautschicht.

Das nach Messmethodik (B) synthetisch generierte $R(\lambda)$ -Spektrum des Boden-Vegetations-Mischsignals (Spektrum B in Abb. 3) zeigt nicht die mineralspezifische spektrale $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ Signatur, mit scharfen Absorptionsbanden und ausgebildeter Doublettenstruktur mit Minima um 1450 nm, 1500 nm, und 1545 nm („USGS Gips 1,2“, Abb. 4a). Aus Messungen über der zementierten Oberfläche, bei denen Vegetation ausgeschlossen wurde, entsteht ein helleres $R(\lambda)$ -Spektrum mit einer flacheren NIR-Schulter, und ebenfalls einer tiefen und breiten Absorptionsbande bei 1450 nm. Die mineralspezifische spektrale Doublettenstruktur mit Minima bei 1450 nm, 1500 nm, und 1545 nm ist nur angedeutet. Auch im reinen Bodensignal drückt sich nicht die vollständige und scharfstrukturierte spektrale $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ Signatur aus.

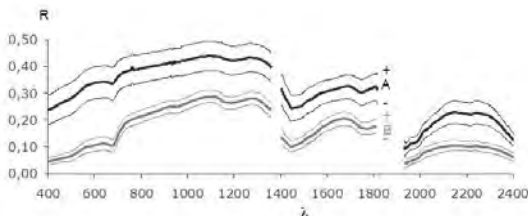


Abb. 3: Reflektanz $R(\lambda)$ Spektren, Mittelwert \pm Standardabweichung; $\lambda = \text{nm}$.

A gemittelte Einzelmessungen ($n = 20$) der

B Synthetisches Flächensignal ($n = 150$):

Vegetationsbedeckung 40 %; Krautschicht, **K**, 0.1 – 0.25 m h; gruppen-/truppenweise wachsend, **2,3**; Phänostufe blühend, **b**.

4.3 Labor-Substratmessungen

Die visuelle Geländeansprache der hellen Krustenbereiche im U-II wies auf Gipssubstrat hin. Dennoch besitzt das großflächig gemittelte $R(\lambda)$ -Spektrum nicht die $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ mineralspezifische spektrale Signatur, sondern breitere Absorptionsbanden. Die Untersuchungen der Oberflächenkruste zeigten strukturelle Unterschiede zwischen zementierten und vereinzelt pulvrig-erdigen Bereichen. Verschiedene Substratproben des U-II wurden in ihrem natürlichen Habitus mit Geländefeuchte und getrocknet/pulverisierter Aufbereitung spektroradiometrisch gemessen (Tabelle 2), sowie eine durchsichtig auskristallisierte Mineralphase (U-I).

Tab. 2: Probe, Vorkommen *in situ*, Munsell-Farbe (natürlicher Habitus mit Geländefeuchte / getrocknet-pulverisierte Probe **P**) und Mineral-Hauptphase (Röntgendiffraktometrie).

Probe	Vorkommen <i>in situ</i>	Munsell-Farbe natürlicher Habitus / P pulverisiert	Mineralphase
T1-3	durchsichtig auskristallisiert, kurzprismatischer Habitus (U-I)	-	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
T2-1	zementiert, Oberflächenkruste (U-II)	T2-1 H2,5Y 7-3 pale yellow / T2-1P H5Y 8-1 white	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
T2-2	erdig-pulvrig, Oberflächenkruste (U-II)	T2-2 H5Y 8-3 white / T2-2P H5Y 8-2 white	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
T2-4	massig, Aggregat unter Oberflächenkruste (U-II)	T2-4 H2,5Y 8-3 pale yellow / T2-4P H10YR 8-2 white	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$

Mineralspezifische $R(\lambda)$ -Spektren können aus spektralen Referenz-Datenbanken abgerufen werden, wie z.B. der USGS Spectral Library (CLARK et al., 1993). „USGS Gips1“ (G1), ist als reine, durchsichtige Gipsvarietät, Selenit, beschrieben (CLARK et al. 1990), „USGS Gips2“ (G2) als reiner, feinkörnig-weißer Gips (KRUSE et al. 1992) (Abb. 4a).

Bei den spektroradiometrischen Messungen der geländefeuchten Substratproben (Abb. 4b) maskiert die Absorption des fluiden H_2O (Geländefeuchte) die kristallinen H_2O und OH^- SWIR-Absorptionsbanden. Spektral signifikant sind tiefe und breite Absorptionsbande zwischen 1430 und 1490 nm und zwischen 1920 und 1970 nm. Die breite Bande bei 1970 nm sowie der gesamte SWIR-Wellenlängenbereich ist generell bei Proben mit zu hohem Feuchtgehalt verwascht.

Dagegen weisen $R(\lambda)$ -Spektren derselben Substratproben jeweils getrocknet/pulverisiert aufbereitet, die $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ mineralspezifischen Absorptionsbanden, und eine gut ausgebildete SWIR-Doublettenstruktur auf (Abb. 4c). Das $R(\lambda)$ -Spektrum über den pudrig-erdigen Bereichen der Oberflächenkruste (Abb. 4b) weist die mineralspezifische $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ Signatur mit gut ausgebildeter Doublettenstruktur auf, bereits ohne die Laboraufbereitung mit Trocknung und Mörserung.

Über die spektrale $R(\lambda)$ -Signatur der getrocknet/pulverisierten Proben konnten die untersuchten Substrate spektroradiometrisch als Gips angesprochen werden. Die pulvrig-erdigen Oberflächenbereiche und der Kristall sind bereits *in situ* spektral bestimmbar.

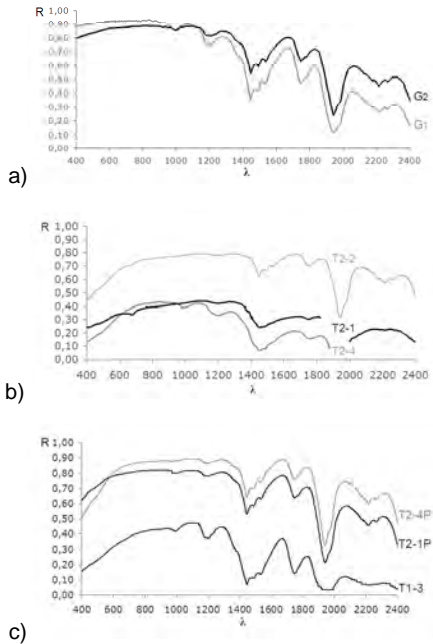


Abb. 4 a, b, c: Reflektanz $R(\lambda)$ Spektren, $\lambda = \text{nm}$.

a) G₁: „USGS Gips 1“, Selenit, durchsichtig, (CLARK et al. 1990); G₂: „USGS Gips 2“, feinkörniger Gips (KRUSE et al. 1992).

b) T2-1: zementierte Oberflächenkruste; T2-2: pulvrig-erdige Bereiche der Oberflächenkruste; T2-4: massiges Aggregat unter Oberflächenkruste. Die durch Feuchtgehalt verrauschten Wellenlängenbereiche der Spektren sind nicht dargestellt.

c) Proben T2-1 und T2-4 getrocknet/pulverisiert als T2-1P, T2-4P; T1-3: Kristalle (durchsichtig) mit kurzprismatischem Habitus.

5 Diskussion

Die Ergebnisse verweisen auf das Potential, im GEO/BIOLabor „FND Salzstelle Teutschenthal-Bahnhof“ bei Halle (Saale) spektroradiometrische Fragestellungen untersuchen zu können. Das GEO/BIOLabor bietet spektral strukturierte Materialien, an welchen kleinräumig Geländemessmethodiken untersucht und optimiert werden können. So steuern wir bei Geländespektrometernmessungen über Halophytenvegetation der hohen Messvariabilität im NIR-SWIR Wellenlängenbereich mit der Messmethodik der über cm^2 mittelnden Messungen entgegen. Die gemittelte Bestandshöhe drückt sich in der Höhe der NIR- $R(\lambda)$ -Werte des Vegetationsbestandes aus. Das bedeutet, bei vergleichbarer Bestandsdichte können für quantitative spektroradiometrische Analysen allometrische Beziehungen zur Biomasse erstellt werden.

Synthetische Flächen $R(\lambda)$ -Signale wurden generiert, um Fragestellungen der spektralen Boden-Identifizierung nachzugehen, wie z.B. ob mineralspezifische Absorptionsbanden in Boden-Vegetations-Mischpixel erkannt werden. Als spektral wiedererkennbarer Boden wurden zementierte Flächenbereiche im U-II ausgewählt, welche im Gelände visuell als Gipssubstrat angesprochen wurden. Weder das synthetische Boden/Vegetations-Mischsignal noch das reine in-situ Bodensignal der zementierten Oberflächenbereiche zeigt die mineralspezifische spektrale $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ Signatur. Da das Bodenspektrum aber spektral strukturiert ist, bietet sich der Bodentypus des U-II mit dieser spektralen Identifizierbarkeit für spektrale Untersuchungen zum Boden/Vegetationssignal in verschiedenen Stadien der Vegetationsbedeckung an.

Um die spektrale Identifizierbarkeit des im Gelände als Gips angesprochenen Oberflächensubstrates vertieft zu untersuchen, wurden Substratproben in ihrem natürlichen Habitus sowie als getrocknet/pulverisierte Proben spektroradiometrisch gemessen. Da bei getrocknet/pulverisierten Substraten die Absorptionsprozesse des fluiden H_2O (Geländefeuchte) nicht mehr dominieren, und die Partikel als Mehrfachstreuer wirken, werden helle, stark strukturierte $R(\lambda)$ -Spektren gemessen. Dadurch können optimale spektrale Qualifizierungsanalysen vorgenommen werden. Über die spektrale $R(\lambda)$ -Signatur der getrocknet/pulverisierten Proben konnten die untersuchten Substrate als Gipssubstrate angesprochen werden.

Die Messungen in den Untersuchungsgebieten zeigen aber auch, dass die erdig-puderigen Krustenbereiche im U-II bereits *in situ* die signifikanten spektralen $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ Signaturen aufweisen. Die großflächig (vermutlich aus Sanierungsmassnahmen) entstandenen Gipssubstrate am südwestlichen Haldenfuß bilden eine pedologisch und botanisch bemerkenswerte Bergbaufolgelandschaft, die bis dato noch nicht beschrieben wurde.

Im Hinblick auf die Vorbereitung zukünftiger hyperspektraler Satellitenmissionen mit Monitoring-Programmen zur Landdegradation in ariden Gebieten, wie die hyperspektrale EnMAP-Mission (STUFFLER et al., 2007), kann die mitteldeutsche Bergbaufolgelandschaft Möglichkeiten zu spektroradiometrischen Untersuchungen bieten. Vergleichbare Oberflächensubstrate in ariden Gebieten liegen als pedogene Gipsoberflächen (Gypcretes) vor. Deren gipshaltigen Oberflächensubstrate weisen sowohl zementierte Krustenbereiche als auch puderig-erdige, feinkörnige Oberflächen auf (CHEN, 1997).

In der vorliegenden Untersuchung im GEO/BIOLabor ‚FND Salzstelle Teutschenthal-Bahnhof‘ stellen wir vor, dass Gelände- und Laborspektrometrie als Methoden für die schnelle Erstellung von deskriptiven Modellen des Untersuchungsgebiets einsetzbar sind.

5 Literaturverzeichnis

- CHEN, X.Y. 1997: Pedogenic gypcrete formation. *Geoderma*, **77**, 39-61.
- CLARK, R.N.; KING, T.V.V.; KLEJWA, M.; SWAYZE, G.A. & VERGO, N., 1990: High spectral resolution reflectance spectroscopy of minerals: *Journal of Geophysical Research*, **95** (8B), 12653-12680.
- CLARK, R.N.; SWAYZE, G.A.; GALLAGHER, A.J.; KING, T.V.V. & W.M. CALVIN, 1993: The U. S. Geological Survey, Digital Spectral Library, U.S. Geological Survey Open File Report 93-592, 1340 S.
- GIERTH, F., 2006. Ablaugung und Akkumulation von Bergehaldenmaterial der Grube „Deutschland“ Teutschenthal (geologische, mineralogische, spektrometrische Untersuchungen und Simulationsversuche). Diplomarbeit, Universität Leipzig, Fakultät für Physik und Geowissenschaften

- HATCHELL, S.D.C., (ED.), 1999: Analytical Spectral Devices, Inc. (ASD) Technical Guide 4th Ed., 1999 .
- JOHN, H., 2000: Zur Ausbreitung von Halophyten und salztoleranten Pflanzen in der Umgebung von Kali-Rückstandshalden am Beispiel des FND „Salzstelle bei Teutschenthal-Bahnhof“ Saalkreis. Mitt. Florist. Kart. Sachsen-Anhalt, **5**: 175-197.
- KOCH, T.; STOTTMEISTER, B. & THOMAE, M., 2002. Ein junger Geotop bei Teutschenthal. Hallesches Jahrb. Geowiss., **24**: 105-111.
- KRUSE, F.A., & P.L. HAUFF, (EDS.), 1992: The IGCP-264 Spectral Properties Database. IUGS/UNESCO, Special Publication, 211 S.
- RICHTER, W., 2001: Salzgewinnung und Umweltbelastung (am Beispiel des FND „Salzstelle bei Teutschenthal-Bahnhof“). Hallesches Jahrb. Geowiss, **23**, 137-152.
- STUFFLER, T.; KAUFMANN, H.; HOFER, S.; FORSTER, K. P.; SCHREIER, G.; MUELLER, A.; ECKARDT, A.; BACH, H.; PENNE, B.; BENZ, U. & HAYDN, R., 2007: The EnMAP hyperspectral imager-An advanced optical payload for future applications in Earth observation programmes. Acta Astronautica, **61** (1-6), 115-120.

Statusbericht zur Standardisierung für Photogrammetrie und Fernerkundung

WOLFGANG KRESSE¹

Zusammenfassung: Im Berichtszeitraum des Jahres 2007 wurde innerhalb von GEOSS eine Normungsgruppe gegründet, das „Standards and Interoperability Forum (SIF)“. Innerhalb des ISO/TC 211 startet die ISO 19130 „Imagery sensor models for geopositioning“ mit aktualisiertem Inhalt und neuem Namen. EuroSDR befasst sich umfassend mit der Praxiseinführung von digitalen photogrammetrischen Ausnahmesystemen. Das OGC bearbeitet vor allem globale Themen mit großer Breitenwirkung wie Google Earth und Gebäude-Informations-Modelle.

1 Einleitung

Die Tradition der vergangenen Jahre fortsetzend wird an dieser Stelle über den Fortgang der Bemühungen um Normen und Standards berichtet. Die Highlights des Berichtszeitraums sind ein neuer globaler Ansatz, nämlich das „Standards and Interoperability Forum (SIF)“, welches die neue Normungsgruppe des weltweiten Projektes GEOSS (Global Earth Observation System of Systems) darstellt, und die hoffentlich erfolgreichere Zweitaufgabe der ISO 19130, jetzt unter dem Titel „Imagery sensor models for geopositioning“.

Neben GEOSS und ISO/TC 211 „Geographic information / Geomatics“ sind vor allem auch die Arbeiten von EuroSDR (European Spatial Data Research) und dem OGC (Open Geospatial Consortium) beachtenswert.

2 GEOSS

Das internationale Projekt GEOSS wurde ins Leben gerufen, um den drängenden globalen Herausforderungen wie Klimawandel und Gefährdung der Artenvielfalt konkret begegnen zu können. Der vom G8-Gipfel initiierten Gruppe haben sich inzwischen über 70 Staaten angeschlossen.

Innerhalb von GEOSS wurde im Sommer 2007 eine Normungsgruppe mit dem Namen „Standards and Interoperability Forum (SIF)“ gegründet. SIF ist dem Architecture and Data Committee (GEO-ADC) von GEOSS zugeordnet und wird von Siri Jodha Singh Khalsa geleitet. Er ist Mitarbeiter des U.S. National Snow and Ice Data Center in Boulder, Colorado, und Repräsentant von IEEE.

Mit regelmäßigen Zusammenkünften im zwei-bis-drei Wochenrhythmus, meist organisiert als gemischte Vor-Ort- und Telekonferenz, war die Gruppe fleißig. Derzeit wird eine Übersicht über existierende relevante Normen und Standards erarbeitet und modern in ein Registry eingetragen. Die bisherige Liste der Normen und Standards enthält vor allem Entwicklungen der ISO, des OGC und einiger US-amerikanischen Behörden.

¹⁾ Wolfgang Kresse, Hochschule Neubrandenburg, Postfach 110121, 17041 Neubrandenburg, Tel. 0395/5693-355, Fax 0395/5693-399, kresse@hs-nb.de

Etwas unklar bleibt die genaue Zielstellung der Gruppe, weil die globale Sicht auf notwendige Normen auch eine der vornehmsten Aufgaben der ISO ist. Demzufolge sind bereits inhaltliche Doppelungen zu beobachten.

Der Berichtersteller arbeitet als Beauftragter der ISPRS regelmäßig im SIF mit.

3 ISO

Der Arbeitsschwerpunkt des ISO/TC 211 verlagert sich zu Location Based Services und dem Urheberrecht an Geodaten, während gleichzeitig die GIS-Normen der ersten Generation der Überprüfung unterzogen werden, die formal alle fünf Jahre gefordert ist. Die für Photogrammetrie und Fernerkundung relevanten Normen sind entweder fertig oder auf einem sicheren Weg.

Die folgende Liste zeigt die Titel der aktuell in Arbeit befindlichen Normen und die geplanten Veröffentlichungszeiten.

Erstmalige Normungsprojekte von Photogrammetrie und Fernerkundung

- 19101-2 „Reference model – Part 2: Imagery” (2008-09)
- 19115-2 „Metadata – Part 2: Extensions for imagery and gridded data” (2009-05)
- 19129 „Imagery, gridded and coverage data framework” (2008-07)
- 19130 „Imagery sensor models for geopositioning” (noch unbestimmt)
- 19144-1 „Classification Systems – Part 1: Classification system structure” (2009-04)
- 19144-2 „Classification Systems – Part 2: Land Cover Classification Systems LCCS” (2010-06)

Erstmalige Normungsprojekte, ohne Photogrammetrie und Fernerkundung

- ISO 6709 „Standard representation of geographic point location by coordinates” (2008-09)
- 19111-2 „Spatial referencing by coordinates – Part 2: Extension for parametric values” (2009-12)
- 19126 „Feature concept dictionaries and registers” (2009-05)
- 19141 „Schema for moving features” (2008-01)
- 19142 „Web Feature Service” (2009-11)
- 19143 „Filter encoding” (2009-11)
- 19145 „Registry of representations of geographic point location” (noch unbestimmt)
- 19146 „Cross-Domain Vocabularies” (2009-12)
- 19147 „Transfer Nodes” (noch unbestimmt)
- 19148 „Location-Based Services – Linear Referencing” (2008-09)
- 19149 „Rights expression language for geographic information – GeoREL” (2008-09)
- 19151 „Dynamic Position Identification Scheme for Ubiquitous Space (u-Position)” (2011-09)

Revision von Normen der ersten Generation

- 19103 „Conceptual schema language” (2010-10)
- 19104 „Terminology” (2008-03)
- 19110 „Methodology for feature cataloguing” (2008-10)
- 19113 „Quality principles” (2010-10)
- 19117 „Portrayal” (2010-06)
- 19118 „Encoding” (2009-12)
- 19119 „Services” (2008-01)

Die Neuauflage der jetzt „Imagery sensor models for geopositioning“ titulierten ISO 19130 wurde in langwierigen inner-US-amerikanischen Beratungen vorbereitet, oft unter direkter Beteiligung des als Editor dieser Norm fungierenden Berichterstatters. Das Ergebnis ist ein Dokument von etwa 170 Seiten, das die USA dem ISO/TC 211 gleich als Committee Draft zur Abstimmung vorlegen wollen. Man hofft dadurch, schon in etwa einem Jahr zu einer Veröffentlichung der Norm zu gelangen. Mit wesentlichen Bedenken von anderen stimmberechtigten ISO-Mitgliedern ist nicht zu rechnen, da diese der ursprünglichen Version bereits zugestimmt hatten.

Die ISO 19130 enthält Metadaten für die Georeferenzierung von Bilddaten. Die Metadaten sind sowohl nach Sensortypen als auch nach Orientierungsverfahren gegliedert. Bezüglich der Sensortypen beschreibt die Norm Frame sensor, Pushbroom sensor, Whiskbroom sensor und Synthetic Aperture Radar. Bei den Orientierungsverfahren wird zwischen der geometrisch strengen Lösung (physical sensor model), der Näherungslösung (correspondence model, functional fit) und dem True Replacement Model (TRM) unterschieden. Das TRM ist bei militärischen Anwendungen verbreitet und verwendet eine Korrekturmatrix zum schnellen Zugriff aus vorher berechnete Orientierungsdaten.

4 EuroSDR

EuroSDR hat seinen Status als wichtiges und schlagkräftiges Gremium zur Vorbereitung von Standards in Photogrammetrie und Fernerkundung ausgebaut. Der Arbeitsschwerpunkt sind immer noch die digitalen photogrammetrischen Aufnahmesysteme. Die Liste zeigt einen Überblick über aktuelle Projekte.

Digitale Aufnahmesysteme

- Radiometrische Aspekte von digitalen Bildern
- Integration von Airborne Laser Scanning und Bilddaten
- EuroDAC² = European Digital Airborne Camera Certification
- Digitale Mittelformatkameras

Anderes

- 3D Stadtmodelle
- Digital Globes
- Best Practice paper zur Generalisierung
- Modellierung von Geschäftsprozessen

EuroSDR war einer von vier Sponsoren eines Workshops zum Thema „Production Partnership Management“ beim Ordnance Survey in Southampton, Großbritannien, im November 2007. Dieser Workshop hatte zum Ziel, die Möglichkeiten für eine internationale Norm auszuloten, die das Verhältnis von Auftragnehmer und Auftraggeber bei der Vergabe von Geodatendienstleistungen regelt. Der Berichtersteller gehörte neben zwei Kollegen aus Großbritannien und Finnland zum „Technical Programme Team“.

5 OGC

Das Open Geospatial Consortium befasste sich im vergangenen Jahr vor allem mit Themen großer Breitenwirkung. Dazu zählen Google Earth und Gebäude-Informations-Modelle. Nicht weniger umfassend ist der Versuch, einen generischen Rahmen für die Zertifizierung und

Übertragung von Qualitätsparametern für Geodaten zu schaffen. Nicht zu unterschätzen ist das weiterhin große Interesse des OGC an Kooperationen mit europäischen Partnern.

- Draft OpenGIS® Encoding Standard (OGC KML) for KML 2.2, a XML-based encoding schema for expressing geographic annotation and visualization on existing or future web-based online maps (2d) and Earth browsers (3d).
- Define a framework and a grammar for the certification and communication of spatial data quality.
- Testbed to advance progress on communications interoperability for Building Information Models (BIM).

Im Vergleich dazu sind Photogrammetrie und Fernerkundung etwas aus dem Blickfeld geraten. Beachtenswert sind aber zwei neue Diskussionspapiere, die schnell in Richtung neuer Implementierungsspezifikationen vorangetrieben wurden. Diese beiden Dokumente betreffen Orientierungsdaten und besitzen in ihren englischen Titeln die Begriffe „Image Geopositioning“. Im einen Fall wird die Aerotriangulation beschrieben, im anderen Fall die zugehörigen Metadaten. Des Weiteren ist der Sensor Alert Service (SAS) in der Kommentierung. Er regelt die Übertragung von Benachrichtigungen, die von Sensoren oder Sensornetzwerken ausgelöst werden und stellt eine spezialisierte Form des allgemeinen Internet-weiten Benachrichtigungsdienstes (Alerting Service) dar.

6 Literaturverzeichnis

Group on Earth Observation (GEO) (2007): GEO 2007 – 2009 Workplan, Version 4

Internetseiten

EuroSDR: <<http://www.eurosd.net/2002/index.htm>>

GEOSS: <http://www.earthobservations.org/about/about_GEO.html>

ISO/TC 211: <<http://www.isotc211.org/>>

ISPRS: <<http://www.isprs.org/>>

Open Geospatial Consortium: <<http://www.opengeospatial.org/>>

Qualitätssicherung bei der Datenmigration in das Topografische Landschaftsmodell der Schweiz

STEFAN NEUDECK¹

Zusammenfassung: Beim Bundesamt für Landestopografie swisstopo wird zurzeit am Aufbau des Topografischen Landschaftsmodells (TLM) gearbeitet. Die heutigen Geodatenbanken müssen in das neue Datenmodell migriert werden. Der Qualitätssicherung der aus der Migration resultierenden Daten im TLM kommt eine sehr grosse Bedeutung zu. Aus diesem Grunde wurde ein Verfahren gewählt, mit dem die Qualität der migrierten Daten verlässlich messbar ist und mit dem nicht detektierte Fehler weitgehend ausgeschlossen werden können.

1 Einleitung und Problemstellung

Das neue TLM soll die heutigen Geodatenbanken zukünftig ablösen. Die bereits heute existierenden Daten sollen die Basis für die Bearbeitung resp. für die Nachführung des neuen TLM bilden. Sie müssen daher migriert werden. Zur Datenmigration wird die Software Feature Manipulation Engine (FME) verwendet, mit der die notwendige Modelltransformation vollumfänglich modelliert und durchgeführt werden kann, die jedoch Massnahmen der Qualitätssicherung nur unzureichend unterstützt. Die Qualitätssicherung ist für den Schritt der Datenmigration jedoch von ausserordentlicher Bedeutung. Für ihre Durchführung musste deshalb ein Verfahren gewählt werden, dass die möglichst zweifelsfreie Beurteilung der migrierten Daten sicherstellt. Es soll in diesem Beitrag vorgestellt werden.

2 Geodatenbanken für die Migration

Ein Einzelnen werden die folgenden Geodatenbanken in das neue TLM migriert:

- das bisherige Landschaftsmodell VECTOR25,
- der Geodatensatz Gemeindegrenzen 1:25'000 (GG25),
- die Namendatenbank SwissNames 1:25'000 (SN25) sowie die
- Höhenkotes des Digitalen Höhenmodells 1:25'000 (DHM25)

Diese Datenbestände weisen die im Folgenden aufgeführten grundsätzlichen Unterschiede zum TLM auf.

2.1 Abstraktionsgrad und geometrische Genauigkeit

Die Geometrien der oben aufgeführten Geodatenbanken orientieren sich an der Landeskarte der Schweiz 1:25'000 (LK25), das heisst sie sind überwiegend aus der Landeskarte heraus erfasst. Die Lagegenauigkeit liegt deshalb bei etwa drei bis acht Metern. Im TLM wird bei einem Abstraktionsgrad von etwa 1:10'000 mit maximal einem Meter Abweichung in Lage und Höhe eine erheblich höhere Genauigkeit angestrebt.

¹ Stefan Neudeck, Bundesamt für Landestopografie swisstopo, Seftigenstrasse 264, CH-3184 Wabern; E-Mail: Stefan.Neudeck@swisstopo.ch

2.2 Dimension

Die heutigen Geodatenbanken sind zweidimensional. Beim Höhenkotendatensatz des DHM25 wird die z-Koordinate als Attributinformation geführt. Das TLM wird dagegen dreidimensional sein.

2.3 Geodätischer Bezugsrahmen

Die bisherigen Geodatenbanken werden im Bezugsrahmen CH1903LV03 geführt. Das TLM wird im neuen nationalen Bezugsrahmen CH1903+LV95 geführt werden. Dieser Bezugsrahmen ist eine Präzisierung des alten. Zu seiner Kennzeichnung wird den Lagekoordinaten eine Zwei im Rechts- und eine Eins im Hochwert vorangestellt.

2.4 Attributumfang

Die Anzahl der Attribute und möglichen Attributwerte wird im TLM erheblich höher sein als heute zum Beispiel in VECTOR25. Sowohl mehr so genannte Standardattribute (Change Management Attribute) als auch mehr solche mit thematischer Information (Fachattribute) werden geführt.

3 Migrationsschritte

Die Migration der Daten geschieht für jeden Layer der oben genannten Quelldatenbanken separat in zwei Schritten. Diese Schritte sind die z-Interpolation und die eigentliche Überführung der Daten in das neue Datenmodell via FME.

3.1 z-Interpolation

Die Interpolation der z-Werte erfolgt vor der eigentlichen Datenmigration direkt in den Quelldaten, den oben aufgeführten Geodatenbanken. Für die Interpolation wird ein Skript in ArcMap eingesetzt, das jedem Stützpunkt einen Höhenwert zuweist. Als Basis dient das hoch genaue Digitale Terrainmodell der Amtlichen Vermessung (DTM-AV) und, wo dieses nicht vorhanden ist, das herkömmliche DHM25.

3.2 Überführung der Daten

Die eigentliche Migration der Geodatenbanken in das TLM wird mit Hilfe der Software Feature Manipulation Engine (FME) vorgenommen. FME bietet dazu eine grafische Benutzeroberfläche, auf der die Migrationsschritte modelliert und visualisiert werden können. Mit Ausnahme von VECTOR25 werden die genannten Geodatenbanken als Ganzes migriert, die einzelnen Layer von VECTOR25 (Strassen, Eisenbahnen, übriger Verkehr, Gewässer, Primärflächen, Hecken und Bäume, Gebäude, Anlagen, Einzelobjekte) werden dagegen sequenziell verarbeitet. Neben der je nach zu überführender Geodatenbank mehr oder weniger komplexen Modelltransformation wird mit den Migrationsschritten in FME eine Formatkonvertierung vorgenommen. Die Quelldaten liegen meist als Personal Geodatabase oder Shapefiles vor. Sie werden in eine ArcSDE Geodatabase überführt.

3.3 Koordinatentransformation

Die Quelldaten liegen im Landeskoordinatensystem CH1903LV03 vor. Das zukünftige TLM wird im neuen Bezugsrahmen CH1903+LV95 geführt, der eine Präzisierung des alten Bezugsrahmens ist. Die maximalen Lageabweichungen zwischen beiden Systemen betragen weniger als drei Meter und sind damit geringer als die Genauigkeit der Quelldaten. Abgesehen von diesen realen Abweichungen werden den x- und y-Koordinaten zur Kennzeichnung des neuen Systems eine „2“ im Rechts- sowie eine „1“ im Hochwert voran gestellt (entspricht einer Translation um 2 Mio. resp. 1 Mio. Metern). Die Transformation wird als reine Translation um diese Beträge ebenfalls in den FME-Workbench eingebunden.

4 Qualitätssicherung

4.1 Qualitätssicherung in FME

Von einer groben ausschliesslich quantitativen Plausibilitätsprüfung abgesehen unterstützt FME keine Funktionalität die Qualität modell- und/oder koordinatentransformierter Daten zu sichern. Diese Plausibilitätsprüfung ist auf Grund der Angabe der Anzahl der in die Zieltabellen geschriebenen Objekte in der grafischen Benutzeroberfläche möglich (Abb. 1).

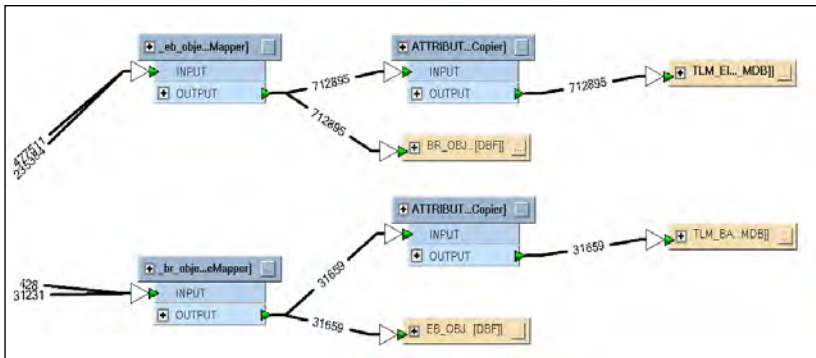


Abb. 1: Visualisierung einer FME-Workbenchdatei mit Angabe der Anzahl der geschriebenen Objekte (Ausschnitt)

Eine andere Möglichkeit bietet das Logfile, in dem abschliessend eine quantitative Zusammenfassung der gelesenen und geschriebenen Objekte aufgeführt wird:

```

-----
                          Features Read Summary
-----
Blatt_GN_sp                               19
heb_lwithin_arc_3d                       35581
heb_pwithin_point_3d                     712895
=====
Total Features Read                       748495
-----

                          Features Written Summary
-----
BR_OBJECTID_EIS2TLM                      712895
EB_OBJECTID_EIS2TLM                      31659
NA_OBJECTID_EIS2TLM                      3922
TLM_BAUM_GEBUESCHREIHE                   31659
TLM_EINZELBAUM_GEBUESCH                  712895
TLM_NUTZUNGSAREAL                        3922
=====
Total Features Written                    1496952
-----

```

4.2 Verfahren zur Qualitätssicherung der migrierten Daten

Im oben gezeigten Anwendungsbeispiel handelt es sich um eine verhältnismässig einfache Modelltransformation. Sind die Regeln und Festlegungen der Datenmigration bekannt wird bereits mit den Angaben von Abb. 1 sowie dem Logfile-Beispiel klar, dass das Ergebnis der Migration korrekt ist. Nicht verlässlich genug sind diese Angaben jedoch für die Qualitätssicherung weit komplexerer Modelltransformationen (Tabelle 1), wie sie z. B. bei der Migration des Gebäude-, Strassen- oder Eisenbahnlayers von VECTOR25 in die jeweiligen TLM-Zieltabellen auftreten. Basierend auf der Migrationsdokumentation, die festlegt welches Objekt resp. Attribut des Quellmodells wohin im Zielmodell geschrieben wird, wurde ein Workflow zur Qualitätssicherung gewählt, der die Prüfung und Beurteilung der in das TLM migrierten Datensätze zuverlässig ermöglicht. Um befriedigende Aussagen über die Qualität der ins Zielmodell migrierten Daten zu erlangen sind die Quantität (Anzahl der Objekte und Attributwerte) und die Qualität (Eintragungen der Attributwerte) verlässlich abzufragen sowie stichprobenartige Tests durchzuführen.

Joos (2000) identifiziert die folgenden Qualitätskriterien:

- *Vollständigkeit* beschreibt das Vorhandensein resp. Fehlen von Objekten, Attributen und Beziehungen.
- *Richtigkeit* beschäftigt sich mit der Zuordnung der Objekte zu den Objektklassen und der Vergabe gültiger und richtiger Attributwerte.
- *Konsistenz* beschreibt den Zustand, dass alle Objekte des Datensatzes dem Datenmodell entsprechen.
- *Genauigkeit* beschreibt die Eigenschaften von Objekten im Hinblick auf die Lagegenauigkeit sowie die attributive Genauigkeit.

In diesem Kapitel soll untersucht werden, ob und wie diese Kriterien für die vorgestellte Modelltransformation geprüft werden können.

4.2.1 Vollständigkeit und Richtigkeit der Objekte und Attributwerte

Tabelle 1 zeigt einen Ausschnitt der Migrationsdokumentation (Layer „Einzelobjekte punkthaft“ von VECTOR25). In den Zeilen sind die Attribute (z. B. OBJECTVAL) und Attributwerte (z. B. BiStock) des Quellmodells aufgeführt, in den Spalten die des Zielmodells (z. B. Objektart „Aussichtspunkt“). Die mit Zahlen ausgefüllten Felder repräsentieren die bereits im Quellmodell gezählten Objekte des VECTOR25-Attributwertes „ObjectValue“. Die Zählung der Objekte kann z. B. mit der Selektion resp. mit Statistiktools einer GIS-Software über den Attributwert durchgeführt werden.

Tabelle 1: Qualitätssicherung "Vollständigkeit" Zählung der Objekte im Quellmodell (Ausschnitt)

Attribut	kein_Wert	unbekannt	nicht_erfasst	Aussichtspunkt	Objektart											
					0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Name	
					BiStock	Brunnen	Denkmal	Gipfelkreuz	Grotte_Hoehle	Landesgrenzstein	Quelle	Triangulationspyramide	Wasserfall	nicht_erfasst	Referenz	
	OBJECTVAL															
EOB25_P	BiStock	-	-	-	-	1560	-	-	-	-	-	-	-	-	1560	-
EOB25_P	Brunnen	-	-	-	-	-	149	-	-	-	-	-	-	-	149	-
EOB25_P	Denkmal	-	-	-	-	-	-	91	-	-	-	-	-	-	91	-
EOB25_P	Hoehle	-	-	-	-	-	-	-	39	-	-	-	-	-	39	-
EOB25_P	Quelle	-	-	-	-	-	-	-	-	-	296	-	-	-	296	-
EOB25_P	Wasserfall	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	209	-	209	-

Nach erfolgter Migration werden die Attribute und Attributwerte der Objekte im Zielmodell, d. h. die Attributwerte der Spalten in Tabelle 1, ebenfalls gezählt. Beide Zählungen werden anschliessend als SOLL (Quellmodell) und IST (Zielmodell) nebeneinander gestellt (Tabelle 2). Stimmen „SOLL“ und „IST“ überein, ihre Differenz dem zu Folge gleich Null, so gilt das Kriterium der Vollständigkeit als erfüllt (Tabelle 2).

Die Feststellung der Richtigkeit ist mit dem Bearbeiten der QS-Tabellen 1 und 2 ebenfalls möglich. Hier geht es nun nicht nur darum, „ob“ die Objekte migriert wurden, sondern „wohin“ sie migriert wurden, das heisst um die Objektklasse und Attribute sowie Attributwerte im Zielmodell. Ob einer Objektklasse des Quellmodells die korrekte Klasse des Zielmodells zugeordnet wurde geht direkt aus den Tabellen hervor. Stimmen auch die Anzahlen der Objekte und aller messbaren Attributwerte in Quelle und Ziel überein, kann impliziert werden, dass auch jedes einzelne Objekt des Quellmodells genau einem Objekt der korrekten Klasse im Zielmodell zugeordnet wurde.

Tabelle 2: Qualitätssicherung "Vollständigkeit"
Anzahl der migrierten Objekte, Attribute und Attributwerte (Ausschnitt)

	Attribut	Objektart									Name					
		kein_Wert	unbekannt	nicht_erfasst	Ausschichtpunkt	Bildstock	Brunnen	Denkmal	Gipfelkreuz	Grotte_Hoehle		Landesgrenzstein	Quelle	Triangulationsspyramide	Wasserfall	nicht_erfasst
	OBJECTVAL															
EOB25_P	BIStock	-	-	-	-	1560	-	-	-	-	-	-	-	-	1560	-
EOB25_P	Brunnen	-	-	-	-	-	149	-	-	-	-	-	-	-	149	-
EOB25_P	Denkmal	-	-	-	-	-	-	91	-	-	-	-	-	-	91	-
EOB25_P	Hoehle	-	-	-	-	-	-	-	39	-	-	-	-	-	39	-
EOB25_P	Quelle	-	-	-	-	-	-	-	-	296	-	-	-	-	296	-
EOB25_P	Wasserfall	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	209	-	209	-
SOLL (berechnet mit Quelle)		0	0	0	0	1560	149	91	0	39	0	296	0	209	2344	0
IST (gezählt in Ziel)		0	0	0	0	1560	149	91	0	39	0	296	0	209	2344	0
DIFFERENZ						0	0	0		0		0		0	0	

4.2.2 Genauigkeit

Eine Änderung der geometrischen Genauigkeit (z. B. der Stützpunkte von Objekten) ist nicht Gegenstand der Modelltransformation und braucht daher nicht eingehend untersucht zu werden. Eine Ausnahme bilden stichprobenartige Tests, ob die Koordinatentranslation ($x_{Quelle} + 2'000'000, y_{Quelle} + 1'000'000$) korrekt ausgeführt wurde.

Fehler in der attributiven Genauigkeit in den migrierten Daten werden gewöhnlich durch die Prüfung von Vollständigkeit und Richtigkeit detektiert. Eine Schwierigkeit liegt allerdings darin, dass die attributive Genauigkeit in manchen Fällen bewusst und vorübergehend verschlechtert wird, um die Nachführungsarbeit beschleunigen zu können. Nachfolgendes Beispiel verdeutlicht diesen Sachverhalt.

VECTOR25		TLM	
OBJECTVAL	NS_Bahn2 (= mehrspurig)	OBJEKTART	Normalspur
		ANZAHL_SPUREN	2

Die Information „mehrspurig“ wird also nach „Anzahl_Spuren = 2“ migriert, d. h. die Information wird für alle mehrspurigen Bahnen mit mehr als zwei Gleisen bewusst verfälscht, um die Nachführungsarbeiten zu optimieren (die meisten der betroffenen Objekte sind in der Tat „zweispurig“).

4.2.3 Konsistenz

FME fördert das Erreichen eines konsistenten Zieldatensatzes der Modelltransformation dadurch, dass alle zu beschreibenden Zielstabellen im Workbench visualisiert und mit einem Datenkanal verbunden werden müssen (siehe Abbildung 1). Ob die richtigen Daten in die Tabellen geschrieben wurden, wird aus den Qualitätstests zu Vollständigkeit und Richtigkeit unmittelbar deutlich. Im Datenmodell implementierte Beziehungen zwischen Objekten können dagegen nur stichprobenartig im Zieldatensatz geprüft werden.

4.2.4 Stichprobenartige Tests

Das im vorangegangenen Abschnitt beschriebene Vorgehen beinhaltet die Qualitätssicherung für Objektklassen, Attribute und Attributwerte sowie Beziehungen. Für alle Fachattribute ist dieses Verfahren zur Qualitätssicherung für die Datenmigration in das TLM als ausreichend anzusehen. Andere festgelegte Attributwerte sind in den Quelldaten jedoch gar nicht vorhanden und können deshalb dort nicht gezählt werden oder werden z. B. in Abhängigkeit von ihrer räumlichen Lage oder von Werten anderer Attribute vergeben. Beispiele für letzteres sind die sog. Change-Management-Attribute (CM-Attribute) „Herkunft_Jahr“ und „Erstellung_Jahr“ (Tabelle 3), die durch einen Overlay mit einem Polygonlayer mit Werten befüllt werden. Die Richtigkeit dieser Werte kann nur durch Stichproben an Objekten bestätigt werden. Alle anderen der in Tabelle 3 gelisteten Attributwerte müssen dagegen für alle Objekte eines migrierten Layers beispielsweise von VECTOR25 gleich sein. Sie werden also durch die Ergebnisse der Prüfung von Vollständigkeit und Richtigkeit bestätigt.

Ob die z-Koordinate der Quelldaten korrekt übernommen wurde, lässt sich ebenfalls nur durch Stichproben feststellen. Unterstützt werden kann diese Untersuchung jedoch durch eine Abfrage, ob die Daten Koordinatentripel mit $z = 0$ enthalten.

Tabelle 3: CM-Attribute des TLM

Attribut	Attributwert
Grund_Aenderung	uebertragen
Herkunft	VECTOR25
Herkunft_Jahr	2002
Herkunft_Monat	<null>
Erstellung_Jahr	2002
Erstellung_Monat	<null>
Revision_Jahr	<null>
Revision_Monat	<null>
Datum_Erstellung	11.01.2008
Datum_Aenderung	11.01.2008
Operator	EIS_Imp

4.2.5 Fehlerbehandlung

Detektierte Migrationsfehler werden behoben, in dem der FME-Workbench angepasst wird und die Datenmigration wiederholt wird. Dieses Vorgehen ist nachhaltig und verhindert auch das

erneute Auftreten des Fehlers bei weiteren Migrationen, die die gleiche Modelltransformation durchlaufen. Die Korrektur von Attributwerten direkt auf der Zieldatenbank ist nur sinnvoll, wenn alle migrierten Objekte vom Fehler betroffen sind. Da der Fehler in der Modelltransformation jedoch ohnehin korrigiert werden muss, ist sie nur in Ausnahmefällen anzuwenden.

5 Zusammenfassung

Der Bericht zeigt, dass die Qualitätssicherung bei der Datenmigration für das neue TLM mit in der Durchführung zwar recht aufwändigen Mitteln, jedoch technisch verhältnismässig einfachen Massnahmen möglich ist. Das Ziel, die Datenqualität der Quelldaten im neuen Modell zu erhalten kann mit den beschriebenen Arbeitsschritten erreicht werden.

Literaturverzeichnis

Joos, G., 2000: Zur Qualität von objektstrukturierten Geodaten. Schriftenreihe des Studiengangs Geodäsie und Geoinformation der Universität der Bundeswehr München, Heft 66, Neubiberg.

Geometrische Datenfusionsverfahren

RALF REULKE¹ & RAGNA HOFFMANN²

Zusammenfassung: Das DIN Deutsches Institut für Normung e.V. beschäftigt sich mit den inhaltlichen Grundlagen sowie den Grenzen für die Normung von Sensor- und Datenfusion. Bislang existieren nur in wenigen Fällen Kriterien, die eine Beurteilung der Ergebnisse der Fusion von Daten unterschiedlicher Quellen erlauben. Im Rahmen eines Projektes des DIN im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (Förderung der Innovation und Marktfähigkeit durch Normung und Standardisierung - INS) wurden Sensoren und Verfahren für potenzielle Fusionsprodukte vorgestellt und diskutiert. Anhand dieser wissenschaftlichen Grundlagen soll ein Norm-Entwurf für Anforderungen an geometrische Fusionsverfahren erstellt werden, um Herstellern und Anwendern – auch im Hinblick auf den internationalen Markt – Festlegungen über die Qualität der Endprodukte an die Hand geben zu können.

1 Einleitung

Zur Verbesserung der Messgenauigkeit und damit auch zur Erweiterung der Verwendbarkeit von Sensoren ist es zweckmäßig, Daten unterschiedlicher Sensoren miteinander zu einer umfassenderen Information eines „logischen“ oder „virtuellen“ Sensors zu fusionieren, um eine verbesserte geometrische und radiometrische Datengrundlage für die Untersuchung interessanter Regionen zu erhalten.

Es gibt eine Vielzahl von Sensoren, Anwendungen und Verfahren. Seit mehr als 25 Jahren wird darüber in der wissenschaftlichen Literatur berichtet (siehe z.B. HAYDN et.al.). Eine der ersten Anwendungen war z.B. die Integration von multispektralen Kanälen mit den hochauflösenden panchromatischen Kanälen photogrammetrischer Kameras (PAN-Sharpning). Damit eröffneten sich neue Möglichkeiten für die gleichzeitige Bearbeitung von Fernerkundungsaufgaben.

Zusammen mit der Einführung digitaler photogrammetrischer Kameras werden unterschiedliche Applikationen, die bisher nur im wissenschaftlichen Umfeld diskutiert wurden, wirtschaftlich relevant. Beispielhaft sei hier die Kombination von niedrig auflösenden multispektralen Kanälen mit einem hochaufgelösten panchromatischen Kanal (PAN-Sharpning) genannt. Bislang existieren jedoch keine Kriterien, die eine Beurteilung der Ergebnisse von Daten unterschiedlicher Quellen erlauben.

Deshalb war das Ziel dieser Arbeit die Erstellung einer Übersicht über Systeme, Verfahren und Anwendungen von Sensor- und Datenfusion sowie die Identifikation von Algorithmen und Produkten für die Sensorfusion. Damit sollte ermittelt werden, ob solche Ansätze normungswürdig sind. Gleichzeitig sollte die wissenschaftliche Grundlage zur Erstellung einer Norm-Vorlage für geometrische Datenfusionsverfahren geschaffen werden.

¹⁾ Ralf Reulke, Humboldt-Universität zu Berlin, Institut für Informatik, Computer Vision, Unter den Linden 6, 10099 Berlin, E-Mail: Ralf.Reulke@dlr.de

²⁾ Ragna Hoffmann, Humboldt-Universität zu Berlin, Institut für Informatik, Computer Vision, Unter den Linden 6, 10099 Berlin, E-Mail: Ragna.Hoffmann@dlr.de

Die vorliegende Arbeit entstand im Anschluss an die abgeschlossene Normung von digitalen photogrammetrischen Kameras (vgl. DIN-A). Durch die exzellente Datenlage lässt sich die Fusion mit anderen Sensoren im Rahmen des normalen Arbeitsablaufs integrieren. Aus diesem Grund wurde zuvor eine umfangreiche Recherche über aktuelle photogrammetrische und Fernerkundungssensoren durchgeführt. Die betrachteten Sensoren wurden nach der aufnehmenden Plattform (flugzeuggetragen und satellitengetragen) sowie nach aktiven und passiven Systemen systematisiert, um deren Vergleichbarkeit herzustellen. Zudem wurden sie beschrieben und ihre technischen Spezifikationen skizziert.

Die Literaturrecherche ergab eine Reihe von Anwendungen, bei denen Daten unterschiedlicher Sensoren fusioniert werden. Diese wurden in die Bereiche Beobachtung (Monitoring), Objekterkennung und -verfolgung sowie Veränderungsermittlung (Change Detection) untergliedert.

Darüber hinaus wurden Verfahren, Methoden und Techniken für die Fusion geometrischer Daten erfasst, entsprechend geordnet und charakterisiert. Mit dem Ziel, die für die Standardisierung relevanten Informationen zu extrahieren, wurden abschließend wesentliche Sensor-Systeme und Ansätze gegenübergestellt.

2 Sensoren

Im Folgenden wird eine Übersicht über ausgewählte Sensoren gegeben. Die betrachteten Sensoren sind technologisch ausgereift und werden für Produktionsaufgaben in Photogrammetrie und Fernerkundung eingesetzt. Die Arbeit fokussiert sich auf aktive und passive Sensoren, sowie auf Flugzeug- und Satellitenplattformen. Terrestrische Kameras und Laserscanner werden nur am Rande behandelt. In Abhängigkeit vom Träger des Sensorsystems (Flugzeug bzw. Satellit) sind die Sensoren in optische digitale Kameras, Laserscanner, Multi- und Hyperspektralscanner sowie Radarsysteme klassifiziert. Hierbei wird nicht der Anspruch auf Vollständigkeit erhoben. Jedoch sind die wichtigsten Sensoren aus Sicht von Photogrammetrie und Fernerkundung beschrieben sein (vgl. Tab. 1).

2.1 Digitale optische hochauflösende Sensoren

Bei der quantitativen Einordnung der Sensoren wurde folgender Ansatz verfolgt: Hochauflösende Satellitensensoren haben eine räumliche Auflösung von besser als ein bis zwei Meter, hochauflösende Flugzeugsensoren eine Auflösung von besser als 10 bis 20 Zentimeter. Die Anzahl der gemessenen Bildpunkte je Bild ist größer als 100 Megapixel, sie haben eine radiometrische Dynamik von 12 Bit bis 14 Bit und ein SNR von besser als 8 Bit. Optische Flugzeug- und Satellitensensoren haben neben dem hochauflösenden PAN-chromatischen Kanal noch vier (häufig geringer auflösende) multispektrale Kanäle. Die digitalen optischen hochauflösenden Sensoren sind passive Systeme.

2.2 Laserscanner (LIDAR)

Laserscanner zählen zu den aktiven Systemen. Das Gelände wird mit einem Laserstrahler abgetastet und die Zeitdauer zwischen Aussenden des Laserimpulses bis zum Empfangen der reflektierten Strahlen gemessen. Aus der Laserdistanzmessung kann die Entfernung zwischen reflektierender Oberfläche und Flugzeug abgeleitet werden. Die Höhen der Reflexionsorte

lassen sich sehr exakt im geodätischen Bezugssystem berechnen, da die exakte Position des Flugzeuges durch ein Global Positioning System (GPS) und dessen Lage im Raum (Ausrichtung) mit einem Inertial Navigation System (INS) bestimmt werden kann (vgl. WEHR & LOHR).

Tab. 1: Übersicht – Ausgewählte Sensoren

Aufnahmesysteme	Flugzeuggetragene (airborne)	Satellitengetragene (space-borne)
Digitale Kamerasysteme	ADS40 (Leica Geosystems) DMC (Intergraph) UltraCamXTM (Microsoft Photogrammetry)	IKONOS (GeoEye), GeoEye-1 (GeoEye) QuickBird2 (Digital Globe), WorldView-1 (DigitalGLOBE), RapidEye (RapidEye AG)
Laserscanner	ALTM (Optech) ALS50 (Leica) LMS (Riegl), LiteMapper (IGI)	
Multi- und Hyperspektralsysteme	AVIRIS (NASA) Hymap (Intgr. Spec.) ARES (DLR) CASI (ITRES) ROSIS (EADS, GKSS, DLR)	EnMAP (Kayser-Threde, GFZ, DLR) OrbView-5/GeoEye1 (GeoEye)
Radarsysteme	E-SAR (DLR) ARTINO (FGAN) Ku-Band Airborne InSAR (MERL) AIRSAR (JPL) EMISAR (DCRS) PiSAR (NICT/JAXA) RAMSES (ONERA) C/X-SAR (CCRS)	A-SAR (ESA) SAR-Lupe (OHB) TerraSAR-X (DLR) X-SAR/SRTM (NGA, NASA)

2.3 Multi- und Hyperspektralscanner

Multi- und Hyperspektralscanner sind ebenfalls passive Sensoren. Sie dienen der spektralen Analyse der von der Oberfläche reflektierten Strahlung. Ziel ist dabei die Segmentierung und Klassifizierung der untersuchten Gebiete auf der Basis der spektralen Reflexionseigenschaften und der spektralen Signatur. Multispektralscanner verfügen über 10 bis 12 Kanäle (z.B. Landsat TM), Hyperspektralscanner (z.B. HyMap) über mehr als 100 Kanäle. Hyperspektralscanner (abbildende Spektrometer) messen objektspezifische spektrale Signaturen mit einer hohen spektralen Auflösung. Damit ist für jedes Bildelement die Aufnahme eines nahezu kontinuierlichen Spektrums möglich. Dadurch sind die erfassten Objekte der Erdoberfläche, die

charakteristische Absorptions- und Reflexionseigenschaften in sehr engen Spektralkanälen aufweisen und von konventionellen Sensorsystemen nicht aufgelöst werden können, trenn- und dementsprechend klassifizierbar. Jedoch ist aus energetischen Gründen die räumliche Auflösung begrenzt.

2.4 Radarsensoren

Radarsensoren sind wie Laserscanner aktive Sensoren und können, bedingt durch den verwendeten Spektralbereich, auch in der Nacht und bei Wolkenbedeckung operieren. Ebenso können auch Gebieten mit extrem niedrigem Kontrast, wie z.B. die Eisgebiete der Arktis, mithilfe von Radardaten sinnvolle Informationen abgeleitet werden.

Die Wechselwirkung des Radarsignals mit dem untersuchten Objekt (Reflexionseigenschaften und Eindringtiefe) wird durch die Frequenz bestimmt. Interferometrische Synthetic Aperture Radar Systeme (InSAR) basieren auf der Auswertung von Phasenunterschieden zwischen zwei SAR-Aufnahmen, die von unterschiedlichen Positionen aufgenommen wurden. Durch den Bezug des Phasenunterschieds zur Geländeoberfläche können hochaufgelöste Digitale Höhenmodelle (DGM) abgeleitet werden (vgl. TSGC).

3 Fusionsverfahren und -methoden

Bei der Fusion entsteht ein einziger Datensatz aus der Kombination von Daten und / oder Informationen einer Serie von Quellbildern. Dabei werden Pixel-, Feature- oder Decision-level-Techniken angewendet (vgl. AUG SIGNALS):

- **Pixel-level Fusion:** Kombination von Rohdaten von verschiedenen Quellen in ein einziges Bild (z.B. PAN-Sharpening).
- **Feature-level Fusion:** Erfordert die Extraktion verschiedener Einzelmerkmale aus den Ausgangsdaten, bevor die Merkmale zusammengeführt werden (z.B. Tracking).
- **Decision-level/information-level:** Hier werden die Ergebnisse von multiplen Algorithmen kombiniert, um ein fusioniertes Ergebnis oder sogar eine Entscheidung zu erhalten.

Der fusionierte Datensatz hat einen größeren Informationsgehalt als jedes individuelle Quellbild der betrachteten Szene. Auf Grund der zusätzlichen analogen oder komplementären Informationen enthält das Ergebnis notwendigerweise einen höheren Detailreichtum. Vor der Fusion müssen die Bilder zueinander registriert werden. Das betrifft sowohl räumliche als auch zeitliche Aspekte. Die Bildfusion von multi-temporalen Bildern und Multi-Sensor Bildern hat für Erd- und Weltraumbeobachtungen, insbesondere Kartierungen in den Bereichen Umwelt, Landwirtschaft und Ozeanographie, große Bedeutung.

4 Typische Anwendungen und Verfahren

Applikationen, in denen Sensor- und Datenfusion zur Anwendung kommen, sind das Monitoring, Objekterkennung und -verfolgung sowie die Detektion von Veränderungen (Change Detection).

Typische Verfahren und Methoden betreffen die Verbesserung der Datenlage (Auflösungsverbesserung, Schließen von Datenlücken anderer Sensoren), die Kombination von Bilddaten mit Höhen- oder Abstandsdaten (analog zur Orthophotoerstellung), die Kombination von hochaufgelösten panchromatischen mit niedriger aufgelösten multispektralen Daten (PAN-Sharpening) sowie die Detektion und Verfolgung interessierender Bereiche oder Objekte in den Daten (Objektverfolgung/Tracking).

Beiträge über die Forschungstätigkeit in diesem Bereich gibt es schon seit mehr als zwei Jahrzehnten. Im Mittelpunkt stand zunächst die Integration von hochaufgelösten SPOT Daten mit den multispektralen Landsat Daten. Die hochaufgelösten panchromatischen und multispektralen Daten der aktuellen digitalen photogrammetrischen Kameras stellen völlig neue Herausforderungen an die Auswertung und insbesondere an die Genauigkeitsanforderungen der vorherigen Koregistrierung der Bilddaten, die (objektbezogen) im Zentimeterbereich liegen müssen.

Die Integration von Bild- und Höhendaten ist prinzipiell in der Photogrammetrie durch die Orthophotoerstellung gelöst und in DIN 18740-3 Photogrammetrische Produkte – Teil 3: Anforderungen an das Orthophoto, normativ festgelegt (vgl. DIN-B). Neuere Technologien (Laserscanner und InSAR-Systeme) ermöglichen die Erstellung hochaufgelöster DGMs auch unter komplizierten Beobachtungsbedingungen (z.B. im Wald, in Stadtregionen, bei mangelndem Kontrast und schlechtem Wetter). Die formalen Ansätze bleiben aber dieselben wie sie bereits in DIN 18740-3 festgelegt sind. Lediglich die Koregistrierung wird durch die unterschiedlichen Beobachtungsbedingungen (z. B. bei SAR-Systemen) komplizierter.

Verfahren der Auflösungserhöhung sind schon seit vielen Jahren in der Forschung bekannt und werden auch in der Produktion verwendet. Schlagworte verbindet sich mit dem SPOT HR Kanal, der mit einem so genannten staggered array ausgerüstet ist sowie der Benennung Superresolution.

Objektdetektion und Tracking sind Verfahren, die nicht nur im photogrammetrischen oder Fernerkundungsbereich angesiedelt sind. Typische Anwendungen beziehen sich auf die Integration, z.B. von optischen und Abstandssensoren mit Anwendungen in der Automobilindustrie (Fahrzeugsensorik), der Objektverfolgung in Multikamerasystemen für Überwachungsaufgaben und der Verkehrsbeobachtung. Die Ansätze sind insofern interessant, als sie neben der klassischen räumlichen Koregistrierung auch Synchronisationsaspekte zwischen den Datensätzen enthalten.

5 Ableitung von Anforderungen für Fusionsprodukte

Der für die Normung relevante Aspekt der Qualitätsbewertung der Ergebnisse, unabhängig vom verwendeten Algorithmus, ist nicht in allen veröffentlichten Untersuchungen zu finden. Folgende Anforderungsbereiche lassen sich aber festlegen:

- Anforderungen an die eingesetzten Sensoren;
- Anforderungen an die Verfahren und an die Güte der Koregistrierung;
- Anforderungen an die räumliche Bildgüte (z. B. aus der Analyse der PSF) und
- Anforderungen an die Farbqualität (für true colour Bilddaten).

Diese Anforderungen müssen für die einzelnen Ansätze spezifiziert und genauer dargelegt werden.

Für die Anforderungen an die Fusion von Bild- und Höhendaten kann man im Wesentlichen auf DIN 18740-3 Photogrammetrische Produkte–Teil 3: Anforderungen an das Orthophoto, verweisen (vgl. DIN-B).

Beim PAN-Sharpning-Verfahren beziehen sich die Anforderungen exemplarisch auf folgende Aspekte:

- Die verwendeten Sensoren müssen sowohl Fernerkundungsaufgaben als auch true colour Ansprüchen genügen;
- die Güte der Koregistrierung bezieht sich auf die niedrig aufgelösten multispektralen Daten im Vergleich zum hochaufgelösten Kanal;
- nach dem PAN-Sharpning-Prozess muss die räumliche Bildgüte (z. B. aus der Analyse der PSF) mit der des hochaufgelösten Kanals übereinstimmen;
- die Farbgröße (für true colour Bilddaten) muss der des multispektralen Komposits entsprechen.

Diese Aspekte sollen im Folgenden etwas ausführlicher dargestellt werden.

Anforderungen an die Datenfusion (Beispiel: PAN-Sharpning)

- **Verbesserung der räumlichen Information**

Ein Qualitätskriterium für die Pan-Sharpning-Techniken ist die Exaktheit der Übernahme der zusätzlichen räumlichen Strukturinformationen des panchromatischen Bildes in das Endprodukt. Den Grad der Übereinstimmung hinsichtlich der Strukturinformationen liefern Korrelationsbilder. Dazu werden z.B. mit Kantenfiltern extrahierte Strukturen des panchromatischen Bildes und des multispektralen Endproduktes in Beziehung gesetzt.

- **Erhaltung spektraler Eigenschaften**

Im berechneten hochaufgelösten Multispektralbild müssen die spektralen Eigenschaften des niedrig aufgelösten Ausgangsbildes erhalten bleiben, um z.B. Klassifizierungsalgorithmen erfolgreich anwenden zu können. Eine Änderung der Farbverteilung im Endprodukt gegenüber dem Referenzbild kann z.B. durch einen Vergleich der Histogramme der Rot-, Grün- und Blauanteile der einzelnen Bilder grob bestätigt werden. Für die differenzierte Beurteilung von eventuellen Änderungen der spektralen Eigenschaften müssen daher konkrete Grauwertanalysen an ausgewählten Objektklassen (z.B. Straße oder Wiese) sowie sehr hellen und sehr dunklen Flächen vorgenommen werden.

Ein weiteres Qualitätskriterium für die Güte des PAN-Sharpning-Prozesses ist die Anzahl der entstandenen Artefakte. Problematisch sind insbesondere Objektkanten, wenn die Rot-, Grün- und Blaukanäle nicht exakt koregistriert sind (vgl. BECKER).

6 Zusammenfassung

Messungen mit einzelnen Sensoren kommen durch die ständige technologische Entwicklung und gleichzeitigen neuen Anforderungen an die Grenzen ihrer Genauigkeit und damit auch der

Verwendbarkeit dieser Ergebnisse. Eine innovative Methode zur Verbesserung der geometrischen und radiometrischen Datenqualität ist die Fusion von Daten unterschiedlicher Datenquellen, insbesondere digitaler Sensoren. Dabei werden die Daten von verschiedenen individuellen physikalischen Sensoren zu einer umfassenderen Information eines „logischen“ oder „virtuellen“ Sensors zusammengefügt. In diesem Zusammenhang wurden flugzeug- und satellitengetragene hochauflösende Kameras, Laserscanner, Hyperspektralscanner, Radar- und InSAR-Systeme berücksichtigt. Darüber hinaus wurden typische Anwendungen und Fusionsverfahren, die Auflösungsverbesserung, die Verbindung von Höheninformation und bildhafter Information (mit Parallelen zur Orthophotoerstellung), Pan-Sharpening sowie Objektverfolgung (Tracking) betreffend, dargestellt.

7 Literaturverzeichnis

AUG SIGNALS LTD.: DATA FUSION TECHNIQUES.

URL: <http://www.augsignals.ca/v2/media/fusion-technical-brief.pdf> (Stand: 26.06.2007)

BECKER, S., 2004: Verfahren zur Verbesserung der räumlichen Auflösung von Multispektralbildern durch Kombination mit hoch aufgelösten panchromatischen Datensätzen. Studienarbeit. Universität Stuttgart.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (DIN-A), 2007: 18740-4 Photogrammetrische Produkte-Teil 4: Anforderungen an digitale Luftbildkameras und an digitale Luftbilder. Beuth-Verlag, Berlin.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (DIN-B), 2003: 18740-3 Photogrammetrische Produkte-Teil 3: Anforderungen an das Orthophoto. Beuth-Verlag, Berlin.

HORN, R.; PAPHATHANASSIOU, K.; REIGBER, A.; SCHEIBER, R.; HAUSKNECHT, P.; STROBL, P.; BÖHL, H.-R.; SCHEELE, M.; REULKE, R.; BAERWALD, W.; PUGLISI, G.; COLTELLI, M. & FORNARO, G., (1997): The Mount Etna Case Study: A Multisensoric View. In: Proceedings of the Third International Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition, S. 308 - 315, Third International Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition, Copenhagen.

HAYDN, R.; DALKE, G.W. & HENKEL, J., 1982: Application of the IHS color transform to the processing of multisensor data and image enhancement. Proc. of the International Symposium on Remote Sensing of Arid and Semiarid Lands, Cairo, pp. 599-616

TSGC – TEXAS SPACE GRANT CONSORTIUM, 2004: Airborne Synthetic Aperture Radar (AIRSAR). URL: <http://www.tsgc.utexas.edu/trcp/airsar.html> (Stand: 28.07.2007)

WEHR, A. & LOHR, U., 1999: Airborne laser scanning – an introduction and overview. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote sensing, 54: 68-82.

Kalibration mittels Beugung und Goniometermessung im Vergleich

MARTIN BAUER¹, MARTIN SCHEELE² & ADRIAN SCHISCHMANOW³

Zusammenfassung: Es ist sinnvoll und in einzelnen Fällen auch notwendig, die Parameter der inneren Orientierung abbildender elektrooptischer Systeme für sich zu bestimmen. Dies trifft insbesondere für digitale Messkameras im Flugzeug- und Weltraumeinsatz zu. Eine bewährte aber auch messtechnisch aufwendige Methode ist die Einzelpixelbeleuchtung des abbildenden elektrooptischen Systems bei gleichzeitiger präziser Winkelmessung. Eine andere Methode besteht in der Abbildung einer diffraktiven Struktur durch den zu kalibrierenden Sensor (z.B. eine Kamera). In dieser Arbeit werden die Ergebnisse einer vergleichenden Messung diskutiert. Die Winkel der einzelnen Beugungselemente der diffraktiven Struktur dienten als Vorgabe bei der Einzelpixelbeleuchtung. Voraussetzung für diese vergleichende Messung war die Ausrichtung der optischen Achse zu der Ausbreitungsrichtung des Laser- bzw. des Kollimatorlichts. Die Messungen und theoretische Überlegungen geben Auskunft, mit welcher Genauigkeit die Parameter der inneren Orientierung separat, d.h. ohne gleichzeitige Bestimmung der der äußeren, ermittelt werden können. Es konnte gezeigt werden, dass die Messergebnisse der beiden untersuchten Kalibrationsmethoden in Subpixelbereich äquivalent sind.

1 Einleitung

Eine Kamera ist für geometrische Messaufgaben qualifiziert, wenn die Parameter der inneren Orientierung hinreichend genau bekannt sind. Grob gesagt gibt es zwei Methoden diese Parameter zu bestimmen. Bei der Einen wird ein entsprechend dimensioniertes Testobjekt unter verschiedenen Blickrichtungen von der zu kalibrierenden Kamera aufgenommen. Die Bestimmung der Kalibrierparameter erfolgt anschließend durch eine Bildauswerte- bzw. Kalibriersoftware. Dabei werden indirekt die Parameter der äußeren Orientierung mitbestimmt. Bei dem zweiten Verfahren ist man bemüht, die Parameter der inneren Orientierung direkt zu messen. Klassischer Weise kommen in diesem Fall goniometrische Messanordnungen zum Einsatz. Technologische Entwicklungen der letzten Jahre hatten auch zur Konsequenz, dass diffraktiv optische Elemente (DOE) für die geometrische Sensorkalibrierung interessant wurden. Um die Frage zu beantworten, mit welcher Genauigkeit die Kalibrierung einer Kamera unter Verwendung eines DOE im Vergleich zu der mittels Goniometer durchgeführt werden kann, wurde eine entsprechende Messung vorgenommen.

¹) Martin Bauer, DLR, RM-IS, Rutherfordstrasse 2, 12489 Berlin; E-Mail: martin.bauer@dlr.de

²) Martin Scheele, DLR, RM-IS, Rutherfordstrasse 2, 12489 Berlin; E-Mail: martin.scheele@dlr.de

³) Adrian Schischmanow, DLR, RM-IS, Rutherfordstrasse 2, 12489 Berlin; E-Mail: adrian.schischmanow@dlr.de

2 Der Experimentgedanke

Ein Goniometermessaufbau ist in Abbildung 1 dargestellt. Er besteht aus zwei wesentlichen Komponenten: Zum Einen aus einer Quelle parallelen Lichtes, in Abbildung 1 der Kollimator, und zum Anderen aus einer Schwenk- Neigeinrichtung, auch Manipulator genannt. In dieser Messkonstellation ist es möglich, die Pixel eines Sensors, speziell einer digitalen Kamera, präzise einzeln zu belichten. Jedem Pixel lassen sich so seine Pixelnummer und zwei Winkel zuordnen. Die Winkelangabe ist schlechtesten Falls auf $0,001^\circ$ genau bekannt. Die Belichtung

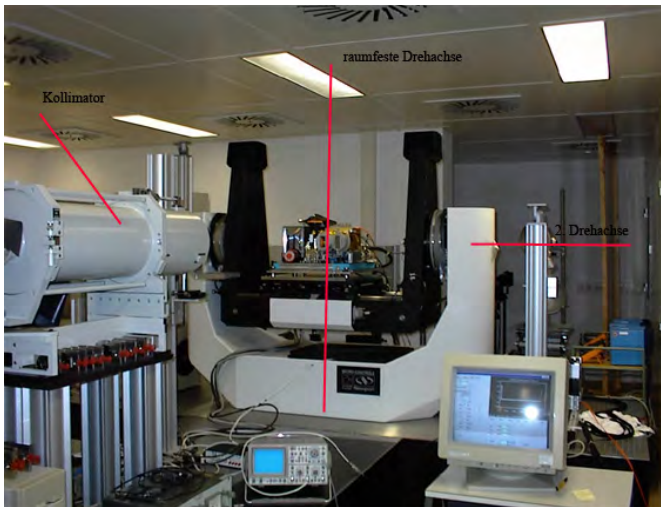


Abb. 1: Goniometermessplatz

einzelner Pixel kann nur nacheinander erfolgen. Eine gleiche Genauigkeit geben auch die Hersteller von DOE bzgl. der Winkel der gebeugten monochromen kohärenten Strahlung an. Verwendet man ein DOE zur geometrischen Kalibrierung, so werden mit einer Aufnahme mehreren Pixeln ihren Pixelnummern zwei Winkel zugeordnet. In Abbildung 2 ist ein Versuchsaufbau mit DOE wiedergegeben. Der Gedanke des Experiments besteht darin, ein DOE zu verwenden, deren Beugungsbild aus n mal m einzelnen Beugungspunkten besteht, siehe Abbildung 2. Dieses Beugungsbild wird von einer Versuchskamera aufgenommen. Anschließend erfolgt für dieselbe Kamera eine Einzelpixelvermessung derart, dass die Goniometerwinkel mit den Beugungswinkeln des DOE identisch sind. Es wird gewissermaßen seriell ein DOE Beugungsbild simuliert. Bei idealer Versuchsanordnung und Genauigkeit der Winkel, müssten zwei gleiche Datensätze, bestehend aus Pixelnummern und den dazugehörigen zwei Winkeln, den ‚Blickrichtungen‘ der Pixel, bestehen.



Abb. 2: Messaufbau mit statischem Lichtmodulator (DOE), Großaufnahme des Hologramms (links), zu kalibrierender Sensor, DOE mit Passpunktfeld und Kollimator im Hintergrund (rechts)

3 Messung und Ergebnisse

Die für die Messung verwendete Kamera war eine 1 Megapixelkamera der Firma DALSA. Die Brennweite betrug 4 mm und der Öffnungswinkel hatte die Maße $97^\circ \times 97^\circ$. Der Durchmesser des DOE der Firma HoloEye lag bei 70 mm. Das Beugungsmuster des DOE wies 70×70 Beugungspunkte mit einem maximalen Beugungswinkel von $\pm 48^\circ$ auf. Der erste Arbeitsschritt im Experiment beinhaltete die Bestimmung des Hauptpunktes der Kamera. Dies erfolgte nach der Methode der Newton'schen Ringe, die infolge der Reflexion an der Optik der Kamera entstehen (siehe BAUER et. al. 2006). Das Prinzip wird in Abbildung 3 demonstriert. Die Kamera wird so justiert, dass die optische Achse parallel zum einfallenden ungebeugten Laserstrahl ausgerichtet ist. Als Kriterium gilt die Bildung der Newton'schen Ringe. Der Fokuspunkt des Laserstrahls in der Bildebene fixiert den Hauptpunkt. Ist die optische Achse parallel zum

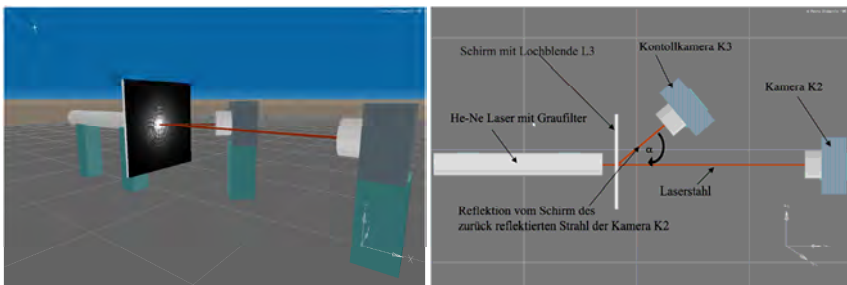


Abb. 3: Prinzipaufbau zur Bestimmung der optischen Achse

einfallenden Laserstrahl, dann sind zwei Achsen des Kamerakoordinatensystems parallel zu denen des Laborkoordinatensystems, das durch den Laserstrahl und den Achsen des DOE

gebildet wird. Ein Freiheitsgrad, nämlich eine Drehung um die optische Achse, bleibt erhalten. Die separate Messung der inneren Orientierung einer Kamera setzt voraus, dass die äußere Orientierung hinreichend genau bekannt ist, im Idealfall gleich null (Kamerakoordinatensystem parallel zum Laborkoordinatensystem). Mit der Bestimmung der optischen Achse und des Hauptpunktes ist bis auf die Drehung der Kamera um die optische Achse diese Bedingung erfüllt. Eine tolerable Abweichung der Parallelität zwischen optischer Achse und einfallenden Laserstrahl ergibt folgende Bedingung:

$$\alpha_0, \beta_0 \leq \frac{4f}{N^2 \cdot \delta}$$

Hierbei sind α_0, β_0 die Divergenzwinkel zwischen optischer Achse und einfallendem Laserstrahl, N die Anzahl der Bildpunkte, f die Brennweite und δ die Kantenlänge der Pixel des Sensors. Erfüllen α_0, β_0 die obige Bedingung, so ist diese Nichtparallelität einer konstanten Translation des gesamten Bildfeldes äquivalent. Der Fehler, der dabei in Vergleich zu einer korrekten Drehung entsteht, ist kleiner als ein Pixel. Eine konstante Translation des gesamten Bildfeldes ist für die Bestimmung der Parameter der inneren Orientierung unkritisch. Für die oben angegebenen Konstanten der verwendeten Kamera ergibt sich folgende Forderung an ihre Justierung: $\alpha_0 \leq 0,09^\circ$. Diese Genauigkeitsanforderung konnte im Experiment eingehalten werden. Nach der Aufnahme des Beugungsbildes, wurde die Kamera auf dem Goniometermessplatz so justiert, dass der Kollimatorstrahl genau in dem Pixel in der Bildebene fokussierte, der als Hauptpunkt vorher bestimmt worden war. Es erfolgten dann 649 Einzelpixelmessungen. Bei einem Winkelinkrement von 4° konnte ein Intervall von -48° bis 48° überstrichen werden. Ein Vergleich der beiden gewonnenen Kalibrierbilder erlaubte es, die Restorientierungsdivergenz um die optische Achse zu beseitigen. Anschließend wurden die Differenzen der Ortsvektoren der beleuchteten Einzelpixel in beiden Bildern bestimmt, das Ergebnis ist in Abbildung 4 wiedergegeben.

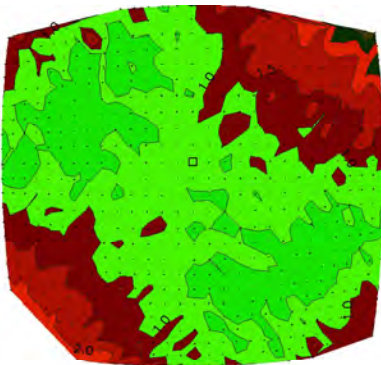


Abb. 4: Differenz der beiden Messpunktwolken (DOE/Goniometer) – Isodifferenzlinien (Pixel)

Die Auswertung der beiden Messungen brachte folgenden Unterschied der beiden Messverfahren als Resultat: In x-Richtung hatten die beiden Punktwolken eine mittlere Differenz von 0,27 Pixeln bei einer Streuung von 0,22 Pixel und in y-Richtung betrug die mittlere Differenz 0,86 Pixel bei einer Streuung von 0,86 Pixeln. Abbildung 4 gibt die Differenzverteilung im Messbild wieder. Die Asymmetrie zeigt sich in den beiden Diagonalen. Diese in Abbildung 4 erkennbare Asymmetrie weist auf einen unbekannt systematischen Fehler hin, der nur drei Ursachen haben kann. Zum Einen eine unkorrekte Einstellung der Winkelwerte bei der Goniometermessung, eine asymmetrische Genauigkeit bei der Mittelpunktbestimmung der Beugungspunkte, bzw. der belichteten Pixel der Goniometermessung oder mechanische Ursachen bei der Kippung der Kamera auf dem Goniometermessplatz. Auf jeden Fall kann das Experiment als Bestätigung der Äquivalenz beider Messmethoden angesehen werden. Nur eine dritte Methode, wie z. B. Kalibration mit Hilfe des Sternhimmels, könnte eine Rangfolge bzgl. der Genauigkeit der beiden Methoden festlegen.

4 Danksagung

Die Arbeit war Bestandteil des Projekts DIOPTER, welches mit Hilfe von EFRE Mitteln durch die Senatsverwaltung für Bildung, Wissenschaft und Forschung des Landes Berlin und der Investitionsbank Berlin gefördert wurde. Ein weiterer Dank gilt Herrn Dr. Andreas Hermerschmidt von der Firma HoloEye, der bei der Konzeption der DOE den entscheidenden Beitrag lieferte.

5 Literaturverzeichnis

BAUER, M.; BÖRNER, A.; JAHN, H.; SCHEELE, M.; SCHISCHMANOW, A. & SCHUSTER, R., 2006: Dynamische Beugungsmuster als Passpunktfelder für die geometrische Kalibration. In: Seyfert, Eckhardt [Hrsg.]: DGPF-Jahrestagung 2006, Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation (DGPF), 2006, DGPF, S. 303 - 310, DGPF-Jahrestagung 2006, Berlin, 2006-09-11 - 2006-09-13, ISSN 0942-2870

Sagt die Anzahl der Pixel im Bild alles?

KARSTEN JACOBSEN

Zusammenfassung: Die Anzahl der großformatigen digitalen Flächenkameras nimmt zu. Neben der DMC und der UltraCamX, die die UltraCamD durch Verwendung von CCD-Chips mit kleineren Pixeln ersetzt, sind Kameras wie die DIMAC in eine ähnliche Größenordnung vorgestoßen. Außerdem ist die Leistungsfähigkeit mittelformatiger Digitalkameras durch Verwendung von Chips mit 5412 x 7216 Pixeln gesteigert worden.

Die Verkleinerung der Pixelgröße ist allerdings nicht unproblematisch, trotz Verbesserung des Signal-Rausch-Verhältnisses moderner CCD-Arrays muss der Informationsgehalt digitaler Bilder nicht der Pixelanzahl entsprechen. Die Bildqualität von analogen Luftbildern, DMC-, UltraCamD- und UltraCamX-Aufnahmen wurde im gleichen Aufnahmegebiet mit vergleichbaren Objektauflösungen verglichen. Es zeigten sich deutliche Unterschiede, so dass der Informationsinhalt digitaler Aufnahmen nicht direkt der Pixelanzahl entspricht. Unterstützt wurde dieses durch eine Erstellung topographischer Karten. Auch bei der geometrischen Genauigkeit ergaben sich Unterschiede. Die Lagegenauigkeit ist nicht nur von der Objektpixelgröße abhängig. Bei der Höhen Genauigkeit zeigen sich noch deutlichere Unterschiede, die nicht nur durch das Höhen-Basis-Verhältnis zu erklären sind. Insgesamt haben die großflächigen digitalen Kameras jedoch Vorteile gegenüber den analogen Kameras.

1 Einführung

Photogrammetrische Auswertungen erfolgen heute mit digitalisierten oder direkt digital aufgenommenen Messbildern. Analoge Luftbilder können mittels des Bildmaßstabes verglichen werden da sich normalerweise die Bildqualität und Bildgenauigkeit nicht stark unterscheiden und ein Standardbildformat von 230mm x 230mm vorherrscht. Dieser einfache Vergleich ist mit originalen digitalen Aufnahmen nicht möglich.

Wie aus Abbildung 1 ersichtlich, ist bei gleicher Objektpixelgröße der Bildmaßstab linear von der Bildpixelgröße abhängig. Werden die Z/I Imaging DMC und die Microsoft Photogrammetry UltraCamD und UltraCamX miteinander verglichen, variiert bei einer Objektpixelgröße von 12cm der Bildmaßstab zwischen 1: 10 000 und 1: 16 667 (Abbildung 2). Bei gleicher Bildqualität können die Aufnahmen nur mittels der Objektpixelgröße verglichen werden, die zukünftig anstelle des Bildmaßstabes verwendet werden muss. Es stellt sich allerdings die Frage, ob die Bildqualität und Genauigkeit als Funktion der Objektpixelgröße gleich sind.

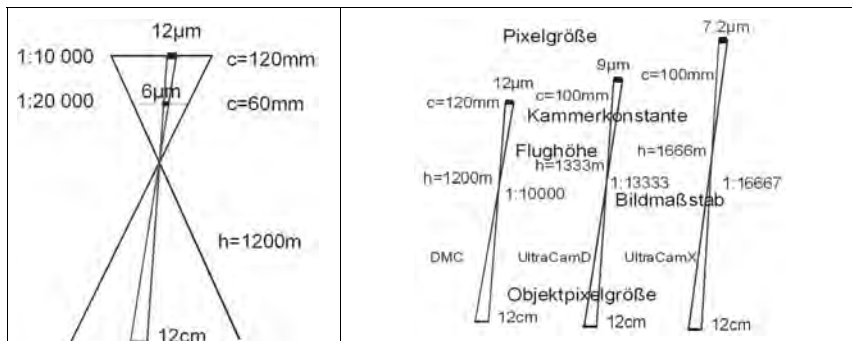
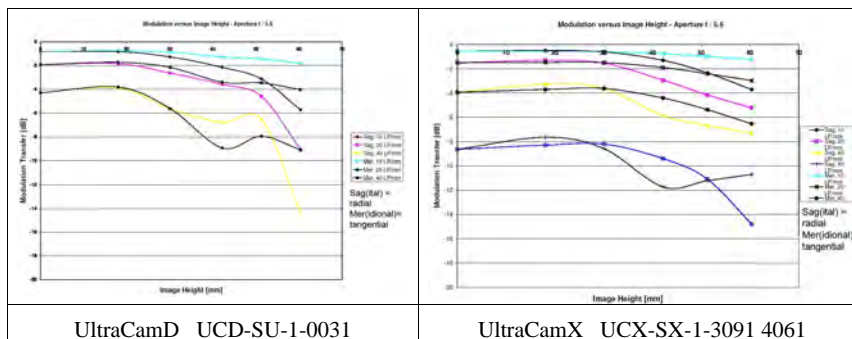


Abb. 1: Bildmaßstab für gleiche Objekt- und unterschiedliche Bildpixelgröße

Abb. 2: Bildmaßstab und Flughöhe für gleiche Objektpixelgröße von 12cm für die DMC, UltraCamD und UltraCamX

Kamera	c	Bildgröße x [Pixel]	Bildgröße y [Pixel]	Pixelgröße	Teilkamera Öffnungswinkel x	Teilkamera Öffnungswinkel y
DMC	120,0 mm	7680	13824	12,0 µm	23,1°	39,4°
UltraCamD	105,2 mm	7500	11500	9,0 µm	35,6°	52,4°
UltraCamX	100,5 mm	9420	14430	7,2 µm	37,3°	54,7°
RC30	151,3 mm	18400	18400	12,5 µm	74,5°	75,5°

Tabelle 1: technische Daten der im Testgebiet Franklin Mills eingesetzten Kameras



UltraCamD UCD-SU-1-0031

UltraCamX UCX-SX-1-3091 4061

Abb. 3: Modulationsübertragungsfunktionen für f/5,6 laut Kalibrierungszertifikat, für verschiedene Auflösungen, sowie für radiale und tangentielle Richtung

Die für die Genauigkeit und den Informationsinhalt ausschlaggebenden panchromatischen, virtuellen DMC- und UltraCam-Aufnahmen werden aus den Aufnahmen von 4 Kameras zusammengesetzt, wobei die panchromatischen DMC-Teilkameras mit 10° und 18°

Nadirwinkel leicht konvergent angeordnet sind, während die UltraCam-Teilkameras parallel ausgerichtet sind. Dementsprechend unterscheiden sich die Öffnungswinkel der Teilkameras (Tabelle 1). Mit zunehmender Größe der Öffnungswinkel nimmt die Modulationsübertragung in den Bildecken ab (Abbildung 3).

Besonders die Modulationsübertragungsverhältnisse für die höheren Auflösungen nehmen bei den UltraCam (Abbildung 3) zu den Bildecken deutlich ab. Wegen der kleineren Öffnungswinkel und der aufwendigeren Optiken der DMC-Teilkameras ist der Abfall zu den Bildecken hin, bei der DMC nahezu vernachlässigbar. Aufgrund dieser Voraussetzung kann nicht von vornherein nur die Anzahl der Pixel im Bild als Qualitätskriterium zum Vergleich der verschiedenen Kameras verwendet werden, sondern es sind reale Bilder miteinander zu vergleichen.

2 Radiometrischer Vergleich

Eine einfache Untersuchung der Auflösung ist mittels einer Kantenanalyse möglich. Eine abrupte Änderung der Objekthelligkeit ruft aufgrund der Modulationsübertragung eine kontinuierliche Änderung der Grauwerte im Bild hervor (Abbildung 4).

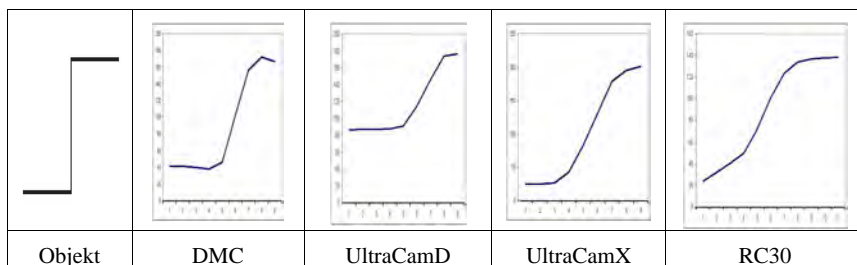


Abb. 4: Grauwertverlauf rechtwinklig zu einer Grauwertkante, Testgebiet Franklin Mills
vertikal: Grauwerte horizontal: relative Pixelposition

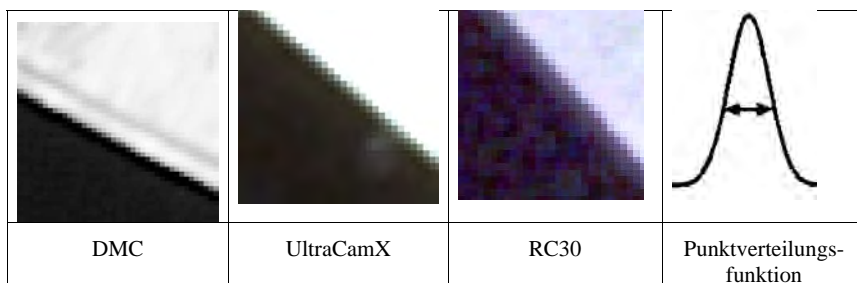


Abb. 5: Grauwertkanten in den Bildern und Punktverteilungsfunktion

Kamera	Bildflug	Sonnenhöhe	Anzahl der Bilder	Objektpixelgröße
DMC	Juli 2007	~ 43°	72	54mm
UltraCamD	Februar 2006	~ 27°	66	42mm
UltraCamX	April 2007	~ 27°	66	37mm
RC30	September 2007	~ 46°	35	49mm

Tabelle 2: Bildflüge im Testgebiet Franklin Mills

In Zusammenarbeit mit BAE SYSTEMS, Network Systems (GP&S), Mt. Laurel, New Jersey, USA wurden im Testgebiet Franklin Mills DMC-, UltraCamD-, UltraCamX- und RC30-Aufnahmen geometrisch und radiometrisch untersucht. Für die radiometrischen Untersuchungen wurden in den Bildern Kanten mit starken Kontrasten gesucht. Innerhalb homogener Kanten wurden alle Grauwertprofile rechtwinklig zur Kante gemittelt, um den Rauscheinfluss zu reduzieren. Die Differenzierung der gemittelten Grauwertverläufe führt zur Gauß-förmigen Punktverteilungsfunktion (point spread function) (Abbildung 5 rechts). Der Abstand zwischen den Wendetangenten der Gaußfunktion ist ein Maß für die radiometrische Bildqualität.

Kamera	Faktor für effektive Pixelgröße	Nominelle Anzahl der Pixel im Bild	Effektive Anzahl der Pixel im Bild
DMC	0.92	7680 x 13824	7680 x 13824
UltraCamD	1.16	7500 x 11500	6465 x 9914
UltraCamX	1.28	9420 x 14430	7360 x 11273
RC30	1.43	18400 x 18400	12870 x 12870 (7667 x 7667)

Tabelle 3: Effektive Anzahl der Pixel im Bild entsprechend der Bildinformation, Testgebiet Franklin Mills

Die Ergebnisse der Tabelle 3 basieren jeweils auf der Untersuchung mehrerer Aufnahmen mit Kanten, die sowohl in den Bildecken als auch in den Bildzentren liegen. Es zeigten sich keine signifikant unterschiedlichen Faktoren für die effektive Pixelgröße in den Bildecken zu den Bildzentren. Bei der DMC wurden panchromatische und pan-sharpened Bilder untersucht, wobei zusätzlich aus den Farbbildern Grauwertbilder erzeugt wurden und außerdem die einzelnen Farbkanäle separat analysiert wurden. Zwischen allen Ergebnissen gab es keine signifikanten Unterschiede, in jedem Fall lag der Faktor für die effektive Pixelgröße unter 1,0, was eigentlich nicht der Fall sein kann. Wie allerdings der Grauwertverlauf einer DMC-Kante in Abbildung 4 andeutet, wurden die DMC-Bilder kontrastverstärkt geliefert, was den Faktor für die effektive Pixelgröße verkleinert. Entsprechende Kontrastverstärkungen deuten sich bei den UltraCam-Aufnahmen allerdings auch an. Auch bei der UltraCamD und UltraCamX gab es mit Ausnahme des Rot-Kanals keine Unterschiede zwischen den Farbkanälen und den Grauwertbildern. Der Rotkanal zeigte um 6% bis 8% schlechtere Ergebnisse als die anderen. Für einen Vergleich der DMC- und

den UltraCam-Aufnahmen sollte allerdings die unterschiedliche Sonnenhöhe während der Aufnahmen (Tabelle 2) berücksichtigt werden. Die Sonnenhöhe, und damit die Helligkeit, wirken sich auf die Bildqualität aus. Im EuroSDR-

Testgebiet Frederiksstad wurden DMC- und UltraCamD-Bilder mit einer Sonnenhöhe von etwa 20° erstellt. Bei der UltraCamD wirkte sich dieses mit einem Faktor für die effektive Pixelgröße von 1,33 aus, während dieser Faktor bei der DMC nur bei 1,05 lag. Dagegen betrug der Faktor bei UltraCamD-Aufnahmen in Istanbul, erstellt mit ca. 60° Sonnenhöhe, im Zentrum der Aufnahmen 1,04, während in den Bildecken der Faktor 1,28 betrug und damit dem Verlauf der Modulationsfunktion (Abbildung 3) entspricht.

Nach der Kantenanalyse (Tabelle 3) wäre der Informationsgehalt einer RC30-Aufnahme, die mit 12,5µm Pixelgröße gescannt wurde, größer als der der digitalen Aufnahmen. Eine Untersuchung des Informationsinhaltes digitaler und analoger Luftbildaufnahmen (OSWALD 2006, JACOBSEN 2007A) durch Erstellung topographischer Karten, zeigte allerdings, dass analoge Luftbilder, die mit 20µm Pixelgröße gescannt wurden, nahezu den gleichen Informationsinhalt wie Aufnahmen haben, die mit 12µm Pixelgröße gescannt wurden. Außerdem entsprach der Informationsinhalt digitalisierter Analogbilder mit einer Objektpixelgröße von 10cm, dem Informationsinhalt original digitaler Aufnahmen, die 15cm Objektpixelgröße haben. Dementsprechend kann die effektive Pixelanzahl der RC30-Aufnahme nur mit 7667^2 Pixeln angegeben werden, was durch den schlechteren Bildkontrast und das durch das Filmkorn hervorgerufene Rauschen erklärbar ist.

3 Geometrischer Vergleich

In dem Testgebiet Franklin Mills (Tabelle 2) befinden sich 40 signalisierte Passpunkte, deren Standardabweichung der Koordinatenkomponenten 2cm nicht überschreiten. Alle 4 Bildflüge wurden mit 60% Längs- und 60% Querüberdeckung aufgenommen. Es erfolgten automatische Aerotriangulationen mit LPS, wobei die Passpunkte von derselben Auswerterin in den Bildern gemessen wurden. Die Analyse der Blockausgleichungen wurde mit dem Hannover'schen Programmsystem BLUH durchgeführt. BLUH hat seinen eigenen Satz zusätzlicher Parameter (Tabelle 4), die zum Teil physikalisch begründet und durch allgemeine Parameter ergänzt werden. Darüber hinaus wurden zusätzliche Parameter für die speziellen geometrischen Probleme der großflächigen Digitalkameras eingeführt, die die Restfehler der Zusammenfügung der virtuellen Bilder aus Teilbildern erfassen und berücksichtigen können. Für die UltraCam stehen für jedes Teilbild ein Maßstab, 2 Verschiebungen und eine Rotation zur Verfügung, so dass 8 Teilbilder auf das zentrale Bild transformiert werden können – mit den Parametern 42 – 73 sind somit $8 \times 4 = 32$ spezielle Parameter vorhanden. Für die DMC kann der Parameter 29 Restfehler der Exzentrizität der Einzeloptiken berücksichtigen. Dieser Parameter war bislang bei keinem Datensatz signifikant, womit derartige Fehler ausgeschlossen werden können. Mit den Parametern 30-33 lassen sich Synchronisationsfehler der Teilkameras erfassen, 34 – 41 erfassen perspektive Fehler der Teilbilder und 74 – 77 radialsymmetrische Fehler der Teilkameras. Es zeigte sich allerdings, dass die DMC geometrisch sehr stabil ist und nur Probleme mit einem einheitlichen Maßstab der Teilkameras und einem einheitlichen radialsymmetrischen Fehler der Teilkameras existieren, die mit den Parametern 79 und 80 zu erfassen sind. Darüber hinaus sind die allgemeinen zusätzlichen Parameter 1 – 12 in jedem Fall sinnvoll. BLUH

reduziert die gewählten Parameter automatisch auf die bestimmbareren und vorhandenen Parameter, womit Überparameterisierungen vermieden werden.

x, y = normierte Bildkoordinaten mit dem Maßstabsfaktor: 162.6mm / maximaler radialer Hauptpunktastand		
$r^2 = x^2 + y^2$	$b = \arctan (y/x)$	
1. $x' = x - y \cdot P1$	$y' = y - x \cdot P1$	Scherung
2. $x' = x - x \cdot P2$	$y' = y + y \cdot P2$	Affinität
3. $x' = x - x \cdot \cos 2b \cdot P3$	$y' = y - y \cdot \cos 2b \cdot P3$	
4. $x' = x - x \cdot \sin 2b \cdot P4$	$y' = y - y \cdot \sin 2b \cdot P4$	
5. $x' = x - x \cdot \cos b \cdot P5$	$y' = y - y \cdot \cos b \cdot P5$	
6. $x' = x - x \cdot \sin b \cdot P6$	$y' = y - y \cdot \sin b \cdot P6$	
7. $x' = x + y \cdot r \cdot \cos b \cdot P7$	$y' = y - x \cdot r \cdot \cos b \cdot P7$	tangentiale Verzeichnung 1
8. $x' = x + y \cdot r \cdot \sin b \cdot P8$	$y' = y - x \cdot r \cdot \sin b \cdot P8$	tangentiale Verzeichnung 2
9. $x' = x - x \cdot (r^2 - 16384) \cdot P9$	$y' = y - y \cdot (r^2 - 16384) \cdot P9$	radialsymmetrisch r^3
10. $x' = x - x \cdot \sin(r \cdot 0.049087) \cdot P10$	$y' = y - y \cdot \sin(r \cdot 0.049087) \cdot P10$	radialsymmetrisch
11. $x' = x - x \cdot \sin(r \cdot 0.098174) \cdot P11$	$y' = y - y \cdot \sin(r \cdot 0.098174) \cdot P11$	radialsymmetrisch
12. $x' = x - x \cdot \sin 4b \cdot P12$	$y' = y - y \cdot \sin 4b \cdot P12$	

Table 4: allgemeine zusätzliche Parameter des Programmsystems BLUH

	SX	SY	SZ	sigma0
ohne Selbstkalibrierung	1.8 cm	1.4 cm	1.6 cm	3.85 μm
Parameter 1-12	1.7 cm	1.4 cm	1.5 cm	3.79 μm
Parameter 1-12, 79-80	1.7 cm	1.4 cm	1.5 cm	3.77 μm

Tabelle 5: Blockausgleichung der DMC-Bilder mit 42 Passpunkten, Widersprüche an den Passpunkten; 54mm Objektivpixel ; 1.7cm = 0.31 Objektivpixel, 1.4cm = 0.26 Objektivpixel

	sigma0	15 Passpunkte			25 Vergleichspunkte		
		SX	SY	SZ	SX	SY	SZ
ohne Selbstkalibrierung	3.60 μm	1.6	1.6	1.2	2.0	1.6	2.3
Parameter 1 – 12	3.55 μm	1.4	1.4	1.1	2.2	1.5	2.4
Parameter 1-12, 79-80	3.54 μm	1.4	1.4	1.0	2.2	1.5	2.4

Tabelle 6: Blockausgleichung der DMC-Bilder mit 15 Passpunkten, Widersprüche an Pass- und Vergleichspunkten [cm] 2.2cm = 0.40 Objektivpixel 1.5cm = 0.28 Objektivpixel

	sigma0	8 Passpunkte			32 Vergleichspunkte		
		SX	SY	SZ	SX	SY	SZ
ohne Selbstkalibrierung	3.51 μm	1.4	0.7	1.0	2.5	1.8	3.4
Parameter 1 – 12	3.49 μm	1.0	0.6	0.7	2.4	1.7	3.4
Parameter 1-12, 79-80	3.48 μm	1.1	0.7	0.6	2.4	1.7	3.0

Tabelle 7: Blockausgleichung der DMC-Bilder mit 8 Passpunkten, Widersprüche an Pass- und Vergleichspunkten [cm] 2.4cm = 0.44 Objektivpixel 1.7cm = 0.31 Objektivpixel

In den Tabellen 5 bis 7 sind die Ergebnisse der Blockausgleichungen mit den Parametern 1-12, 30-41 und 74-77 nicht aufgeführt. Mit den allgemeinen Parametern 1-12 und zusätzlich dem vollen Satz aller DMC-Parameter wurden keine besseren Ergebnisse erzielt als mit der Kombination 1-12 und 79-80. Dieses stimmt mit den Ergebnissen anderer Datensätze überein (WU 2007). Für die DMC werden nur 2 kammer-spezifische Parameter benötigt.

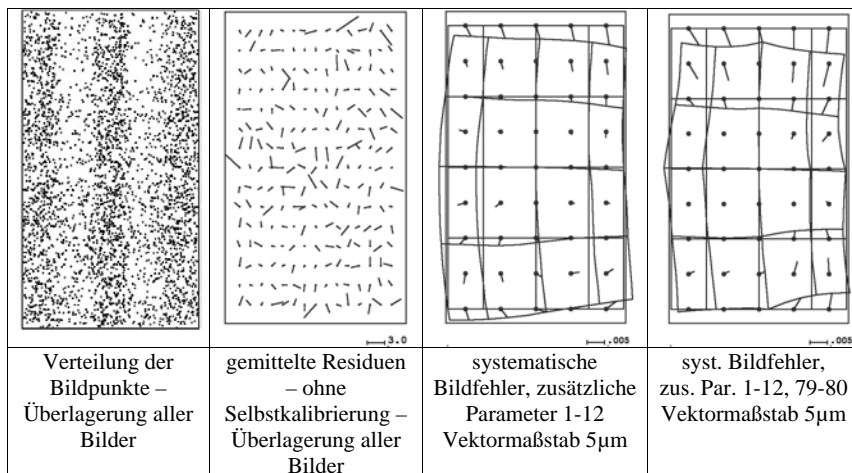


Abb. 6: Ergebnisse der DMC-Blockausgleichung

Die systematischen Bildfehler, oder genauer, die Abweichung der tatsächlichen Bildgeometrie von dem mathematischen Modell der Zentralperspektive, stimmen in der Tendenz mit den Ergebnissen anderer Blockausgleichungen mit der DMC überein. Es sind systematische Bildfehler vorhanden, die innerhalb der Blöcke stabil sind und deren Tendenz auch über einen längeren Zeitraum erhalten bleibt. Die zusätzlichen Parameter 1-12 und 79-80 sind ausreichend und erforderlich. Der Genauigkeitsunterschied unabhängiger Vergleichspunkte mit und ohne Selbstkalibrierung hält sich in Grenzen, was bei dem Testgebiet Franklin Mills durch die hohe Querüberdeckung und die beschränkte Blockgröße erklärbar ist.

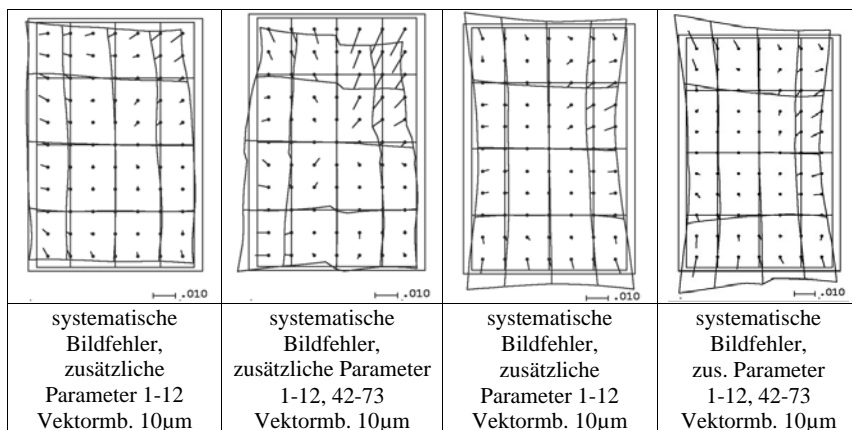


Abb. 7: Ergebnisse der UltraCamD-Blockausgleichung

Abb. 8: Ergebnisse der UltraCamX-Blockausgleichung

Die systematischen Bildfehler der Blockausgleichungen mit den UltraCamD- und den UltraCamX-Aufnahmen fallen größer aus als bei der DMC. Die UltraCamX-Aufnahmen zeigen deutlich homogenere Verhältnisse als die UltraCamD-Aufnahmen.

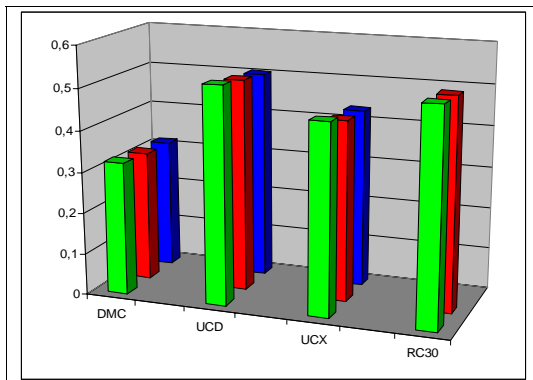


Abb. 8: Standardabweichung der Gewichtseinheit σ_0 [Objektpixelgröße]

erste Zeile (grün): ohne Selbstkalibrierung

zweite Zeile: Selbstkalibrierung mit Parametern 1 – 12

dritte Zeile: Selbstkalibrierung mit Parametern 1 – 12 + kameraspezifische Parameter

Die Standardabweichung der Gewichtseinheit σ_0 zeigt keine starke Abhängigkeit von der Selbstkalibrierung, wie im Detail auch in den Tabellen 5 bis 7 gezeigt.

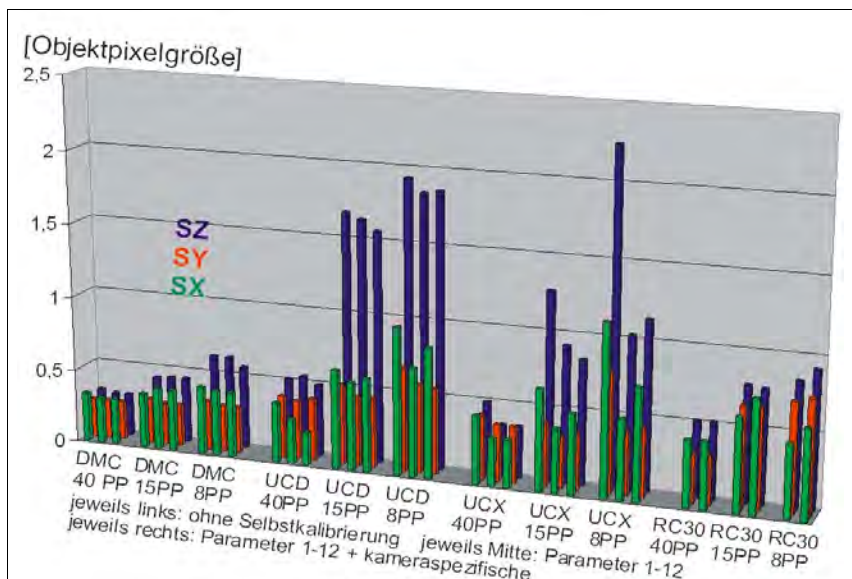


Abb. 9: Genauigkeit der Blockausgleichungen [Objektpixelgröße]
 im Falle von 40 Passpunkten – Widersprüche an den Passpunkten
 im Falle von 15 / 8 Passpunkten – Widersprüche an unabhängigen Vergleichspunkten

Wie die Darstellung der Ergebnisse der Blockausgleichungen (Abbildung 9) zeigt, ist bei den UltraCamD- und UltraCamX-Aufnahmen eine Selbstkalibrierung erforderlich. Die kamera-spezifischen zusätzlichen Parameter ergeben allerdings keine Verbesserung der Ergebnisse, was zum Teil auch bei anderen Datensätzen der Fall war. Die Erstellung der virtuellen Bilder der UltraCamD basiert auf der alten Software. In der Zwischenzeit wurde die Software zur Generierung der virtuellen Bilder von Microsoft Photogrammetry verbessert. Die UltraCamD-Bilder eines Blockes der Deutschen Steinkohle (SPRECKELS u.a. 2007) wurden mit der verbesserten Software erneut generiert, wodurch die systematischen Bildfehler etwa halbiert wurden.

4 Schlussfolgerungen

Die nominelle Anzahl der Pixel einer digitalen Kamera ist nicht unbedingt ein Kriterium zur Beschreibung des Informationsgehalts einer Aufnahme. Die Bildqualität muss hier berücksichtigt werden, sie hängt allerdings auch von den Aufnahmebedingungen, speziell der Sonnenhöhe, ab. Durch die Verkleinerung der Pixel bei der UltraCamX gegenüber der UltraCamD wurde eine Verbesserung erreicht, die im Fall des Testgebiets Franklin Mills allerdings effektiv linear nur 14% statt der nominellen 25% beträgt. Effektiv hat die UltraCamX unter den Bedingungen des Tests Franklin Mills einen Informationsgehalt von linear 13% weniger statt nominell 13% mehr als die DMC. Wird das Ergebnis einer topographischen Auswertung von UltraCamD-, DMC- und analoger Luftbilder berücksichtigt, ist der Informationsgehalt eines analogen Luftbildes kleiner als der einer UltraCamD-Aufnahme, selbst wenn die analogen Luftbilder mit einer Pixelgröße von $12,5\mu\text{m}$ gescannt werden und damit nominell mit $18\ 400^2$ Pixel sehr viel mehr Pixel je Aufnahme haben.

Die geometrischen Untersuchungen führen zu entsprechenden Ergebnissen. Die an unabhängigen Vergleichspunkten erzielten Genauigkeiten der UltraCamX-Aufnahmen sind deutlich besser als die der UltraCamD, die noch mit der alten Microsoft Photogrammetry Software erstellt wurden. Mit der DMC wurden allerdings etwas bessere Ergebnisse erzielt. Besonders die Höhengenaugigkeit der UltraCamX-Auswertungen ist fast um den Faktor 2 schlechter als mit der DMC. Dieses lässt sich nur teilweise mit dem Höhen-Basis-Verhältnis erklären, das für die UltraCam bei 60% Längsüberdeckung 3,7 beträgt, während es für die DMC bei 3,3 liegt. Hier hat die Weitwinkeloptik der RC30 mit einem Höhen-Basis-Verhältnis von 1,6 Vorteile, trotzdem werden, bezogen auf die nominelle Objektpixelgröße, mit der DMC bessere Ergebnisse als mit der RC30 erzielt.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass der Zusammenhang zwischen dem Informationsgehalt und der erzielbaren Genauigkeit etwas komplexer ist als nur mit der nominellen Anzahl der Pixel je Bild und dem Höhen-Basis-Verhältnis auszudrücken ist.

6 Danksagung

Ich danke Dr. Ricardo Passini von BAE SYSTEMS, Network Systems (GP&S), Mt. Laurel, New Jersey, USA für die Unterstützung der Untersuchungen.

7 Literaturverzeichnis

- JACOBSEN, K., 2007a: Potential großformatiger digitaler Luftbildkameras, DGPF Jahrestagung, Tagungsband 16, S. 589 – 597
- JACOBSEN, K., 2007b: Geometric Handling of Large Size Digital Airborne Frame Camera Images, Optical 3D Measurement Techniques VIII, Zürich 2007, pp 164 - 171
- OSWALD, H.C., 2006: Potential digitaler photogrammetrischer Luftbildkameras, Diplomarbeit Leibniz Universität Hannover 2006
- SPRECKELS, V.; SCHLIENKAMP, A. & JACOBSEN, K., 2007: - Model Deformation – Accuracy of Digital Frame Cameras, ISPRS Hannover Workshop 2007, IntArchPhRS. Vol XXXVI Part 1/W51
- WU, D., 2007: Geometrische Aspekte der großformatigen flächenhaften digitalen Kameras und deren Berücksichtigung in der photogrammetrischen Auswertung, Diplomarbeit Leibniz Universität Hannover 2007

Ergebnisse aus UltraCamX Testflügen

UBBO MANSHOLT¹, RICHARD LADSTÄDTER², MICHAEL GRUBER³

*Zusammenfassung: In diesem Beitrag präsentieren wir Testflugergebnisse der digitalen Luftbildkamera UltraCamX. Die Testflüge werden über einem 5 * 7 km² großen Testfeld durchgeführt. Insgesamt werden 520 Bilder in zwei Flughöhen (GSD 10cm und GSD 25cm) aufgenommen.*

Nach dem Bildflug werden die hochauflösenden Luftbilder in einem vollautomatischen Verarbeitungsschritt – dem sogenannten Postprocessing – aus den Rohdaten zusammengesetzt. Dabei werden systematische temperaturabhängige Einflüsse auf die Bildgeometrie automatisch korrigiert

Nach einer radiometrischen Qualitätskontrolle werden die Bilder beider Flughöhen einer Aerotriangulation unterzogen. Dies geschieht in einem automatisierten Workflow unter Verwendung der GPS-Navigationslösungen und dem Softwareprodukt Match AT (Inpho GmbH). Mit Match AT werden auch die manuellen Messungen der insgesamt 46 im Gebiet verfügbaren Vollpasspunkte durchgeführt. Die Lösung des Bündelausgleichs erfolgt unter Einbeziehung von kameraspezifischen Autokalibrierungsparametern im Programmsystem BINGO (GIP, Aalen).

Zur Firmengeschichte des Kameraherstellers: Vexcel Imaging GmbH wurde bekanntlich im Mai 2006 von Microsoft Corp., Redmond, WA, übernommen, bleibt aber als eigenständige Firma bestehen. Neben der Entwicklung und Herstellung der Kamera beschäftigt sich die in Graz stationierte Gruppe mit Softwarelösungen für die Photogrammetrie und für die Microsoft Virtual Earth Initiative.

1 Einleitung

Die digitale großformatige Luftbildkamera UltraCamX wird seit 2006 erzeugt und erfolgreich in der photogrammetrischen Produktion eingesetzt. Die Qualitätskontrolle sieht einen Bildflug über einem 7 * 5 km großen Testgebiet in zwei Flughöhen vor. Insgesamt werden 520 Bilder mit Bodenauflösungen von 10cm und 25cm aufgenommen.

Nach dem Bildflug werden die Rohdaten einem Verarbeitungsprozess unterworfen, der aus den bekanntlich 9 Teilbildern des Mehrkopfsystems ein großes Gesamtbild erzeugt. Dieser vollautomatische Vorgang beinhaltet die Analyse der 12 Überlappungsbereiche zwischen einzelnen Teilbildern und die damit verbundene Erfassung von „Stitchpunkten“ sowie die Auswertung dieser Punktlagen. Schließlich erfolgt die Berechnung von geeigneten Transformationsparametern, die das saubere Zusammenfügen der Teilbilder ermöglichen. Kleine aber unvermeidbare Lageänderungen in der Bildebene werden zusätzlich durch ein robustes „Temperaturmodell“ kompensiert. Dieses Modell interpretiert die genannten Parameter

¹ Dipl.-Ing. Ubbo Mansholt, Vexcel Imaging GmbH, Anzengrubergasse 8, A-8010 Graz, E-Mail: ubboman@microsoft.com

² Dr. Richard Ladstädter, Technische Universität Graz, Institut für Fernerkundung und Photogrammetrie, Steyrergasse 30/1, A-8010 Graz, E-Mail: richard.ladstaedter@tugraz.at

³ Dr. Michael Gruber, Vexcel Imaging GmbH, Anzengrubergasse 8, A-8010 Graz, E-Mail: michgrub@microsoft.com

und berechnet so die Lageänderungen. Mit Hilfe der Auswertung von Temperatursensoren in der Bildebene kann der geometrische Effekt auf eine Temperaturänderung zurückgeführt werden.

Die Bildblöcke beider Flughöhen werden nach der automatischen Verarbeitung, dem so genannten „Post-Processing“ einer Aerotriangulation (AT) unterzogen. Dabei werden auch die insgesamt 46 im Gebiet verfügbaren Vollpasspunkte gemessen. Dieser Beitrag stellt die AT-Ergebnisse vor und gibt außerdem Auskunft über die geometrischen Effekte von zusätzlich angesetzten Parametern im Bündelausgleich.

2 Testgebiet Gleisdorf und der Workflow der geometrischen Qualitätskontrolle

Um die geometrische Qualität der Kameras unter Produktionsflugbedingungen zu überprüfen, wurde ein Testfeld, ca. 30km östlich von Graz, eingerichtet. Das Testfeld hat eine Ausdehnung von 5 * 7 km². Bei der Auswahl des Testgebietes wurde auf eine heterogene Oberflächenstruktur (Gelände mit Höhenunterschieden, Wald, Acker, Wiesen, Flussauen, Bebauung und Verkehrsinfrastruktur) Wert gelegt. Anhand dieser Objektarten werden zusätzlich zu den geometrischen Kontrollen auch radiometrische Tests durchgeführt.

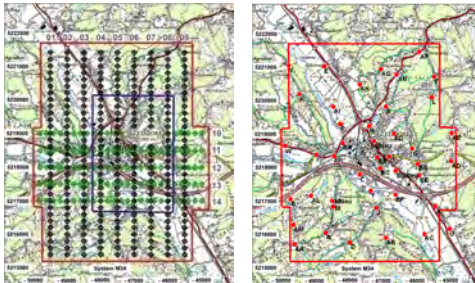


Abb. 1: Testgebiet Gleisdorf – links die Flugplanung für die tiefe Flughöhe – rechts die Passpunktverteilung im Gebiet



Abb. 2: gemessener Passpunkt im MatchAT

Jede UltraCamX wird über diesem Gebiet in zwei Flughöhen (1800m und 3500m) in einem Kreuzschema geflogen. Der niedrige Flug weist eine GSD von 10cm mit insgesamt 404 Bildern auf – der hohe Flug wird mit 116 Bildern und einer GSD von 25cm geflogen. In beiden Flughöhen beträgt die Überlappung in Flugrichtung 80% und die Seitwärtsüberlappung 60%. Neben den Bilddaten werden AGPS und IMU Daten erfasst. Das Testfeld verfügt über 46 mit D-GPS vermessene natürliche Vollpasspunkte, mit Genauigkeiten von 2cm in der Lage und 4cm in der Höhe.

Die aus der Befliegung gewonnenen Bilddaten der vier panchromatischen Kameraköpfe werden in einem Nachbearbeitungsschritt ohne manuellen Einfluss zusammengesetzt und stehen für die Aerotriangulation zur Verfügung. Manuelle Passpunktmessungen und die automatische Messung

von Verknüpfungspunkten werden mit dem Softwarepaket MatchAT von Inpho, Stuttgart durchgeführt.

Die mit MatchAT erstellten Messdaten werden anschließend exportiert und mit dem Bündelausgleichsprogramm BINGO, GIP Aalen, verarbeitet. Dabei besteht die Möglichkeit, kameraspezifische Parameter für die Selbstkalibrierung einzuführen. Kenngrößen der Bündellösung lassen sich kurz zusammenfassen:

Die Genauigkeit der Passpunktmessung liegt im Durchschnitt bei 0,2 Pixel in der Bildebene, die automatische Messung der Verknüpfungspunkte liegt erfahrungsgemäß bei 0,15 Pixel und darunter. Bei einer Pixelgröße von 7,2 μm entspricht das einer Qualität in den Bildkoordinatenmessungen von 1 μm .

3 Bildbearbeitung unter Berücksichtigung von Materialparametern

Die UltraCamX basiert auf einem Multi-Sensor Konzept. Bei der Bildprozessierung wird das hochauflösende panchromatische Luftbild aus Teilbildern von insgesamt neun CCD-Sensoren zusammengesetzt. Im Rahmen der Laborkalibrierung wird die Lage der einzelnen Sensoren in jedem der vier Kameraköpfe exakt bestimmt. Während des Bildfluges wirkt im Allgemeinen eine andere Temperatur auf die Kamerakomponenten ein als während der Laborkalibrierung. Dieser Temperaturunterschied führt zu kleinen, relativen Verschiebungen der Sensorpositionen in den Fokalebene der Kameraköpfe. Um diese Verschiebungen zu berücksichtigen und zu kompensieren, wurde an der TU Graz ein robustes Temperaturmodell (TDM-Modell) entwickelt (LADSTÄDTER, 2007).

3.1 Modellierung der Sensordrift und Bestimmung der Temperaturabweichung

Die Temperaturdifferenz, die zur Modellierung der Sensorverschiebung benötigt wird, kann nun von Maßstabsfaktoren abgeleitet verwendet, die beim Zusammenfügen der neun Einzelbilder der CCD-Sensoren geschätzt werden.

Dafür werden geometrische als auch Materialparameter der einzelnen Kameraköpfe verwendet. Der Zusammenhang zwischen geometrischer Lageänderung und Temperaturdifferenz wird durch die im Sensorkopf eingesetzten Temperaturfühler verifiziert.

Mit Hilfe von Korrekturtabellen wird dann die Sensorverschiebung bestimmt. Die so ermittelte Sensorverschiebung wird beim erneuten Zusammenfügen der neun Einzelbilder des panchromatischen Kanals berücksichtigt und somit die Auswirkung des Temperaturunterschiedes zwischen Laborkalibrierung und Flugtemperatur in der Bildebene der UltraCam beseitigt

3.2 Wirkung des TDM Modells

Die Qualität der Bildgeometrie wird bereits im Zuge der Nachverarbeitung, dem so genannten „Postprocessing“ anhand der Stitching Ergebnisse abgeschätzt.

Als Qualitätsmaße dienen, entsprechend der obigen Beschreibung, hier:

1. die Maßstabsfaktoren aus dem Zusammenfügen der Teilbilder
2. die aus den Maßstabsfaktoren abgeleitete Differenz zwischen Labor- und Flugtemperatur
3. die aus der Temperaturdifferenz abgeleitete Sensorverschiebung

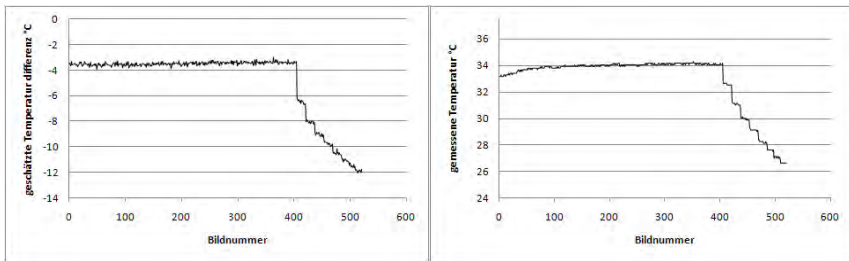


Abbildung 3: links: Temperaturdifferenz zur Labortemperatur, rechts: gemessene Temperatur

Die für jedes Bild individuell geschätzte Temperaturdifferenz ist auf der linken Seite der Abbildung 3 dargestellt. Zu Beginn des Fluges ist die Temperaturdifferenz konstant bei $-3,8^{\circ}\text{C}$. Mit Beginn des hohen Fluges (3500 AGL) reduziert sich die Temperaturdifferenz um weitere 8°C . Die tatsächlich gemessene Sensortemperatur während der Bildaufnahmen ist auf der rechten Seite der Abbildung 3 dargestellt.

4 Ergebnisse der Aerotriangulation

Nach dem Bildflug und der anschließenden Nachverarbeitung der Bilder im „Postprocessing“ liegen großformatige Flächenbilder vor, die in einem konventionellen Triangulierungsverfahren weiterverarbeitet werden. Die automatische Messung von Verknüpfungspunkten und die manuelle Messung von Passpunkten wird – getrennt nach Flughöhen – jeweils mit dem Softwareprodukt MatchAT (Inpho, Stuttgart) durchgeführt. Die so erfassten Messungen werden exportiert und mit BINGO (GIP, Aalen) weiterverarbeitet.

Mit dem Bündelausgleichsprogramm Bingo ist es möglich einen speziellen Satz von Parametern für die UltraCam anzusetzen. Diese Parameter beziehen sich auf die Positionierung (Verschiebung / Rotation) und Skalierung der 9 Teilbilder, aus denen das panchromatische Bild der UltraCam zusammengesetzt wird. Außerdem können Parameter für die radial-symmetrische Verzeichnung mitgeschätzt werden. Dieser umfassende Parametersatz erlaubt es, systematische Bildfehler, die nach der Laborkalibrierung und dem temperaturkorrigierten Zusammenfügen der Teilbilder noch vorhanden sind, von den zufälligen Fehlern zu trennen. Jeder Testflug wird mit drei Parametervariationen prozessiert.

1. ohne Ansetzen von zusätzlichen Parametern
2. mit radial-symmetrischen Parametern
3. mit dem sensorspezifischen Parametersatz von Bingo und radialen Parametern

Mit Bingo ist es möglich den Einfluss der Parameter grafisch und numerisch darzustellen. Im Folgenden werden die Effekte der unterschiedlichen Parameter auf die Bildgeometrie erläutert. Danach erfolgt eine vergleichende Darstellung der systematischen Restfehler im Bild über die bisher durchgeführten Testflüge.

4.1 Verbesserung der Bildgeometrie durch Ansetzen von Parametern im Bündelausgleich

Abbildung 5 zeigt, dass die Restfehler in der Bildebene insgesamt sehr klein sind. Der Ansatz

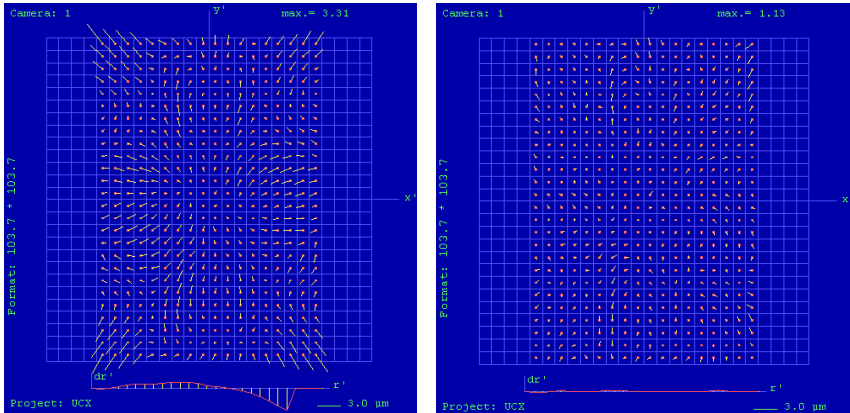


Abb. 5: Restfehler im Bild am Beispiel einer UCX: links - ohne Parameter, rechts – mit radialsymmetrischen Parametern

ohne Parameter (links) weist eine radialsymmetrische Restsystematik auf, die sich durch das Ansetzen entsprechender Parameter wirksam beseitigen lässt. Die maximalen Restfehler im Bild werden mit dem traditionellen radial-symmetrischen Parametersatz von rd. 3,4 µm auf rd. 1,2µm in den Maximalwerten reduziert. Das Anbringen des gesamten möglichen Parametersatzes bringt nur noch geringe Verbesserungen im Vergleich zu dem Ansatz der radial-symmetrischen Parameter.

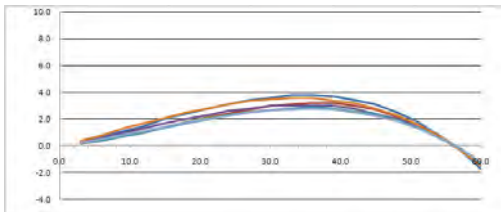


Abb. 6: radialsymmetrische Verzeichnung von testgeflogenen UCX für die Flughöhe 1400m

Beim Vergleich der einzelnen Triangulierungen aus verschiedenen Bildflügen hat sich die hohe Wirksamkeit der radialsymmetrischen Parameter bestätigt. Abbildung 6 zeigt die radialsymmetrische Verzeichnung für verschiedene Testflüge mit der Flughöhe von 1400m. Im Mittel liegt eine maximale Verzeichnung von 3,2 µm vor. Dieser Maximalwert schwankt

um rund $\pm 0,5 \mu\text{m}$ im Vergleich der Testflüge. Für die Testflughöhe 3500m liegt die maximale Verzeichnung bei rund 4,5µm. Da die Streuung der radial-symmetrischen Verzeichnungskurven im Kameravergleich sehr gering ist, und auch bei der Analyse von zahlreichen Kundenprojekten verifiziert wurde, wird in Zukunft eine mittlere Verzeichnung von maximal 3,2µm schon bei der Bildprozessierung berücksichtigt. Damit weisen Luftbilder, die in einer Höhe von 1400m

aufgenommen werden nur noch eine maximale radialsymmetrische Verzeichnung in Höhe des Abstandes zur mittleren Verzeichnung auf (maximal $0,5\mu\text{m}$). Für andere Flughöhen steigt die radialsymmetrische Verzeichnung dann auf Werte von höchstens $1,9\mu\text{m}$ an. Der Vorteil einer a priori Berücksichtigung der radialsymmetrischen Systematik liegt darin, dass auf eine projektbezogene Selbstkalibrierung größtenteils verzichtet werden kann. Es können also weitgehend verzeichnungsfreie Bilder ohne die Analyse einer Aerotriangulation erzeugt werden, deren spezifische Ergebnisse erst in eine erneute Bildprozessierung einfließen müssten.

4.2 Bündelausgleichsergebnisse einer Reihe von Bildflügen mit UltraCamX

		Sigma_0	max. Restfehler im Bild	verbleibende radialsymmetrische Verzeichnung	Anzahl Flüge
GSD 10 cm entspr. 1400m AGL	Mittel	0,87	$0,87\mu\text{m}$	$0,50\mu\text{m}$	40
	St.abw	$\pm 0,11$	$\pm 0,25\mu\text{m}$	$\pm 0,27\mu\text{m}$	
	Max	1,5	$1,6\mu\text{m}$	$1,1\mu\text{m}$	
GSD 25 cm entspr. 3500 AGL	Mittel	1,04	$1,28\mu\text{m}$	$1,17\mu\text{m}$	14
	St.abw	$\pm 0,18$	$\pm 0,31\mu\text{m}$	$\pm 0,55\mu\text{m}$	
	Max	1,8	$1,7\mu\text{m}$	$1,9\mu\text{m}$	
Tabelle 2: Bündelausgleichsergebnisse von Testflügen der UltraCamX für zwei verschiedene Bodenauflösungen / Flughöhen					

Tabelle 2 zeigt die wesentlichen Genauigkeitsmaße von den UltraCamX, die über dem Testgebiet Gleisdorf geflogen wurden. Dabei wurde, wie im letzten Abschnitt beschrieben, eine a priori radialsymmetrische Verzeichnung von $3,2\mu\text{m}$ bereits berücksichtigt.

Unterschiede zwischen den beiden Flughöhen 1400m und 3500m deuten darauf hin, dass die Einflüsse der Atmosphäre (Temperatur, Luftdruck) einen Beitrag zu dieser Verzeichnung liefern. Da hier die Ergebnisse zahlreicher UltraCamX Testflüge wiedergegeben werden, ist außerdem die jeweilige Standardabweichung über die Messreihe angegeben. Insgesamt zeigt der niedrige Sigma_0 Wert ein sehr hohes Genauigkeitsniveau der Messungen.

Bei der Planung des UltraCamX Testfeldes in Gleisdorf bei Graz wurde neben der gleichmäßigen Passpunktverteilung auch auf eine hohe Anzahl von Passpunkten Wert gelegt. Bei der Auswertung kann daher ein großer Teil der gemessenen Passpunkte als Checkpunkte eingeführt werden. Tabelle 3 zeigt die mittlere geschätzte Objektpunktgenauigkeit und die Checkpunktresiduen der durchgeführten UCX Testflüge. Dabei wurden fünf Passpunkte verwendet (vier in den Blockecken, einer in im zentralen Bereich), die übrigen wurden als Checkpunkt eingeführt.

Neben dem Mittelwert ist außerdem die Standardabweichung und der maximal aufgetretene Wert angegeben, um die Qualität jeder ausgelieferten Kamera zu beurteilen. Außerdem wird zwischen den beiden Testflughöhen von 1400m und 3500m unterschieden.

Die geringen Checkpunktresiduen zeigen die hohe geometrische Qualität. Für die Flughöhe von 1400m ergibt sich eine Höhengenaugigkeit von 0,035‰ und für die Flughöhe von 3500m eine Höhengenaugigkeit von 0,03‰.

		sX			Checkpunktresiduen			Anzahl Flüge
		X [cm]	Y [cm]	Z [cm]	X [cm]	Y [cm]	Z [cm]	
GSD 10 cm entspr. 1400m AGL	Mittel	1,05	0,88	3,42	3,30	3,66	4,77	20
	St.abw.	±0,25	±0,22	±0,89	±0,82	±0,96	±0,53	
	Max	1,5	1,4	5,1	6,1	6,7	5,9	
GSD 25 cm entspr. 3500 AGL	Mittel	3,05	2,12	9,28	5,58	6,15	9,38	14
	St.abw.	±0,59	±0,43	±2,02	±1,70	±1,79	±1,79	
	Max	3,9	3,0	13,0	8,7	9,7	12,1	

Tabelle 3: mittlere geschätzte Objektpunktgenauigkeit und Checkpunktresiduen von Testflügen der UltraCamX für zwei verschiedene Bodenauflösungen / Flughöhen

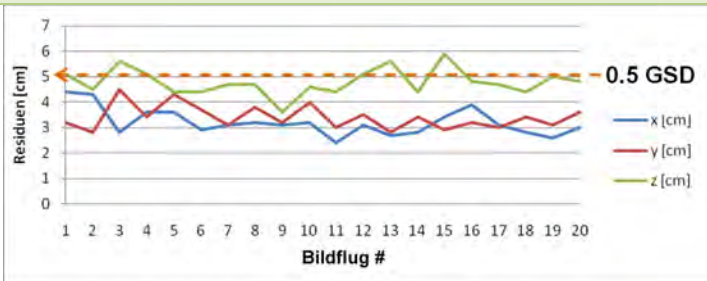


Abbildung 7: Checkpunktresiduen der UltraCamX Testflüge für die Flughöhe 1400m – jeweils 23 Check- und Vollpasspunkte wurden verwendet

In

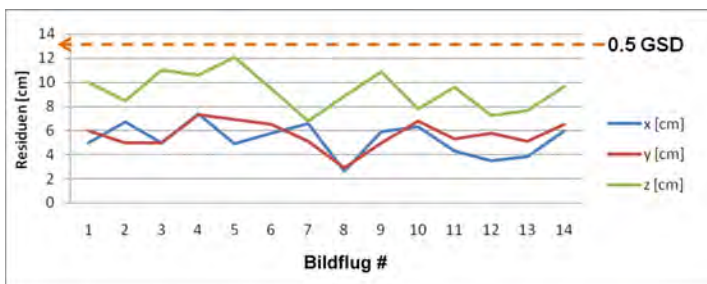


Abbildung 8: Checkpunktresiduen der UltraCamX Testflüge für die Flughöhe 3500m - jeweils 23 Check- und Vollpasspunkte wurden verwendet.

Abbildung 7 sind die Checkpunktresiduen in der oben beschriebenen Checkpunkt / Passpunktanordnung für die Flughöhe von 1400m dargestellt. Die äußere Lagegenauigkeit liegt bei unter einem Pixel der UltraCamX. Die äußere Höhengengenauigkeit beträgt für diese Flughöhe im Mittel rund ein halbes Pixel. Es wurden bei den untersuchten Kameras keine Ausreißer festgestellt.

Abbildung 8 zeigt die Checkpunktresiduen für die Flughöhe von 3500m. Hier liegt die Lagegenauigkeit bei rund $\frac{1}{4}$ Pixel und die Höhengengenauigkeit bei unter einem halben Pixel.

5 Schlussfolgerungen und Ausblick

Die Untersuchungen der UltraCamX Testflüge haben gezeigt, dass die Qualität des Temperaturmodells und die angebrachten traditionellen radialsymmetrischen Parameter eine positive Wirkung auf die Kamerageometrie haben. Insbesondere die Genauigkeit an den Checkpunkten von 0,03% der Flughöhe zeigt die geometrische Qualität der UltraCamX. Das beschriebene Temperaturmodell ist seit Ende des Jahres 2006 in die proprietäre Stitching-Software implementiert.

Die geometrische Qualität, die sich aus den Testflügen ergibt wurde auch anhand von Produktionsflügen bestätigt. Im Rahmen der Microsoft Virtual Earth Initiative wird UltraCamX erfolgreich zur Erfassung von Luftbilddaten eingesetzt. Die automatische Auswertung der Bilddaten gelingt und führt zu einer dreidimensionalen Beschreibung der Objekte besonders im urbanen Bereich. Die Vorteile der digitalen Kamera – simultane RGB und NIR Erfassung sowie die Möglichkeit wirtschaftlich redundante Bilddaten durch hohe Überlappung zu erzeugen – bilden die Grundlage für diese Anwendung.

6 Literaturverzeichnis

- LEBERL, F. et al. (2003): The UltraCam Large Format Aerial Digital Camera System, Proceedings of the American Society For Photogrammetry & Remote Sensing, 5-9 May, 2003, Anchorage, Alaska
- GRUBER, M. & LADSTÄDTER, R., 2006: Geometric issues of the digital large format aerial camera UltraCamD. International Calibration and Orientation Workshop EuroCOW, 2006, Proceedings, 25-27 January 2006, Castelldefels, Spanien.
- LEBERL, F. & GRUBER, M., (2007): Microsoft's Virtual Earth Initiative, Presentation at the Geo-Nord Conference, Hannover, March, 2007.
- LADSTÄDTER, R., 2007: Softwaregestützte Kompensation temperaturabhängiger Bilddeformationen für die Vexcel UltraCam: Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation e.V. – Vorträge Dreiländertagung 19. – 21. Juni, Muttentz, Basel., 16 (2007).

Autorenverzeichnis

ABEBE, B.: Siehe BUCHWITZ, M.; HEINIG, T.; HELBIG, M.; GLOAGUEN, R. & ABEBE, B.: Surface deformation mapping employing a kinematic GPS approach.	127
ALBERS, C. & SCHMIDT, C.: Methoden zur Verbesserung und Validierung neuer Geodaten unter Einsatz von FME und Oracle Spatial.	9
ANDERSON, J.; WETZEL, H.-U.; WALTER, T. & MOTAGH, M.: Messungen von Landabsenkungen im Kashmar Tal, NE Iran, unter Verwendung von Satelliten Radar Interferometrie.	203
ARNOLD, S. & BUSCH, A.: Integration von Fernerkundungsdaten in nationale und Europäische Dateninfrastrukturen – Ableitung von CORINE Land Cover-Daten aus DLM-DE.	19
ASCH, K. & TROPPEHAGEN, H.-G.: GeoScience Markup Language – „Esperanto,, für geologische Daten.	213
BAUER, M.; SCHEELE, M. & SCHISCHMANOW, A.: Kalibration mittels Beugung und Goniometermessung im Vergleich.	267
BETHMANN, F.: Siehe LUHMANN, T.; BETHMANN, F.; HERD, B. & OHM, J.: Dynamische 3D Oberflächenerfassung mit Bildsequenzen.	69
BIENERT, A. & SCHELLER, S.: Verfahren zur automatischen Bestimmung von Forstinventurparametern aus terrestrischen Laserscannerpunktwolken.	37
BIENERT, A.: Siehe MEIERHOLD, N.; BIENERT, A. & SCHMICH, A.: Linienbasierte Referenzierung zwischen Einzelbildern und Laserscannerdaten für eine bildgestützte Interpretation von Punktwolken in einer CAD-Umgebung.	79
BÖHLER, M.: Siehe WANJING LI; BÖHLER, M.; SCHÜTZE, R.; MARZANI, F.S.; BOOCHS, F. & VOISIN, Y.: Ein stereoskopisches Nahbereichssystem auf Basis von adaptiver Musterprojektion.	171
BOOCHS, F.: Siehe WANJING LI; BÖHLER, M.; SCHÜTZE, R.; MARZANI, F.S.; BOOCHS, F. & VOISIN, Y.: Ein stereoskopisches Nahbereichssystem auf Basis von adaptiver Musterprojektion.	171
BOOS, S.; HORNING, S.; JUNG, P. & MÜLLER, H.: Erfassung und Analyse von Laserscandaten zur Unterstützung der Landschaftsarchäologie.	219
BORG, G.: Siehe HEIM, B.; GLÄBER, C.; BORG, G.; REICHERT, J.; THOMAE, M.; CHABRILLAT, S. & RICHTER, W.: Spektroradiometrische Untersuchungen im GEO/BIOLabor ‚FND Salzstelle Teutschenthal-Bahnhof‘ (Halle).	237
BÖSEMANN, W.: Siehe KAHLMANN, T.; BÖSEMANN, W. & GODDING, R.: Erfassung dynamischer Prozesse im industriellen Umfeld.	47
BUCHROITHNER, M.; KOCH, W.G. & RÜLKE, C.: Aktuelle Entwicklungen der Kartographieausbildung an der TU Dresden.	107
BUCHWITZ, M.; HEINIG, T.; HELBIG, M.; GLOAGUEN, R. & ABEBE, B.: Surface deformation mapping employing a kinematic GPS approach.	127
BUSCH, A.: Siehe ARNOLD, S. & BUSCH, A.: Integration von Fernerkundungsdaten in nationale und Europäische Dateninfrastrukturen – Ableitung von CORINE Land Cover-Daten aus DLM-DE.	19
BUTENUTH, M. & HINZ, S.: Verification of intact road network in satellite imagery for crises applications.	111

CHABRILLAT, S.: Siehe HEIM, B.; GLÄßER, C.; BORG, G.; REICHERT, J.; THOMAE, M.; CHABRILLAT, S. & RICHTER, W.: Spektroradiometrische Untersuchungen im GEO/BIOLabor ‚FND Salzstelle Teutschenthal-Bahnhof‘ (Halle).	237
ENGEL, A.: Siehe GRENZDÖRFFER, G.; ENGEL, A. & JÜTTE, K.: Low-cost UAV's in der Lland- und Forstwirtschaft. – Eine vergleichende Untersuchung von zwei Mini-UAV's.	27
GÄHLER, M. & VOIGT, S.: DeSecure – Satellitengestützte Kriseninformation für Deutschland.	119
GLÄßER, C.: Siehe HEIM, B.; GLÄßER, C.; BORG, G.; REICHERT, J.; THOMAE, M.; CHABRILLAT, S. & RICHTER, W.: Spektroradiometrische Untersuchungen im GEO/BIOLabor ‚FND Salzstelle Teutschenthal-Bahnhof‘ (Halle).	237
GLOAGUEN, R.: Semi-automatic Remote Sensing River and Fault Analysis for geomorphological and Neotectonics.	229
GLOAGUEN, R.: Siehe BUCHWITZ, M.; HEINIG, T.; HELBIG, M.; GLOAGUEN, R. & ABEBE, B.: Surface deformation mapping employing a kinematic GPS approach.	127
GLOAGUEN, R.: Siehe LEIDIG, M. & GLOAGUEN, R.: Estimation of erosion with remote sensing data on large scale – an approach for Tibet.	137
GLOAGUEN, R.: Siehe SHAHZAD, F.; MAHMOOD, S.A. & GLOAGUEN, R.: Neotectonics development in North-Eastern Potwar (Pakistan): inferences from Remote Sensing and Geophysical Methods.	143
GLOAGUEN, R.: Siehe WIJAYA, A. & GLOAGUEN, R.: Spatial Distribution of Stand Volume through Integration of Field Measurement and Remote Sensing Data: a Case Study of Tropical Rainforest in Central Indonesia.	189
GODDING, R.: Siehe KAHLMANN, T.; BÖSEMANN, W. & GODDING, R.: Erfassung dynamischer Prozesse im industriellen Umfeld.	47
GÖTTING, M.: Siehe LINDSTAED, M.; KERSTEN, T.; MECHELKE, K.; GÖTTING, M. & HEIDEN, R.: Virtuelles 3D-Modell der antiken Tempelanlage in Sirwah/Jemen zur archäologischen Objektdokumentation durch terrestrisches Laserscanning und Photogrammetrie.	59
GRASSE, R.: Neue Geodaten müssen passen! Datenintegration am Beispiel von Adressdaten.	23
GRENZDÖRFFER, G.; ENGEL, A. & JÜTTE, K.: Low-cost UAV's in der Lland- und Forstwirtschaft. – Eine vergleichende Untersuchung von zwei Mini-UAV's.	27
GRUBER, M.: Siehe MANSHOLT, U.; & LADSTÄDTER, R. & GRUBER, M.: Ergebnisse aus UltraCamX Testflügen.	283
HEIDEN, R.: Siehe LINDSTAED, M.; KERSTEN, T.; MECHELKE, K.; GÖTTING, M. & HEIDEN, R.: Virtuelles 3D-Modell der antiken Tempelanlage in Sirwah/Jemen zur archäologischen Objektdokumentation durch terrestrisches Laserscanning und Photogrammetrie.	59
HEIM, B.; GLÄßER, C.; BORG, G.; REICHERT, J.; THOMAE, M.; CHABRILLAT, S. & RICHTER, W.: Spektroradiometrische Untersuchungen im GEO/BIOLabor ‚FND Salzstelle Teutschenthal-Bahnhof‘ (Halle).	237
HEINIG, T.: Siehe BUCHWITZ, M.; HEINIG, T.; HELBIG, M.; GLOAGUEN, R. & ABEBE, B.: Surface deformation mapping employing a kinematic GPS approach.	127

HELBIG, M.: Siehe BUCHWITZ, M.; HEINIG, T.; HELBIG, M.; GLOAGUEN, R. & ABEBE, B.: Surface deformation mapping employing a kinematic GPS approach.	127
HERD, B.: Siehe LUHMANN, T.; BETHMANN, F.; HERD, B. & OHM, J.: Dynamische 3D Oberflächenerfassung mit Bildsequenzen.	69
HINZ, S.: Siehe BUTENUTH, M. & HINZ, S.: Verification of intact road network in satellite imagery for crises applications.	111
HOFFMANN, R.: Siehe REULKE, R. & HOFFMANN, R.: Geometrische Datenfusionsverfahren.	259
HORNUNG, S.: Siehe BOOS, S.; HORNUNG, S.; JUNG, P. & MÜLLER, H.: Erfassung und Analyse von Laserscandaten zur Unterstützung der Landschaftsarchäologie.	219
JACOBSEN, K.: Sagt die Anzahl der Pixel im Bild alles?	273
JUNG, P.: Siehe BOOS, S.; HORNUNG, S.; JUNG, P. & MÜLLER, H.: Erfassung und Analyse von Laserscandaten zur Unterstützung der Landschaftsarchäologie.	219
JÜTTE, K.: Siehe GRENZDÖRFFER, G.; ENGEL, A. & JÜTTE, K.: Low-cost UAV's in der Lland-und Forstwirtschaft. – Eine vergleichende Untersuchung von zwei Mini-UAV's.	27
KAHLMANN, T.; BÖSEMANN, W. & GODDING, R.: Erfassung dynamischer Prozesse im industriellen Umfeld.	47
KERSTEN, T.: Siehe LINDSTAED, M.; KERSTEN, T.; MECHELKE, K.; GÖTTING, M. & HEIDEN, R.: Virtuelles 3D-Modell der antiken Tempelanlage in Sirwah/Jemen zur archäologischen Objektdokumentation durch terrestrisches Laserscanning und Photogrammetrie.	59
KLEINSCHMIT, B.: Siehe ROSS, L. & KLEINSCHMIT, B.: Virtuelle 3D-Stadtmodelle im kommunalen Einsatz –Entwicklungen, Trends und Perspektiven.	97
KOCH, W.G.: Siehe BUCHROITHNER, M.; KOCH, W.G. & RÜLKE, C.: Aktuelle Entwicklungen der Kartographieausbildung an der TU Dresden.	107
KOZUSCHEK, N.: Siehe PEIPE, J.; KOZUSCHEK, N. & PRZYBILLA, H.-J.: Erfahrungen bei der messtechnischen Erfassung, Modellierung und Darstellung von kleinförmigen Kunstobjekten.	89
KRESSE, W.: Statusbericht zur Standardisierung für Photogrammetrie und Fernerkundung.	247
LADSTÄDTER, R.: Siehe MANSHOLT, U.; & LADSTÄDTER, R. & GRUBER, M.: Ergebnisse aus UltraCamX Testflügen.	283
LEIDIG, M. & GLOAGUEN, R.: Estimation of erosion with remote sensing data on large scale – an approach for Tibet.	137
LINDSTAED, M.; KERSTEN, T.; MECHELKE, K.; GÖTTING, M. & HEIDEN, R.: Virtuelles 3D-Modell der antiken Tempelanlage in Sirwah/Jemen zur archäologischen Objektdokumentation durch terrestrisches Laserscanning und Photogrammetrie.	59
LUHMANN, T.; BETHMANN, F.; HERD, B. & OHM, J.: Dynamische 3D Oberflächenerfassung mit Bildsequenzen.	69
MAHMOOD, S.A.: Siehe SHAHZAD, F.; MAHMOOD, S.A. & GLOAGUEN, R.: Neotectonics development in North-Eastern Potwar (Pakistan): inferences from Remote Sensing and Geophysical Methods.	143

MANSHOLT, U.; & LADSTÄDTER, R. & GRUBER, M.: Ergebnisse aus UltraCamX Testflügen.	283
MARZANI, F.S.: Siehe WANJING LI; BÖHLER, M.; SCHÜTZE, R.; MARZANI, F.S.; BOOCHS, F. & VOISIN, Y.: Ein stereoskopisches Nahbereichssystem auf Basis von adaptiver Musterprojektion.	171
MECHELKE, K.: Siehe LINDSTAED, M.; KERSTEN, T.; MECHELKE, K.; GÖTTING, M. & HEIDEN, R.: Virtuelles 3D-Modell der antiken Tempelanlage in Sirwah/Jemen zur archäologischen Objektdokumentation durch terrestrisches Laserscanning und Photogrammetrie.	59
MEIERHOLD, N.; BIENERT, A. & SCHMICH, A.: Linienbasierte Referenzierung zwischen Einzelbildern und Laserscannerdaten für eine bildgestützte Interpretation von Punktwolken in einer CAD-Umgebung.	79
MOTAGH, M.: Siehe ANDERSON, J.; WETZEL, H.-U.; WALTER, T. & MOTAGH, M.: Messungen von Landabsenkungen im Kashmar Tal, NE Iran, unter Verwendung von Satelliten Radar Interferometrie.	203
MÜLLER, H.: Siehe BOOS, S.; HORNUNG, S.; JUNG, P. & MÜLLER, H.: Erfassung und Analyse von Laserscandaten zur Unterstützung der Landschaftsarchäologie.	219
MÜTERTHIES, A.: Siehe VÖLKER, A. & MÜTERTHIES, A.: Landschaftsökologische Modellierung und automatisierte Erfassung von Landschaftselementen für das Monitoring und die Bewertung einer nachhaltigen Kulturlandschaft.	161
NEUDECK, S.: Qualitätssicherung bei der Datenmigration in das Topographische Landschaftsmodell der Schweiz.	251
OHM, J.: Siehe LUHMANN, T.; BETHMANN, F.; HERD, B. & OHM, J.: Dynamische 3D Oberflächenerfassung mit Bildsequenzen.	69
PEIPE, J.; KOZUSCHEK, N. & PRZYBILLA, H.-J.: Erfahrungen bei der messtechnischen Erfassung, Modellierung und Darstellung von kleinförmigen Kunstobjekten. ...	89
PRZYBILLA, H.-J.: Siehe PEIPE, J.; KOZUSCHEK, N. & PRZYBILLA, H.-J.: Erfahrungen bei der messtechnischen Erfassung, Modellierung und Darstellung von kleinförmigen Kunstobjekten.	89
REICHERT, J.: Siehe HEIM, B.; GLÄSER, C.; BORG, G.; REICHERT, J.; THOMAE, M.; CHABRILLAT, S. & RICHTER, W.: Spektroradiometrische Untersuchungen im GEO/BIOLabor ‚FND Salzstelle Teutschenthal-Bahnhof‘ (Halle).	237
REULKE, R. & HOFFMANN, R.: Geometrische Datenfusionsverfahren.	259
REULKE, R.: Siehe SPANGENBERG, R. & REULKE, R.: Objektverfolgung mit Partikel-Filtern.	149
RICHTER, W.: Siehe HEIM, B.; GLÄSER, C.; BORG, G.; REICHERT, J.; THOMAE, M.; CHABRILLAT, S. & RICHTER, W.: Spektroradiometrische Untersuchungen im GEO/BIOLabor ‚FND Salzstelle Teutschenthal-Bahnhof‘ (Halle).	237
ROSS, L. & KLEINSCHMIT, B.: Virtuelle 3D-Stadtmodelle im kommunalen Einsatz – Entwicklungen, Trends und Perspektiven.	97
RÜLKE, C.: Siehe BUCHROITHNER, M.; KOCH, W.G. & RÜLKE, C.: Aktuelle Entwicklungen der Kartographieausbildung an der TU Dresden.	107
SCELLE, S.: Siehe BIENERT, A. & SCHELLER, S.: Verfahren zur automatischen Bestimmung von Forstinventurparametern aus terrestrischen Laserscannerpunktwolken.	37

SCHMICH, A.: Siehe MEIERHOLD, N.; BIENERT, A. & SCHMICH, A.: Linienbasierte Referenzierung zwischen Einzelbildern und Laserscannerdaten für eine bildgestützte Interpretation von Punktwolken in einer CAD-Umgebung.	79
SCHMIDT, C.: Siehe ALBERS, C. & SCHMIDT, C.: Methoden zur Verbesserung und Validierung neuer Geodaten unter Einsatz von FME und Oracle Spatial.	9
SCHÜTZE, R.: Siehe WANJING LI; BÖHLER, M.; SCHÜTZE, R.; MARZANI, F.S.; BOOCHS, F. & VOISIN, Y.: Ein stereoskopisches Nahbereichssystem auf Basis von adaptiver Musterprojektion.	171
SHAHZAD, F.; MAHMOOD, S.A. & GLOAGUEN, R.: Neotectonics development in North-Eastern Potwar (Pakistan): inferences from Remote Sensing and Geophysical Methods.	143
SPANGENBERG, R. & REULKE, R.: Objektverfolgung mit Partikel-Filtern.	149
THOMAE, M.: Siehe HEIM, B.; GLÄßER, C.; BORG, G.; REICHERT, J.; THOMAE, M.; CHABRILLAT, S. & RICHTER, W.: Spektroradiometrische Untersuchungen im GEO/BIOLabor ‚FND Salzstelle Teutschenthal-Bahnhof‘ (Halle).	237
TROPFENHAGEN, H.-G.: Siehe ASCH, K. & TROPFENHAGEN, H.-G.: GeoScience Markup Language – „Esperanto„ für geologische Daten.	213
UEBERHOLZ, R.: Geodateninfrastruktur – Operationelle Koordinierung der GDI-Niedersachsen im Kontext mit INSPIRE und GDI-NS.	199
VOIGT, S.: Siehe GÄHLER, M. & VOIGT, S.: DeSecure – Satellitengestützte Kriseninformation für Deutschland.	119
VOISIN, Y.: Siehe WANJING LI; BÖHLER, M.; SCHÜTZE, R.; MARZANI, F.S.; BOOCHS, F. & VOISIN, Y.: Ein stereoskopisches Nahbereichssystem auf Basis von adaptiver Musterprojektion.	171
VÖLKER, A. & MÜTERTHIES, A.: Landschaftsökologische Modellierung und automatisierte Erfassung von Landschaftselementen für das Monitoring und die Bewertung einer nachhaltigen Kulturlandschaft.	161
WALTER, T.: Siehe ANDERSON, J.; WETZEL, H.-U.; WALTER, T. & MOTAGH, M.: Messungen von Landabsenkungen im Kashmar Tal, NE Iran, unter Verwendung von Satelliten Radar Interferometrie.	203
WANJING LI; BÖHLER, M.; SCHÜTZE, R.; MARZANI, F.S.; BOOCHS, F. & VOISIN, Y.: Ein stereoskopisches Nahbereichssystem auf Basis von adaptiver Musterprojektion.	171
WETZEL, H.-U.: Siehe ANDERSON, J.; WETZEL, H.-U.; WALTER, T. & MOTAGH, M.: Messungen von Landabsenkungen im Kashmar Tal, NE Iran, unter Verwendung von Satelliten Radar Interferometrie.	203
WIEDEMANN, A.: Inspektion linearer Objekte mit flugzeuggestützten Sensoren.	181
WIJAYA, A. & GLOAGUEN, R.: Spatial Distribution of Stand Volume through Integration of Field Measurement and Remote Sensing Data: a Case Study of Tropical Rainforest in Central Indonesia.	189
SCHEELE, M.: Siehe BAUER, M.; SCHEELE, M. & SCHISCHMANOW, A.: Kalibration mittels Beugung und Goniometermessung im Vergleich.	267
SCHISCHMANOW, A.: Siehe BAUER, M.; SCHEELE, M. & SCHISCHMANOW, A.: Kalibration mittels Beugung und Goniometermessung im Vergleich.	267